



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计

激光增材制备 Fe313 工艺与  
组织性能研究

**Microstructure and Properties of  
Laser Additive Manufactur Fe313**

姓 名 董磊

学 院 机械工程学院

专 业 金属材料工程

指导教师 高忠林/耿可屏

职 称 研究员/讲师

完成时间 2023 年 5 月

**天津中德应用技术大学**  
**本科生毕业设计（论文）的声明**

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

## 摘 要

本文利用铁基合金粉末 Fe313 在 Q235 基板上的不同激光工艺的增材来研究 Fe313 铁基合金粉末激光增材组织及性能，文章对不同的功率、线扫描速度、送粉量三种工艺参数对激光增材铁基合金 Fe313 的显微组织和显微硬度的影响进行了研究，得到并分析了激光增材 Fe313 的显微组织形貌和显微硬度，结合快速凝固理论分析了显微组织形态和显微硬度变化的原因。

激光增材制备 Fe313 的组织形态以树枝晶、等轴晶和共晶组织为主，且枝晶呈现明显的方向性。随着增材过程的逐层累加，其内部的能量逐渐升高，使组织由底部到顶部逐渐粗大，其显微硬度也呈现出由高到低的过渡。在不同工艺的制备下 Fe313 的组织与性能存在很大差异，在成型结合良好的情况之下，激光功率由低到高、线扫描速度由快到慢、送粉量由多到少的工艺都会使激光增材制备 Fe313 的组织呈现由细到粗的趋势，在熔合线附近的组织因为增材层的堆积，堆积的热量造成了回火的效果，使熔合线附近的组织与同层其他部分相比更加粗大，在增材开始阶段，熔合线上的晶粒因结晶速度低温度梯度大，出现平面生长的趋势，随着热量的逐渐堆积，顶层的温度与重熔温度温差减小，重熔部分组织与顶层粗大的树枝晶尺寸形态相似，造成了熔合线不明显的现象。通过 XRD 结果和其他学术研究分析得出 Fe313 粉末激光增材工艺所得到的组织中其中树枝晶部分主要为 Fe-Cr 的过饱和固溶体，共晶组织部分为  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$  与铁素体相的混合物。硬度值受激光工艺影响较大，硬度随着不同激光工艺形成的组织的粗细而变化；整体硬度沿增材方向整体呈现下降趋势，熔合线部分硬度较其他部分而言较低。

**关键词：**铁基合金增材；激光增材；显微组织；性能

## ABSTRACT

In this paper, the laser additive structure and properties of Fe313 iron base alloy powder were studied by using the additive samples of different laser processes on Q235 substrate. In this paper, the effects of different process parameters, such as power, line scanning speed and powder delivery amount, on the microstructure and microhardness of laser enhanced iron base alloy Fe313 were reviewed. The microstructure morphology and hardness of laser additive Fe313 were obtained and analyzed. The reasons for the microstructure morphology and hardness changes were analyzed based on the theory of rapid solidification.

The microstructure of Fe313 prepared by laser additive is mainly dendritic, equiaxed and eutectic. With layer by layer accumulation during the additive process, the internal energy increases gradually, making the microstructure gradually coarse from bottom to top. The microhardness also shows a transition from high to low, and the dendrites show obvious directionality. There are great differences in the microstructure and properties of Fe313 prepared by different processes. Under the condition of good forming combination, laser power from low to high, line scanning speed from fast to slow, and powder delivery quantity from large to small will make the microstructure of Fe313 prepared by laser additive present a trend from fine to coarse. The microstructure near the fusion line is due to the accumulation of additive layer. The residual heat caused the tempering effect, which made the structure near the fusion line thicker than other parts of the same layer. When the number of layers was lower, the structure of the fusion line at the bottom of the remelted partial melting pool showed a trend of flat growth. Because of the gradual accumulation of heat, the temperature difference between the temperature of the higher number and the remelted temperature decreased, resulting in the structure of the remelted part similar to the thick dendrite on the top layer. The result is that the fusion line is not obvious. XRD results and other academic studies show that the dendritic part of the microstructure obtained by laser additive process of Fe313 powder is mainly the supersaturated solid solution of Fe-Cr, and the eutectic part is the mixture of  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$  and ferritic phase, and the hardness value is greatly affected by laser process. The hardness varies with the thickness of the microstructure formed by different laser processes. The overall hardness decreases from the molten pool along the additive direction, and the hardness of the fused line is lower than that of other parts.

**Key words:** Ferrous; Alloy; Microstructure; Properties

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 课题的目的意义 .....	1
1.2 课题研究意义 .....	2
1.3 国内外铁基合金研究现状 .....	2
1.4 实验支持理论 .....	5
1.5 本文研究内容和章节安排 .....	7
第二章 实验准备 .....	9
2.1 实验设备与材料 .....	9
2.1.1 实验设备 .....	9
2.1.2 实验材料 .....	10
2.2 实验方法 .....	10
第三章 Fe313 单道熔覆实验 .....	12
3.1 Fe313 单道熔覆实验设计依据 .....	12
3.2 Fe313 单道熔覆实验方案 .....	12
3.3 Fe313 单道熔覆实验结果 .....	14
第四章 Fe313 激光增材实验 .....	15
4.1 Fe313 激光增材实验设计 .....	15
4.2 激光功率变量设计 .....	15
4.3 送粉量变量设计 .....	15
4.4 线扫描速度变量设计 .....	16
第五章 实验结果与分析 .....	17
5.1 宏观成型分析 .....	17
5.2 微观组织分析 .....	19
5.2.1 金相组织分析 .....	19
5.2.2 物相分析 .....	29
5.2.3 增材试样显微硬度分析 .....	31
第六章 结论 .....	35

参考文献.....	36
致 谢.....	38
附录.....	41
中文译文及外文资料.....	41

# 第一章 绪论

## 1.1 课题的目的意义

作为当今材料工程领域较为热门的技术，人们对激光增材技术的探索在近几年来出现了飞跃式的进步。在表面工程领域激光增材在增加材料耐磨性、耐腐蚀性方面有着很大的优势<sup>[1]</sup>。激光增材工艺有着无需模具、生产效率高、耗材少等优异特点，十分适合于生产结构复杂、轻量化设计的零件<sup>[2]</sup>。激光加工的能量集中密集，使被加工材料在瞬间达到很高的温度而熔化，每层材料之间结合强度高，相比于传统制造工艺和表面工程工艺，热变形小激光增材和熔覆对基体的热影响较小，组织较细小，这种特点受到了国内外广大学者的重视<sup>[3]</sup>。

铁基合金（Iron base alloys）是使用量最大的一种硬面材料，这种材料适用范围广、综合性能良好，在船舶、汽车、飞行器等领域均有应用，相比于铝、镍等合金，铁基合金的价格更加低廉，并且当铁基金属材料选用铁基合金粉末进行熔覆时，因为成分相类似，所以结合面十分牢固，十分适合广泛运用在民用领域<sup>[4]</sup>，可以制造出高强度、高耐磨的机械零件、工具等。因此进行铁基合金激光熔覆得到耐磨性好、耐腐蚀性强的材料也成为了广大学者的研究对象，经实验研究表明多种涂层制备技术可在廉价的碳钢表面制备出高性能包覆层，有助于制造可服役于极端条件的高要求零部件，大幅节省生产成本<sup>[5]</sup>。与电弧焊、热喷涂等传统涂层制备技术相比，激光增材技术冷却速度快、热输入少、热影响区小、稀释率低。然而，国内一些学者进行实验证明由于激光技术本身能量密集“急热骤冷”的特点，在成形的过程当中很容易出现结合成型不好的情况，并且增材部分集中的热应力很容易诱导微裂纹生成<sup>[6]</sup>。此外，随着对高性能工程零部件服役性能要求的不断提高，很多研究学者和工程企业尝试将一定比例的硬质颗粒如 WC 与铁基合金粉末掺杂以提高增材硬度<sup>[7]</sup>。然而，这种单纯让材料硬度得以提高的方法易加剧增材部分的开裂敏感性，使其服役寿命降低，问题如今依旧未完全解决。

随着铁基合金材料在工业领域的应用逐渐增多，如何高效、节能地制造铁基合金零件成为制造行业的热点问题，激光增材制造技术无需模具、生产效率高、耗材少的特点正好适应了当前的需求，但激光增材制造铁基合金构件的成形质量、性能及环保等方面仍存在许多问题，铁基合金激光增材成形构件中存在着残余应力、孔隙、裂纹等缺陷，铁基合金激光增材制造技术难以大规模地推广应用，限制了其发展速度。故本课题选择激光增材制造制备 Fe313，借用激光熔覆的实验摸索激光增材的实验思路，从激光增材的各种实验参数入手，分析不同激光工艺下的组织和性能特点。

## 1.2 课题研究意义

铁基合金因为其价格低廉、综合性能良好的特点被广泛运用于工业领域，但在我国如何节能高效的生产或修复铁基合金零件仍是目前的技术难题。激光增材技术无需模具、生产效率高、耗材少的特点正好符合当前铁基合金的应用需求。我国每年因为民用铁基零件、建材报废而造成的经济损失材料损失十分巨大，而利用表面修复技术对破损零件进行修复可以极大程度上减少这种损失。对于破损零件采用激光增材修复相比于传统应急维修手段，其高度柔性、高结合强度、快速性等特点，十分适用各种环境下应急维修。

同时工业上运用机加工减材制造对复杂零件进行加工十分困难，而激光增材技术不受制约于零件的复杂程度，可以针对复杂的零件进行一定批量的生产。铁基零件在结构上的轻量化改良也可以通过激光增材制造来实现。

但在激光增材铁基合金的研究中，铁基合金受不同激光增材参数影响而导致组织和性能变化较大。随着激光增材的进行，材料内部的热量也在逐渐积累，这种现象使激光增材铁基合金的修复和制造部分的性能出现不均匀性，而本课题从这方面入手，探究激光增材 Fe313 不同增材位置的组织性能变化以及不同工艺参数对 Fe313 激光增材的组织性能影响。

## 1.3 国内外铁基合金研究现状

铁基合金作为当今工程技术中应用广泛、综合性能良好的材料，因其原料价格较为低廉且硬度较高，增材制造后可以与基材形成良好的冶金结合，并具有良好的韧性和耐磨性能，受到了学者们的广泛关注<sup>[8]</sup>。自熔性粉末合金材料是使用最为广泛的材料种类，由于合金中含有硅、硼、铬、镍等元素，因此这类合金具有良好的耐高温、耐腐蚀以及抗氧化性能，十分适合野外环境下在空气中进行修复工作。此外，自熔性合金对基材的适应性很高，几乎可以匹配任何铁基合金材料，包括各类碳钢、合金钢、不锈钢和铸铁类材料<sup>[9]</sup>。

国内学者时运、胡荣祥等人在对外加磁场对等离子熔覆 Fe313 合金涂层进行研究时对其组织分析得到的熔覆层主要包含初生树枝晶相和枝间晶碳化物相。树枝晶是典型的过饱和固溶体相，大量 Cr 元素固溶在组织中，置于涂层中的 Fe 元素和 Cr 元素原子分数之和与 C 元素原子分数之比接近 7:3<sup>[10]</sup>。

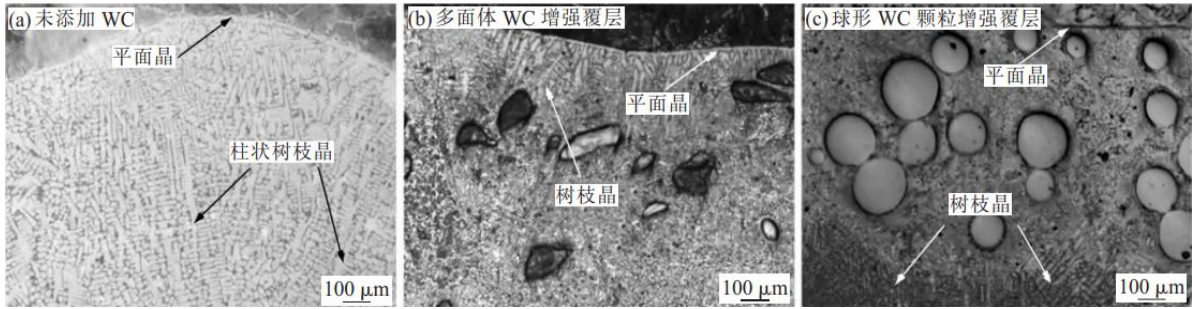


图 1-1 WC 颗粒增强 Fe 基熔覆层的显微组织<sup>[10]</sup>

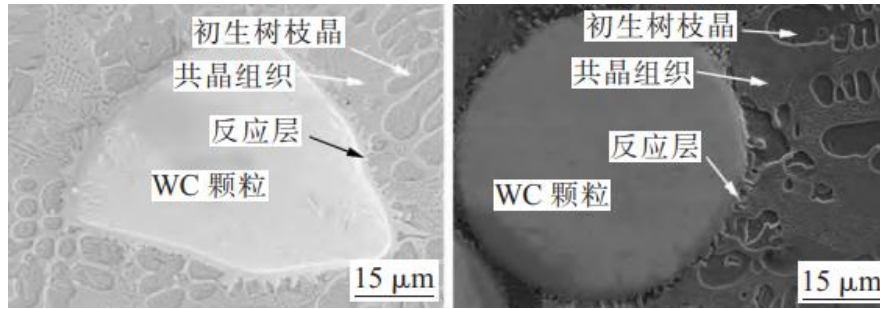


图 1-2 WC 颗粒增强 Fe 基合金涂层的高倍 SEM<sup>[10]</sup>

此外，在时运的试验研究中未外加磁场或磁场强度较弱时，碳化物呈大块网状分布，不利于涂层的塑韧性，而外加磁场强度足够大时涂层中的碳化物分布更为细小均匀<sup>[11]</sup>。

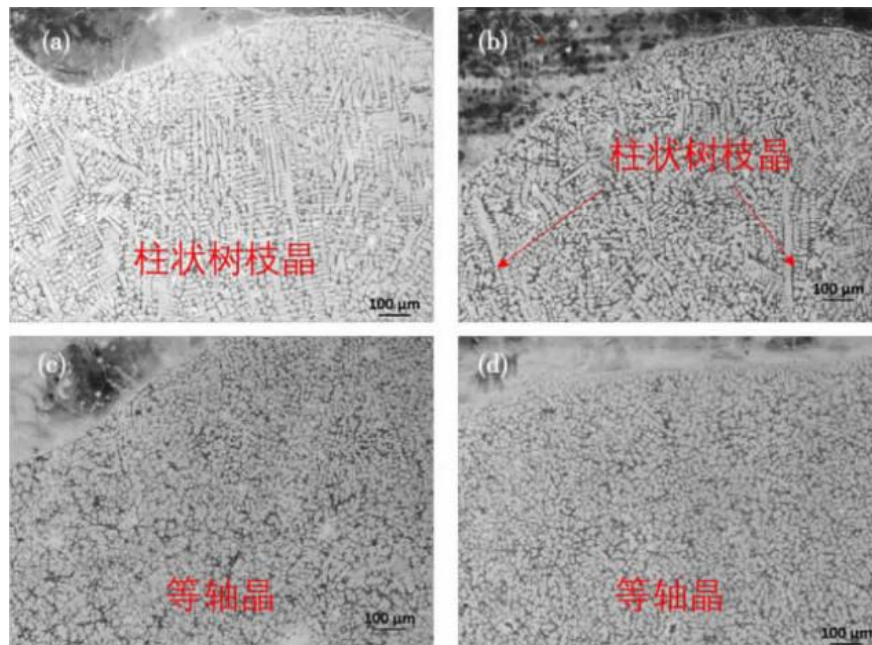


图 1-3 不同磁场电流下制备的 Fe313 合金熔覆层金相图<sup>[11]</sup>: (a)0A, (b)5A, (c)7A, (d)9A

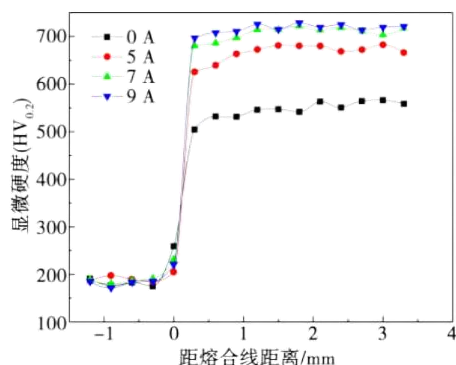


图 1-4 不同磁场电流下制备的 Fe313 合金熔覆层的显微硬度<sup>[11]</sup>

在杨林的研究中，完成了 Fe313 激光熔覆的工艺参数优化，在优化了激光功率、线扫描速度、送粉量后得到了没有气孔和裂纹缺陷的熔覆层，界面在熔覆层和基体之间形成，得到的熔覆层能与基体形成良好的冶金结合。熔覆层上部组织，主要是含 Si 的等轴树枝晶，由于冷却速度快组织较其他部分更为细小，其对熔覆层的硬度及耐磨性有显著影响；熔覆层左边和底部组织界面处多为细小的柱状晶，各处的散热条件不同，形成了不同的晶体形态<sup>[12]</sup>。

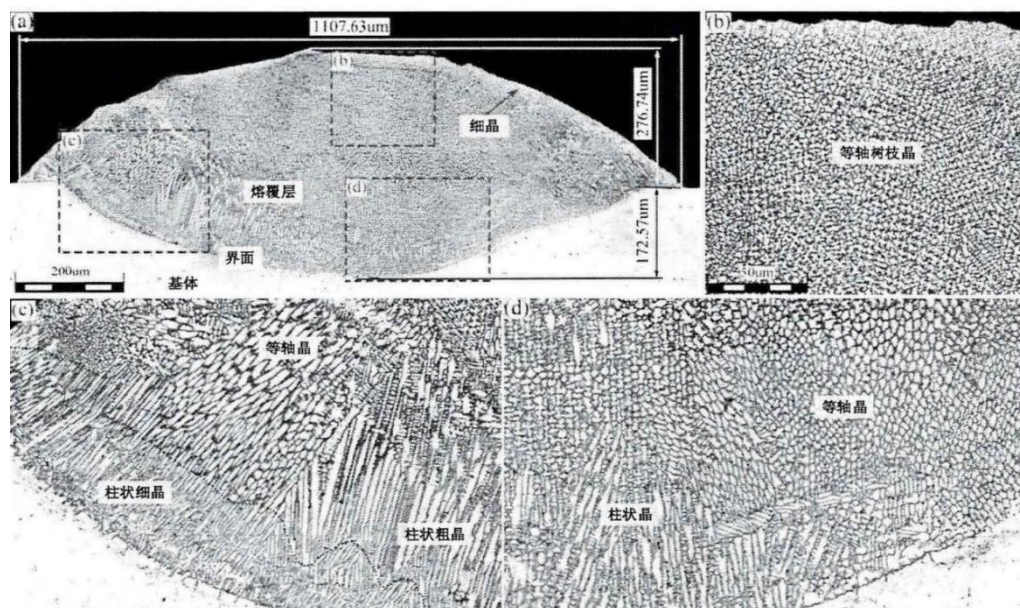


图 1-5 经优化后熔覆层不同位置的显微组织<sup>[12]</sup>

国内学者党苏武在不同气氛环境下使用 Fe314 粉末进行了激光增材实验，在得到激光增材试样后结合快速凝固理论分析得出 Fe314 激光增材的显微组织中不同形态组织的成型原因，在气氛环境不同的情况下，激光增材成形 Fe314 修复层并没有剧烈的性能变化，组织形态的变化也较为微小，激光增材 Fe314 修复层力学性能良好，符合野外环境的使用情况。在不同工艺的增材实验当中摸索出了 Fe314 与不同基体增材结合的最佳工艺参数<sup>[13]</sup>。

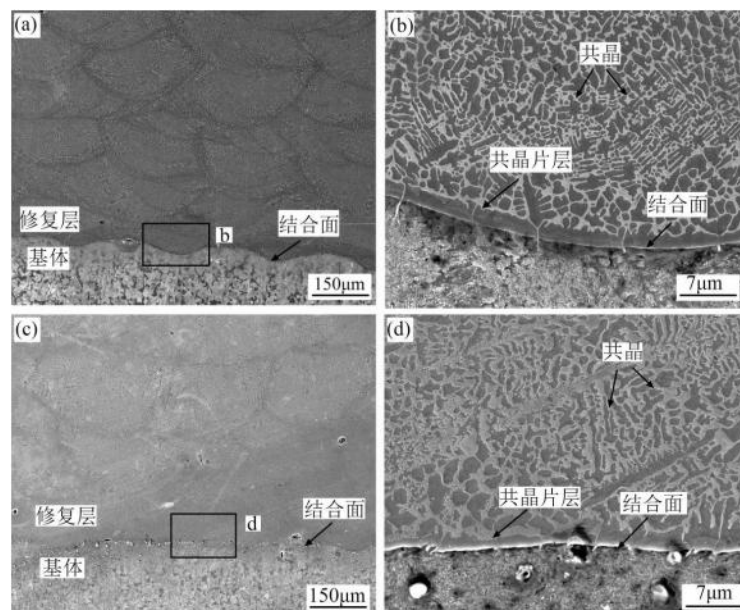


图 1-6 不同气氛环境下 Fe314/40Cr 结合面 SEM(a)(b)氮气氛围；(c)(d)空气氛围<sup>[13]</sup>

在 1959 年，国外就有学者利用 P/M 工艺和氧化铝颗粒粉末对铁基合金进行了性能增强。证明了分散于铁的基体中的各种氧化物可以提高铁基合金的抗蠕变特性，这种原则称为氧化物弥散强化原则。国外部分学者进行制备氧化铝颗粒弥散强化铁基复合材料，通过电子显微镜观察了颗粒与基体的界面，发现表面活性元素可有效降低界面能。此后，关于颗粒与基体界面问题成为铁基复合材料研究的一个热点，也日益成为制约铁基复合材料发展的重要原因<sup>[14]</sup>。

1991 年，国外学者采用原位反应铸造法制 Ti/Fe 复合材料，且界面洁净无气体等夹杂物产生，颗粒分布均匀 TiC 颗粒与基体结合良好均匀弥散，Ti 和 C 的加入比例与加入时的温度、冷却速度以及热处理都对材料的显微结构有影响。此工艺简单、成本较低、颗粒体积分数高和弥散分布性好，具有实用和广泛推广的价值<sup>[16]</sup>。

#### 1.4 实验支持理论

**凝固热力学：**材料在凝固的过程中其熵值会发生明显变化，通过热力学相关的公式，可以对凝固过程进行简单的描述，随着热力学状态函数变化可以进一步判断凝固过程自发进行的可行性，金属凝固结晶形核业余热力学函数有关，金属结晶需要一定的驱动力，所以理论的结晶温度都会高于实际的结晶温度（即过冷现象）来满足驱动力需求。过冷度升高时，固相和液相的自由能差值变大，凝固金属的相变驱动力越大，金属结晶速度加快。

**成分过冷理论：**在金属液凝固的过程中在固液界面前方因为溶质再分配而引起的溶质浓度变化，使得理论凝固温度发生改变形成的过冷。在由固液界面前方发生的这种溶质再分配引起的过冷，称为成分过冷。这种过冷主要受到界面前方的实际温度和

液相线温度分布两者共同影响。在固溶体凝固的过程当中，假设不出现成分过冷，则会出现与纯金属相似的晶体结构，比如处于正的温度梯度下，会出现固液相界面平稳地凝固前进的现象；但是，在合金凝固的过程中，合金液体中的溶质重新排布，当无法发生充分扩散时，因其溶质的熔点不同造成先后凝固部分的成分有明显的差别，这种成分过冷在很大的程度上取决于液体中溶质的混合情况。金属冷却凝固时由于溶质元素的再分配导致固液界面前沿溶质浓度的变化，引起理论凝固温度低于实际凝固温度，而在液固界面前沿液相内形成的过冷。成分过冷的判据如公式 1-1 所示。

$$\frac{G_L}{R} \leq \frac{m_L C_0}{D_L} \cdot \frac{1 - k_0}{k_0} \quad (1-1)$$

式中： $G_L$ —界面液相侧温度梯度； $R$ —界面生长速率/（ $\mu\text{m/s}$ ）； $m_L$ —液相线斜率； $C_0$ —合金平均成分； $D_L$ —溶质在液相中的扩散系数/（ $\text{cm}^2$ ）； $k_0$ —平均溶质扩散系数/（ $\text{cm}^2/\text{s}$ ）。

材料凝固结晶形态与温度梯度  $G$  与凝固速度  $R$  的平方根比值  $G/\sqrt{R}$  有关。随着  $G/\sqrt{R}$  值的降低，晶粒逐渐发生平面晶—苞状晶—树枝晶—等轴晶的转变。激光将金属粉末融化，高温的粉末与较冷的基体相接触，产生了极高的温度梯度  $G$ ，但此时凝固速度  $R$  非常小，导致  $G/\sqrt{R}$  趋近无穷大，达到临界过冷形成平面晶。随着结晶逐渐远离结合面，固液界面朝向熔池中部推进，凝固速度逐渐增大，温度梯度逐渐减小， $G/\sqrt{R}$  值降低，形核率降低，晶体形态表现为胞状晶。随着激光作用时间的延长，液相线前沿形核变得困难，只有已有的晶核继续生长，并沿着散热最快的方向择优生长而形成熔池上部的柱状晶区。当凝固界面到达熔池表面时，此时熔池与外界热交流的途径不仅局限于基体，还能通过空气与外界进行热交换，散热的熔池直接接触空气产生对流，会加快凝固速度  $R$ ，凝固速度的增大导致  $G/\sqrt{R}$  值的减小，从而熔池顶部形成大量的等轴状树枝晶。

成分偏析：合金中各组成元素在结晶时分布不均匀的现象称为偏析。熔池一次结晶过程中，由于冷却速度快，已凝固的金属中化学成分来不及扩散，造成分布不均，产生偏析。熔池一次结晶时，最先结晶的结晶中心金属最纯，后结晶部分含其他合金元素和杂质略高，最后结晶部分，即结晶的外端和前缘所含其他合金元素和杂质最高。在一个柱状晶粒内部和晶粒之间的化学成分分布不均现象称为显微偏析。熔池一次结晶时，由于柱状晶体的不断长大和推移，会把杂质“赶”向熔池中心，使熔池中心的杂质含量比其他部位多，这种现象称为区域偏析。焊缝的断面形状对区域偏析的分布影响很大。窄而深的焊缝，各柱状晶的交界在其焊缝的中心，因此焊缝中心聚集有较多的杂质。这种焊缝在其中心部位极易产生热裂纹。宽而浅的焊缝，杂质则聚集在焊缝的上部，这种焊缝具有较高的抗热裂能力。熔池在一次结晶的过程中，要不断地放

出结晶潜热，当结晶潜热达到一定数值时，熔池的结晶就出现暂时的停顿。以后随着熔池的散热，结晶又重新开始，形成周期性的结晶，伴随着出现结晶前沿液体金属中杂质浓度的周期变动，产生周期性的偏析称为层状偏析。层状偏析集中了一些有害元素，因此缺陷往往出现在层状偏析中。由层状偏析所造成的气孔。

非均匀形核：在液相中，新相优先在某些区域内形核的方式叫做非均匀。正因为纯金属中，不可避免地含有一定固态的杂质细小微粒，金属熔化后，这些难熔的杂质将分布于金属的液体之中。金属结晶时，晶核往往就先依附于这些杂质的表面而形成。实际上在液态金属中，不可能绝对没有杂质，在其中总是或多或少地含有某些固态的杂质。所以，实际金属的结晶，大都是属于非均匀形核。在过冷的液体中并不是所有的晶胚都可以转变为晶核。事实上，只有那些尺寸等于或大于某一临界尺寸的晶胚才能稳定地存在，并能自发地长大。这种等于或大于临界尺寸的晶胚即为晶核。在一定的过冷度条件下，固相的自由能低于液相的自由能，当在此过冷液体中出现晶胚时，一方面原子从液态转变为固态将使系统的自由能降低，它是结晶的驱动力；另一方面，由于晶胚构成新的表面，产生表面能，从而使系统的自由能升高，它是结晶的阻力。

## 1.5 本文研究内容和章节安排

本文主要借用激光熔覆的实验摸索激光增材的实验思路，从激光增材的使用功率、线扫速度、送粉量三种因素入手，通过金相显微组织和硬度的检测，分析 Fe313 激光增材的组织与性能，具体实验内容如下：

- 1.确定激光单道熔覆实验参数。在预置的 Q235 基板上进行激光熔覆单道实验。
- 2.观察宏观形貌，对熔覆高度、宽度进行测量，并观察试样判断熔覆层是否有微裂纹。选取较好成型的参数进行激光增材实验。
- 3.制备金相试样，进行镶样和金相制备以满足组织观测的要求。完成拍摄后总结数据并根据相关文献资料分析其组织变化，进行硬度测试。
- 4.总结数据研究其规律并查找相关文献分析不同激光参数下对铁基材料 Fe313 性能的影响。

论文第二章对激光增材 Fe313 实验所需要的材料和设备进行了介绍，叙述了后续实验的实验方案和参考标准。

第三章对激光熔覆单道实验进行参数设计，并对表面成型的情况进行分析，得出成型较好的实验参数范围，为激光增材实验进行准备。

在第四章中对激光增材实验的实验参数进行了实验方案设计，对激光功率、线扫速度、送粉量的单变量实验进行了实验设计。

第五章从宏观成型、金相组织、物相组成以及显微硬度四个层面对激光增材 Fe313 的组织 and 性能在不同成型工艺的情况下的变化进行了分析。

第六章为总结部分，对研究内容和通过实验所得到的结果进行总结。

## 第二章 实验准备

### 2.1 实验设备与材料

#### 2.1.1 实验设备

本实验从研究材料制备、材料截取、试样制备再到实验分析整体过程所涉及的设备包括激光熔覆淬火设备，电火花线切割机，试样镶嵌，抛光设备，金相显微镜等。

在制备所研究材料时，本实验选用 HANSGS-RG0016-F3K 型设备（图 2-1），该设备由半导体激光器、导光系统、六轴机器人、通用卧式加工机床、数控系统、冷却系统、稳压系统等组成，其中激光器选自原装德国进口 LASERLINE LDM3000-100 光纤耦合半导体激光器，六轴机器人选用德国 KUKA 生产 KR22 R1610 型机器人。

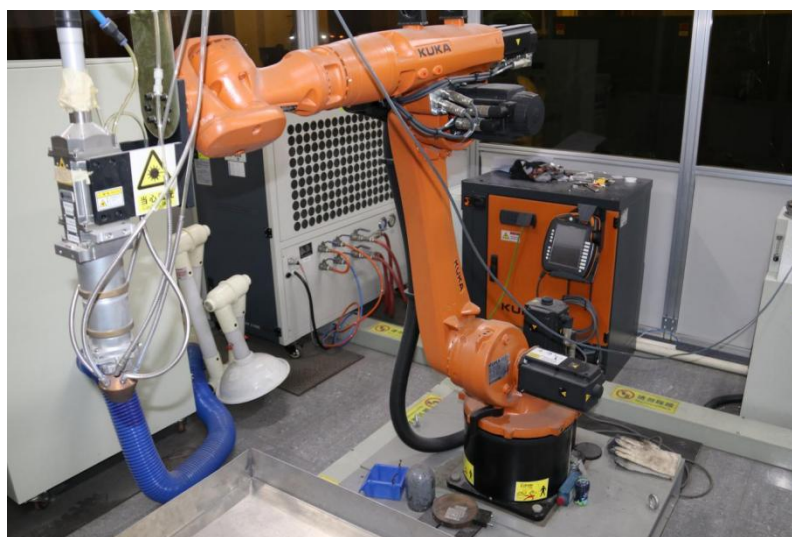


图 2-1 激光熔覆淬火设备

本实验截取试样过程中为避免切割过程中产生裂纹，采用 DK7720 快速走丝电火花线切割机（图 2-2）进行切割，选用橡木粉在镶样机中进行镶样，抛光选用 P-2G 金相试样抛光机（图 2-3）。



图 2-2 DK7720 快速走丝电火花线切割机



图 2-3 P-2G 金相试样抛光机

在实验分析阶段本实验使用德国 ZEISS 蔡司倒置金相显微镜 Axio Vert.A1 如图 2-4 所示，进行金相组织观察，选用显微维氏硬度计进行硬度测试。



图 2-4 德国 ZEISS 蔡司倒置金相显微镜 Axio Vert.A1

### 2.1.2 实验材料

本实验对铁基合金 Fe313 的研究采用 Q235 作为增材基板，选用中冶鑫盾制造粒度为 200 目的 Fe313 金属粉末，成分如表 2-3 所示进行激光增材实验，保护气体为 99.99% 的氩气。

表 2-3 Fe313 粉末成分表

元素	C	Cr	B	Si	Fe
含量 Wt%	0.1	15	1	1	余量

### 2.2 实验方法

本实验将单道熔覆的单因素变量实验作为该实验的实验基础，采用同轴送粉的方式进行熔覆增材实验，借由单因素变量实验成型情况来决定增材实验的实验参数，以确保成型后的增材部分不易出现开裂、适于成型研究。

课题所研究内容主要包括激光增材制造铁基合金 Fe313 沉积薄壁的显微组织及其性能，所截取试样主要为观察显微组织的金相试样、硬度检测试样。

实验依据 GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》标准进行显微组织试样制备，所截面为增材部分纵截面，将所截部分用橡木粉在 150℃的环境下进行 15min 的镶嵌，随后依据国家标准 GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》进行磨制抛光。腐蚀过程选用王水作为腐蚀液进行腐蚀，腐蚀方式选用脱脂棉球进行擦拭，静置 5s 后用水冲洗进行试样组织观察。

硬度检测选用显微维氏硬度计进行检测，依据 GB/T 4340.1-2009《金属材料维氏硬度试验第 1 部分：试验方法》的实验方法进行测量，对所研究的部分进行显微硬度分析。

### 第三章 Fe313 单道熔覆实验

#### 3.1 Fe313 单道熔覆实验设计依据

增材制造本质上是材料的逐渐累加，所以增材成型的效果以及其组织形态从本质上来说与单道熔覆有相似之处，故本实验采用控制单因素变量的实验方法进行单道熔覆实验，对激光功率、线扫描速度、送粉量这三种因素进行调整，得到较好成型工艺范围。

#### 3.2 Fe313 单道熔覆实验方案

本实验依据国家标准 GB/T 39253-2020《增材制造金属材料定向能量沉积工艺规范》进行铁基合金 Fe313 单道熔覆实验，实验采用控制变量法进行实验设计，控制的三个因素为激光功率、线扫描速度、送粉量，主要目的是找出适合增材且不易开裂的增材工艺参数范围进行试验，实验设计表格如表 3-1 所示。

表 3-1 激光熔覆实验参数

编号	激光功率 (W)	送粉量 (rad/min)	线扫描速度 (mm/s)
1	1100	1.5	8
2	1300	1.5	8
3	1500	1.5	8
4	1700	1.5	8
5	1900	1.5	8
6	1100	2.5	8
7	1300	2.5	8
8	1500	2.5	8
9	1700	2.5	8
10	1900	2.5	8
11	1100	3.5	8
12	1300	3.5	8
13	1500	3.5	8
14	1700	3.5	8
15	1900	3.5	8
16	1100	1.5	6
17	1300	1.5	6

18

1500

1.5

6

续表 3-1 激光熔覆实验参数

编号	激光功率 (W)	送粉量 (rad/min)	线扫描速度 (mm/s)
19	1700	1.5	6
20	1900	1.5	6
21	1100	2.5	6
22	1300	2.5	6
23	1500	2.5	6
24	1700	2.5	6
25	1900	2.5	6
26	1100	3.5	6
27	1300	3.5	6
28	1500	3.5	6
29	1700	3.5	6
30	1900	3.5	6
31	1100	1.5	4
32	1300	1.5	4
33	1500	1.5	4
34	1700	1.5	4
35	1900	1.5	4
36	1100	2.5	4
37	1300	2.5	4
38	1500	2.5	4
39	1700	2.5	4
40	1900	2.5	4
41	1100	3.5	4
42	1300	3.5	4
43	1500	3.5	4
44	1700	3.5	4

45

1900

3.5

4

### 3. 3Fe313 单道熔覆实验结果

单道熔覆实验的成型情况如图 3-1 所示,可以清晰地看出在激光功率为 1100W 时,送粉量为 2.5rad/min 和 3.5rad/min 的实验组均出现开裂现象,而当激光功率为 1300W 以上时均无裂纹产生。



图 3-1 单道激光熔覆实验成型情况

经过观察宏观形貌结合实验时的飞溅发现,当功率为 1300W 时,送粉量在 2.5~3.5rad/min 之间的实验组的成型情况并不良好,表面十分粗糙出现很多未熔的颗粒。在功率为 1500W 所有工艺和 1700W 对应送粉量为 3.5rad/min 线扫描速度为 8mm/s 的实验组表面相较 1300W 更加平滑,但仍有部分颗粒未熔融。而功率为 1700W 和 1900W 的所有实验组,熔覆表面均未出现未熔融现象。但激光功率为 1900W 的所有工艺以及激光功率为 1700W 扫描速度为 4mm/s 的所有实验组,熔覆单道附近均出现较深的烧痕,其中 1900W 扫描速度为 4mm/s 送粉量为 2rad/min 的实验组最为严重,热量过高并不适于有大量热量堆积的增材工艺。而激光功率为 1700W 线扫描速度为 6mm/s、8mm/s 送粉量为 1.5rad/min、2.5rad/min 的激光工艺参数所得到的单道熔覆,从效率方面其高度和宽度相比于其他功率的参数更加适于激光增材。

## 第四章 Fe313 激光增材实验

### 4.1 Fe313 激光增材实验设计

借由单道熔覆实验的结果可以清楚地分析出激光功率 1400~1900W、送粉量 1.5~3.5rad/min、线扫描速度 4~8mm/s 的范围之内均无裂纹出现，而功率 1700W、送粉量 1.5rad/min、2.5rad/min 线扫描速度 6mm/s、8mm/s 时的工艺参数单道熔覆成型效果最符合预期。故此本实验在该范围内调整激光功率、线扫描速度、送粉量来进行激光增材单因素变量实验。因增材过程相较于单道熔覆实验其热应力作用更大，增材后容易增材部分开裂，故此选用基材外加 300℃ 预热进行试验以保证增材部分的稳定。因不同工艺、不同部分的熔高熔宽均不相同故此在增材过程中需要多次调整保证 0 离焦，所以在程序编写中每 4 层设为一个循环进行程序编写，在每次循环结束后进行调整，为了方便组织分析对比，本实验进行的增材层数均为 16 层。

### 4.2 激光功率变量设计

针对激光熔覆单道实验所得到的结果选用成型较好的参数范围进行单因素变量控制实验。实验参数如表 4-1 所示，本文将激光功率在 1400~1900W 范围内每次调整 100W 激光功率进行试验。

表 4-1 激光功率变量实验工艺数据

试样编号	激光功率 (W)	送粉量 (rad/min)	线扫描速度 (mm/s)
1	1400	3	6
2	1500	3	6
3	1600	3	6
4	1700	3	6
5	1800	3	6

从激光熔覆单道实验中挑选线扫描速度和送粉速度，按照成型效率较好且无裂纹的实验组设置实验，将其设定为 6mm/s 和 3rad/min，依据国标 GB/T 39253-2020《增材制造金属材料定向能量沉积工艺规范》的标准进行增材制备。

### 4.3 送粉量变量设计

针对送粉量单道实验所得到的结果选用成型较好的参数范围进行单因素变量控制实验。实验参数如表 4-2 所示，本文将送粉量在 1.5~3.5rad/min 范围内每次调整 0.5rad/min 送粉速度进行试验。

表 4-2 送粉量变量实验工艺数据

编号	激光功率 (W)	送粉量 (rad/min)	线扫描速度 (mm/s)
6	1700	1.5	6
7	1700	2	6
8	1700	2.5	6
4	1700	3	6
9	1700	3.5	6

从激光熔覆单道实验中挑选激光功率和扫描速度，按照成型效率较好且无裂纹的实验组设置实验，将其设定为 1700W 和 6mm/s，依据国标 GB/T 39253-2020《增材制造金属材料定向能量沉积工艺规范》的标准进行增材制备。

#### 4.4 线扫描速度变量设计

针对线扫描速度单道实验所得到的结果选用成型较好的参数范围进行单因素变量控制实验。实验参数如表 4-3 所示，本文将线扫描速度在 4~8mm/s 范围内每次调整 1mm/s 送粉速度进行试验。

表 4-3 线扫描速度变量实验工艺数据

编号	激光功率 (W)	送粉量 (rad/min)	线扫描速度 (mm/s)
10	1700	3	4
11	1700	3	5
4	1700	3	6
12	1700	3	7
13	1700	3	8

从激光熔覆单道实验中挑选激光功率和送粉速度，按照成型效率较好且无裂纹的实验组设置实验，将其设定为 1700W 和 3rad/min，依据国标 GB/T 39253-2020《增材制造金属材料定向能量沉积工艺规范》的标准进行增材制备。

## 第五章 实验结果与分析

### 5.1 宏观成型分析

利用单道熔覆的成形分析得到的结果所进行的共计 15 组实验中，在正常不添加预热的环境下，送粉量较大的几组均出现开裂情况，在参考齐勇田、曹润平、栗卓新等人对铁基合金激光熔覆开裂产生原因的分析后采用多次不同温度的预热进行试验<sup>[14]</sup>，最终发现在 300℃ 的预热下 Fe313 激光增材制备均成型良好，如图 5-1 所示。



图 5-1 Fe313 激光增材制备

通过对增材的高度厚度进行测量（图 5-2）得到不同工艺增材的高度和宽度，如表 5-1、5-2、5-3，图 5-3、5-4、5-5。

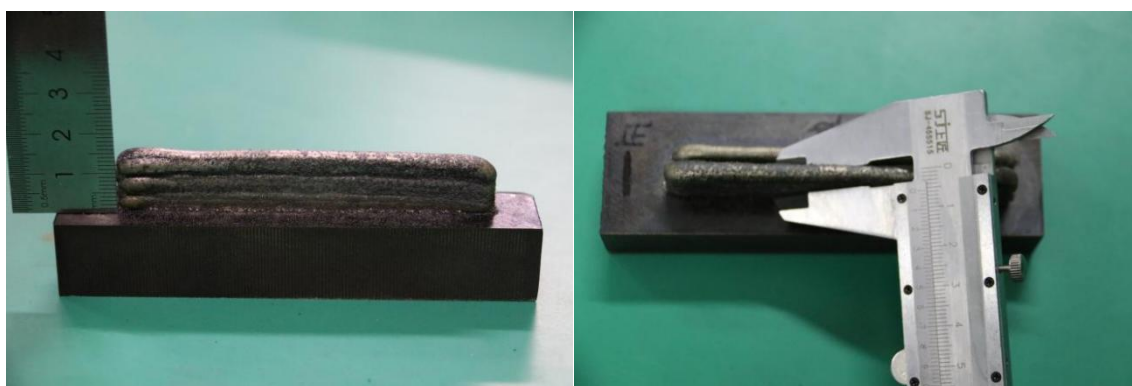


图 5-2 Fe313 激光增材宏观数据采集

表 5-1 激光功率单变量实验激光增材试样宏观数据

编号	功率 (W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	高度 (mm)	宽度 (mm)
1	1400	3	6	14.9	4.3
2	1500	3	6	15.1	4.7
3	1600	3	6	15.5	4.9
4	1700	3	6	16	5
5	1800	3	6	16.2	5.2

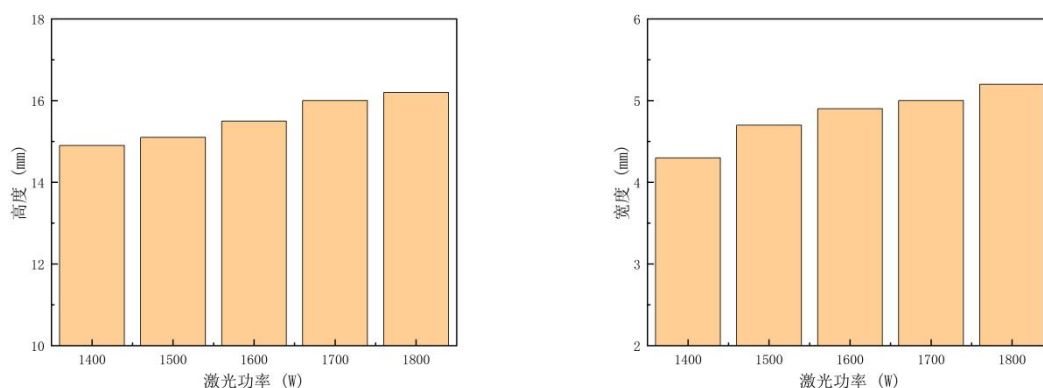


图 5-3 激光功率单变量实验增材高度宽度数据分析图

表 5-2 送粉量单变量实验激光增材试样宏观数据

编号	功率 (W)	送粉量(rad/min)	扫描速度 (mm/s)	高度 (mm)	宽度 (mm)
6	1700	1.5	6	15.1	4
7	1700	2	6	15.3	4.1
8	1700	2.5	6	15.4	4.5
4	1700	3	6	16	5
9	1700	3.5	6	16.5	5.4

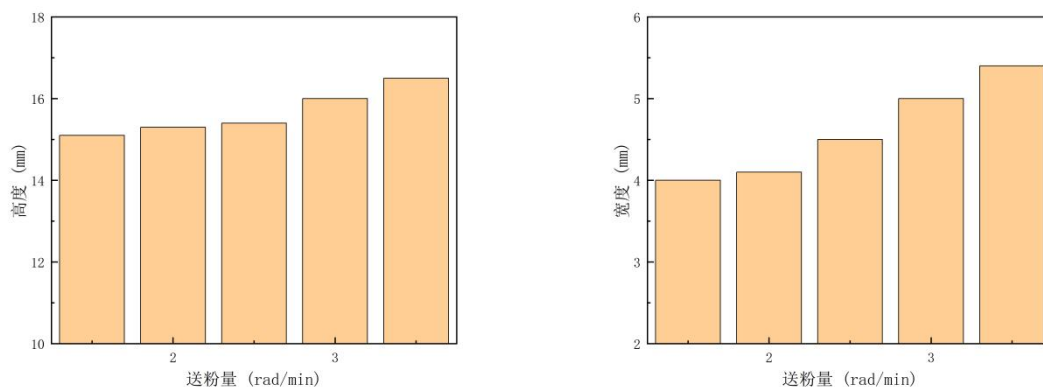


图 5-4 送粉量单变量实验增材高度宽度数据分析图

表 5-3 线扫描速度单变量实验激光增材试样宏观数据

编号	功率 (W)	送粉量(rad/min)	扫描速度 (mm/s)	高度 (mm)	宽度 (mm)
10	1700	3	4	16.2	5.3
11	1700	3	5	16.1	5.2
4	1700	3	6	16	5
12	1700	3	7	15.5	4.9

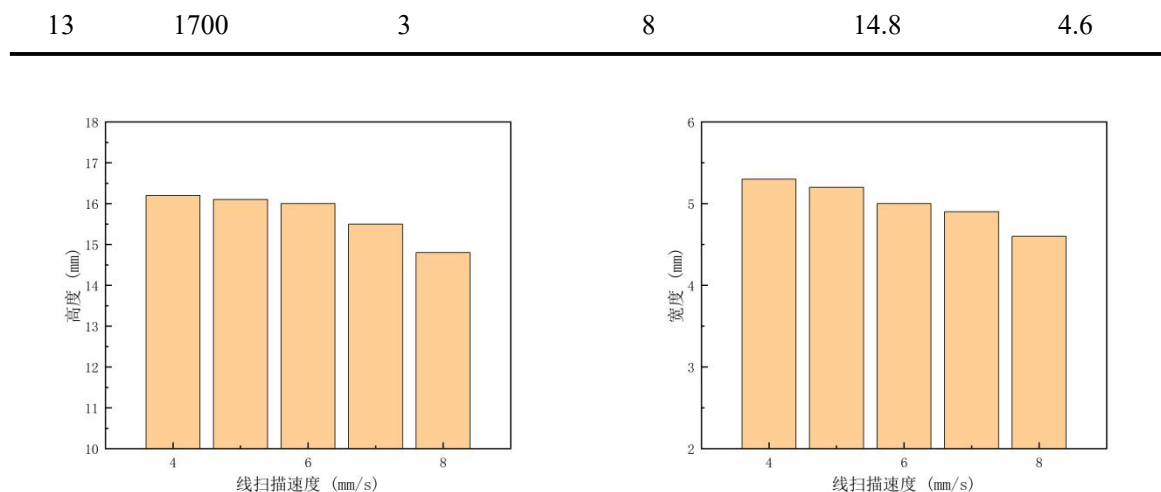


图 5-5 线扫描速度单变量实验增材高度宽度数据分析图

通过以上实验数据对比可知在激光功率、线扫描速度和送粉量三个参数中，送粉量对于增材的高度宽度影响最大，在实际生产中在保证一定成型精度和性能的条件下较高较宽的成型参数有益于生产效率的提高，其次激光功率和线扫描速度的变化也对增材的高度和厚度有一定程度上的影响，激光功率越高其单位面积的热积累量越高，这就使更多的粉末融化，根据公式：

$$\sigma = \sigma_0 (1 - bT) \quad (5.1)$$

式中：

$b$ ——与成分有关的经验常数

$\sigma_0$ ——一定条件下开始的表面张力值

$T$ ——温度变动值

在成型凝固过程中，与温度较低的情况相比，在温度较高的情况下其表面张力较低，高温形成的金属液滴更易形成较高较宽的增材形貌，而随着线扫描速度的下降在热积累量上与提高激光功率也有着相同的效果。

## 5.2 微观组织分析

### 5.2.1 金相组织分析

在光学显微镜下得到金相组织照片，基材与增材结合部分的照片如图 5-6 所示。

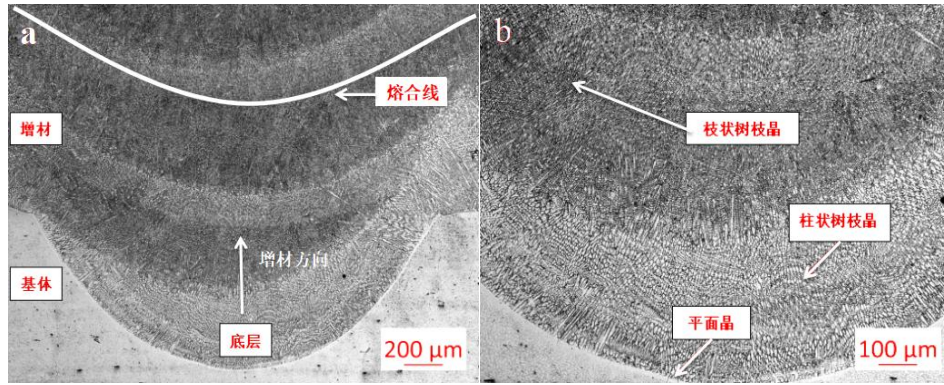


图 5-6 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样  
基材与增材结合部分组织形貌图（图 A 为 50X，图 B 为 100X）

在熔池底部的熔合线上出现平面晶，因为在增材开始的时结晶初期，基体表面温度很低，激光在熔覆时温度很高，在极大的温差作用下导致结晶速度小，但是温度较高，当温度梯度  $G$  很大而晶速率  $R$  很小时，依据快速凝固理论， $G/\sqrt{R}$  的比值趋向于无穷大，达到了非均匀形核的过冷度，粉末在熔融后接触基体，在熔合线附近形成了平面晶层，而在凝固过程中，激光的能量使基体温度升高导致温差缩小，温度梯度变小，结晶速率升高使熔池的过冷度向逐步减小的方向发展， $G/\sqrt{R}$  的比值也逐渐减小，同时因 Fe313 中含有多种元素成分，其不同合金元素成分的熔点不相同，熔点较高的溶质元素先由液相凝固为固相，而熔点较低的溶质元素依旧处在固液相界面，成分过冷增加，从而导致出现平面晶向柱状树枝晶进行过渡的情况出现如图 5-7 所示，出现的树枝晶较为粗大呈现为柱状且垂直于熔合线方向生长，在枝晶间出现共晶组织。

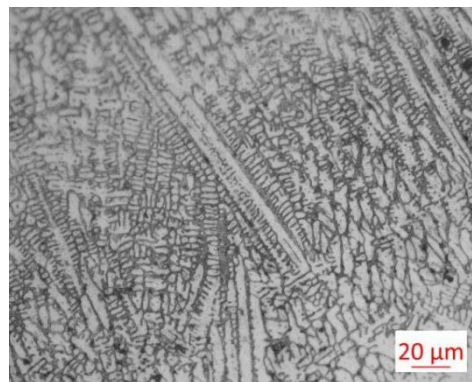


图 5-7 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样  
底部柱状晶组织形貌图（放大倍数为 500X）

随着增材的高度增加，固液界面向上推进，其内部的热积累量逐渐增加，温度梯度逐渐减小，结晶区前沿的溶质变化增强，结晶速度逐渐增大，过冷度逐渐减小，出现柱状的树枝晶逐渐转变为树枝状的树枝晶的情况，并且在层与层之间出现了较为明显的熔合线，在层与层之间的逐渐堆积的过程中，内部的热积累量也在逐渐堆加，随

着热量的积累逐渐增加，其内部的热量难以散去，热量由内向外传导，从而导致以增材中轴线为基准从底部向顶部枝晶逐渐变短变粗，同时组织也逐渐变得粗大如图 5-8。

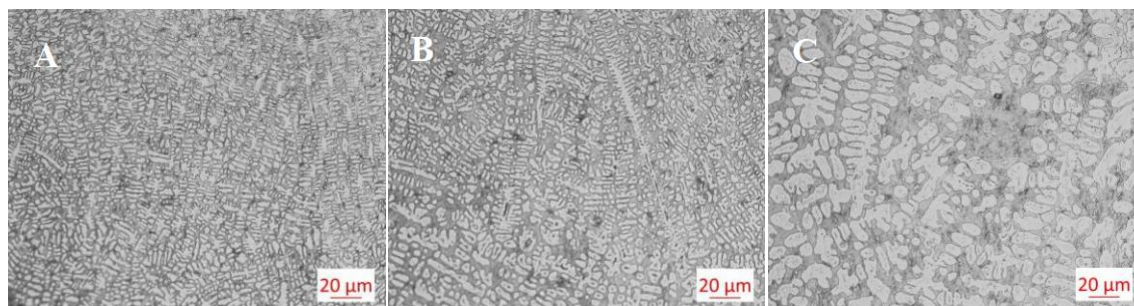


图 5-8 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样

不同位置组织形貌对比图（A 为第 1 层 500X，B 为第 8 层部分 500X，C 为 16 层 500X）

一次枝晶长宽比是表征枝晶形态尺寸的一种参量，一次枝晶长宽比的数值计算比较对组织分析起到一定的定量作用，对不同激光功率的增材试样一次枝晶长宽比的计算比较如表 5-4、图 5-9 所示，从图表中可以清晰地看出顶层的一次枝晶长宽比的比值要远低于底层的一次枝晶长宽比的比值，而激光功率越高的工艺形成的组织一次枝晶长宽比也越低。激光工艺为激光功率 1400W 送粉量 3rad/min 线扫描速度 6mm/s 的增材试样一次枝晶臂长宽比的比值整体最高，其第 1 层的一次枝晶臂长宽比高达 17.71，组织形态较为细长。

表 5-4 激光功率单变量实验激光增材试样枝晶臂长宽比数据计算结果

编号	功率 (W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	1 层枝晶臂长宽比	8 层枝晶臂长宽比	16 层枝晶臂长宽比
1	1400	3	6	17.71	10.73	5.32
2	1500	3	6	16.56	9.83	5.23
3	1600	3	6	15.43	8.77	5.17
4	1700	3	6	14.72	8.56	5.02
5	1800	3	6	14.64	7.98	4.73

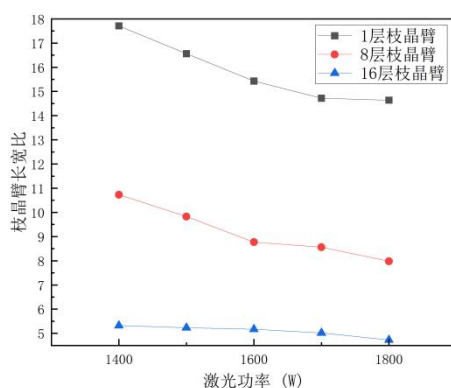


图 5-9 激光功率单变量实验枝晶臂长宽比数据分析图

对不同送粉量的增材试样一次枝晶长宽比的计算比较如表 5-5、图 5-10 所示，从图中可以看出送粉量越高的工艺形成的组织一次枝晶长宽比也越高，但通过与激光功率工艺组的数值对比发现，送分量实验组的一次枝晶臂长宽比变化并没有激光功率变化的剧烈，这说明相比于激光功率，送粉量的变化对于枝晶形态尺寸的影响并没有那么剧烈。激光工艺为激光功率 1700W 送粉量 3.5rad/min 线扫描速度 6mm/s 的增材试样一次枝晶臂长宽比的比值整体最高，其第 1 层的一次枝晶臂长宽比仅为 15.32。

表 5-5 送粉量单变量实验激光增材试样枝晶臂长宽比数据计算结果

编号	功率 (W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	1 层枝晶臂长宽比	8 层枝晶臂长宽比	16 层枝晶臂长宽比
6	1700	1.5	6	13.22	7.64	4.52
7	1700	2	6	14.12	7.92	4.63
8	1700	2.5	6	15.22	8.33	4.86
4	1700	3	6	14.72	8.56	5.02
9	1700	3.5	6	15.32	8.73	5.22

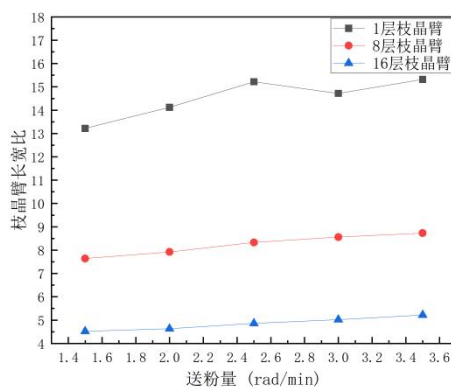


图 5-10 送粉量单变量实验枝晶臂长宽比数据分析图

对不同线扫描速度的增材试样一次枝晶长宽比的计算比较如表 5-6、图 5-11 所示，线扫描速度对一次枝晶长宽比的影响与激光功率呈相反的趋势，这是因为随着线扫描速度的降低，增材部分单位面积接受激光能量的时间变长，能量吸收增多，与提高激光功率起到的作用相似且组织变化同样变化剧烈。激光工艺为激光功率 1700W 送粉量 3rad/min 线扫描速度 8mm/s 的增材试样一次枝晶臂长宽比的比值整体最高，其第 1 层的一次枝晶臂长宽比可达 18.56。

表 5-6 线扫描速度单变量实验激光增材试样枝晶臂长宽比数据计算结果

编号	功率 (W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	1 层枝晶臂长宽比	8 层枝晶臂长宽比	16 层枝晶臂长宽比
10	1700	3	4	14.13	7.53	4.72
11	1700	3	5	16.33	8.34	4.94
4	1700	3	6	14.72	8.56	5.02
12	1700	3	7	17.64	9.22	5.21
13	1700	3	8	18.56	10.87	5.44

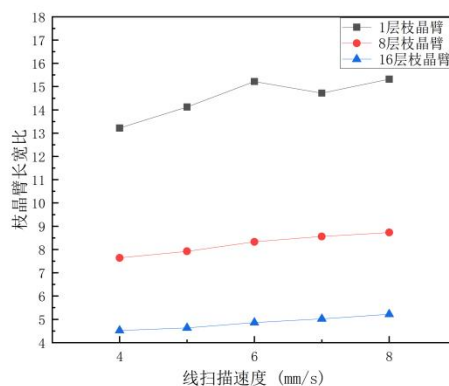


图 5-11 线扫描速度单变量实验枝晶臂长宽比数据分析图

增材过程中热量逐渐积累，靠近表面的部分直接与外界空气接触，热量大量流失，出现冷却速度加快的现象，随着冷却速度的加快，减少了结晶前的溶质富集，形核率急剧上升，从而在表层出现由树枝晶逐渐过渡为等轴晶的现象，如图 5-12、图 5-13 所示，其中枝晶具有很强的方向性，整体呈现出由两边向中上方的指向，这是因为在冷却结晶过程中，表层与外界空气和保护气体相接触，表面温度较低，温度梯度变大，结晶速度变小，而内部因热量囤积，温度梯度小，结晶速度较快，枝晶向着中上方向生长，方向十分明显。

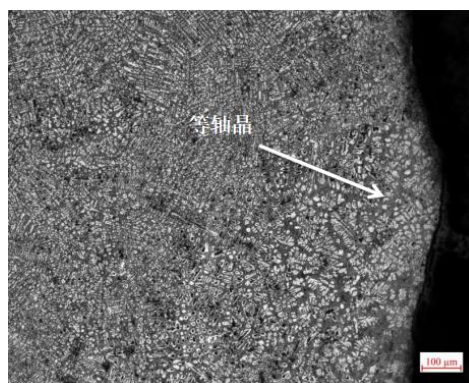


图 5-12 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样  
增材侧表面组织形貌图（放大倍数为 200X）

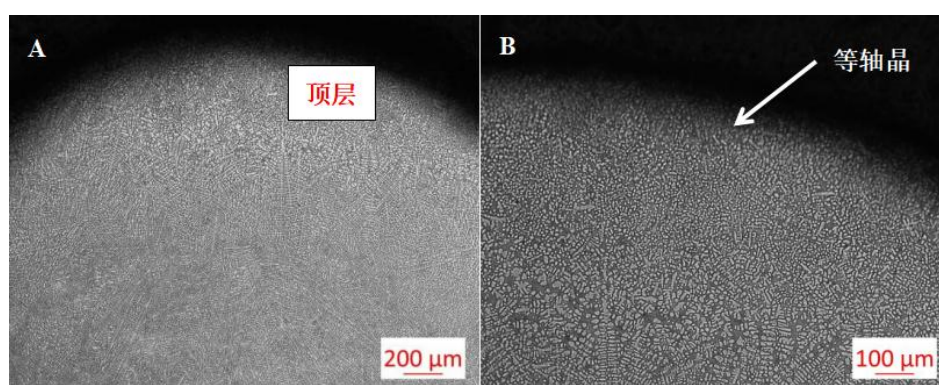


图 5-13 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样  
增材顶部组织形貌图（A 为 50X，B 为 100X）

在每层的熔合线附近树枝晶相较于每层中间部分的树枝晶形态更加粗大，其原因在于每层堆积时都会对上一层进行回火，所以在熔合线附近的组织会比同层的其他组织粗大一些，同时在激光增材的过程中层与层之间出现了明显的重熔现象，在每层堆积的过程中，上一层的部分已凝固的增材组织与新一层的金属粉末一起转变为液相，重熔部分的材料依然为 Fe313，所以组织组成并未发生明显的变化，只有在熔合线上的一些晶粒出现了平面生长的趋势。随着增材过程的进行，热量逐渐积累，这种温度差异越来越小，如图 5-13 所示顶层（15、16）层并未出现如图 5-14 所示明显的熔合线。

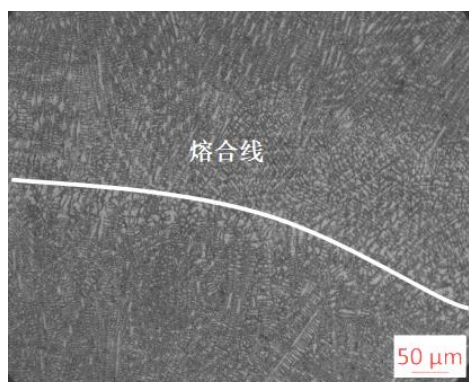


图 5-14 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样  
3 层与 4 层层间熔合线组织形貌图（放大倍数为 200X）

图 5-15 为增材区域第 1 层与 16 层对比图，如图所示在增材开始阶段组织主要为枝状的树枝晶和纤维状的共晶组织，结合党苏武在野外环境下进行的激光增材 Fe314 的组织分析<sup>[13]</sup>得出，因为 Fe313 粉末成分中包含了 1% 的 B 元素，而在冷却凝固过程中，B 在铁中的溶解度很小，随着 B 等元素的出现使液相出现结构起伏，B 元素在固液两相界面富集，抑制其余元素向液相聚集，并阻碍晶粒生长，使得液相成分很快地发生成分过冷，为共晶转变创造了成分起伏条件，从而发生共晶反应，形成共晶组织。随着增材过程推进，共晶组织逐渐由纤维状转变为层片状，发生这种现象的原因可能是随着激光增材的进行，形成的树枝晶的一次枝晶间距逐渐增大，共晶部分有了更大的生长空间，增材层的堆积造成热量堆积，其冷却速度变慢，共晶组织由纤维状逐渐转变为层片状。

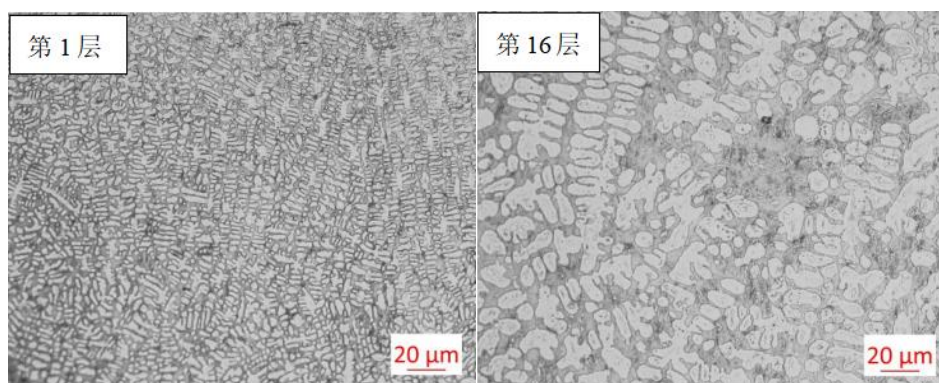


图 5-15 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺激光增材试样  
第 1 层与第 16 层组织形貌对比图（放大倍数为 500X）

依据国标 GB/T14999.7-2010《高温合金铸件晶粒度、一次枝晶间距和显微疏松测定方法》对不同工艺成型下的激光增材 Fe313 试样进行一次枝晶平均间距的测定，实验照片均选取 500 倍的金相照片进行分析计算，分别取增材底层组织（第 1 层、第 2 层树枝晶部分）、增材中层组织（第 8 层、第 9 层组织）以及顶层组织（第 15 层、第 16 层组织）进行对比。如表 5-7

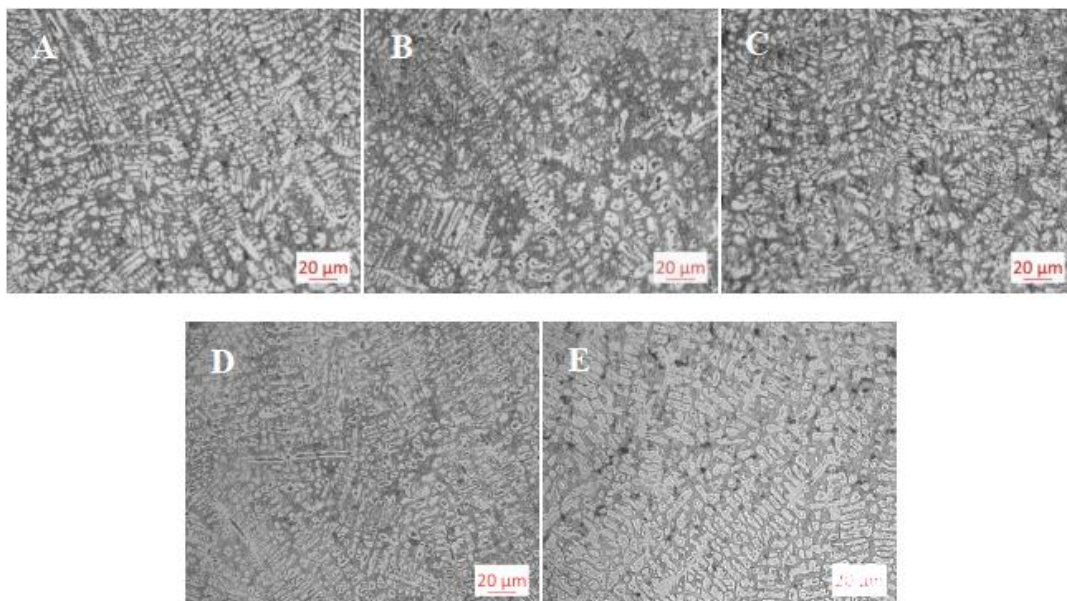


图 5-19 激光功率单变量实验激光增材试样第八层增材显微组织形貌对比图  
(A~E 为 1400~1800W 工艺变化, 放大倍数为 500X)

表 5-7 激光功率单变量实验激光增材试样一次枝晶间距计算结果

编号	功率 (W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	1、2 层平均 间距 (mm)	8、9 层平均 间距 (mm)	15、16 层平均 间距 (mm)
1	1400	3	6	0.0102	0.0207	0.0296
2	1500	3	6	0.0114	0.0223	0.0342
3	1600	3	6	0.0126	0.0243	0.0349
4	1700	3	6	0.0130	0.0255	0.0356
5	1800	3	6	0.0147	0.0263	0.0398

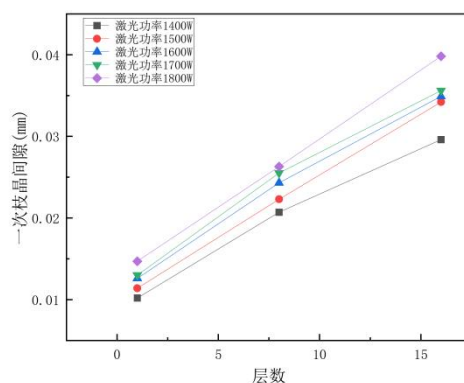


图 5-16 激光功率单变量实验激光增材试样一次枝晶间隙结果分析图

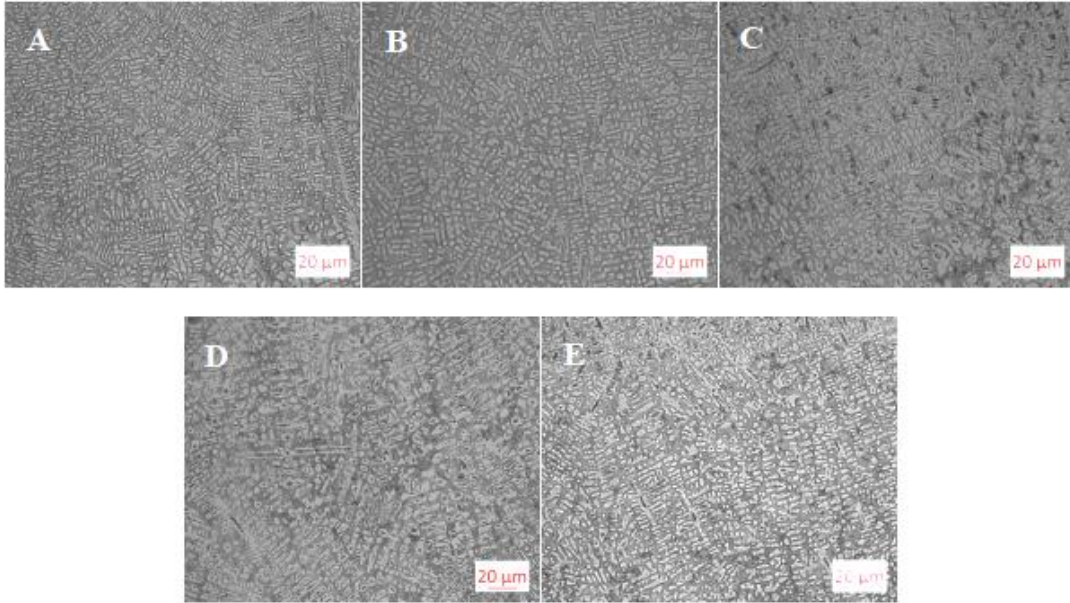


图 5-20 送粉量单变量实验激光增材试样第八层增材显微组织形貌对比图  
(A~E 为 1.5~3.5rad/min 工艺变化, 放大倍数为 500X)

表 5-8 送粉量单变量实验激光增材试样一次枝晶间距计算结果

编号	功率 (W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	1、2 层平均 间距 (mm)	8、9 间层平均 间距 (mm)	15、16 层平均 间距 (mm)
6	1700	1.5	6	0.0149	0.0269	0.0403
7	1700	2	6	0.0144	0.0262	0.0392
8	1700	2.5	6	0.0132	0.0256	0.0366
4	1700	3	6	0.0130	0.0255	0.0356
9	1700	3.5	6	0.0128	0.0255	0.0351

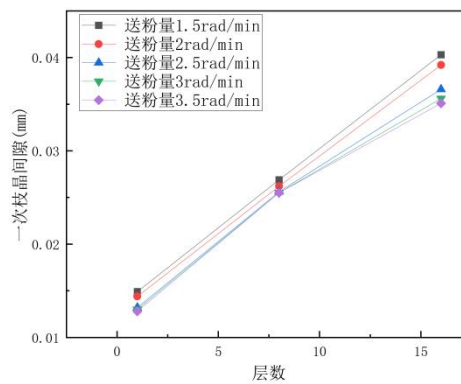


图 5-17 送粉量单变量实验激光增材试样一次枝晶间隙结果分析图

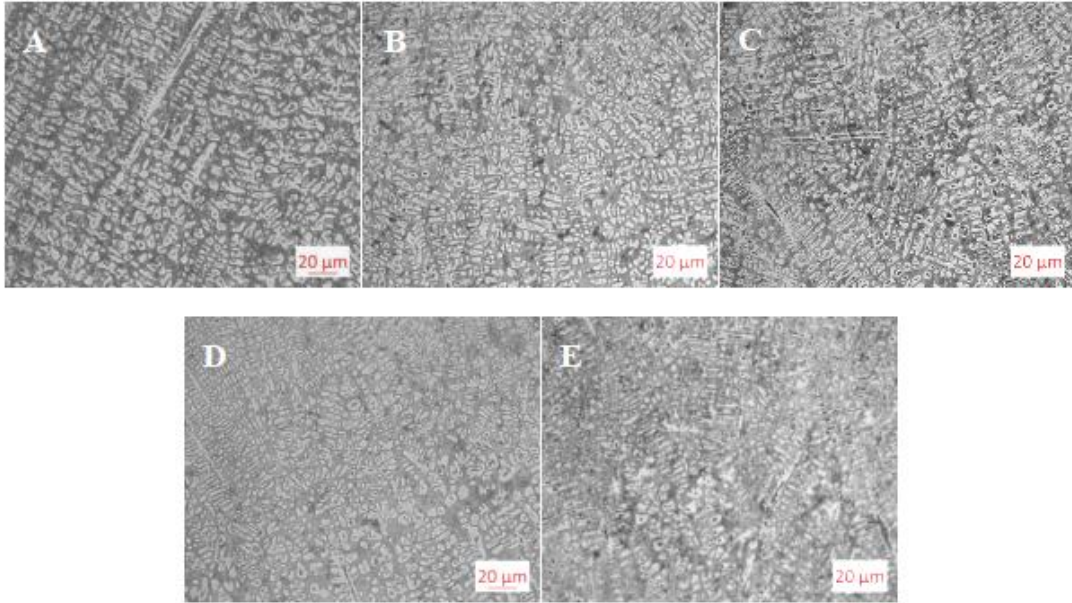


图 5-21 线扫描速度单变量实验激光增材试样第八层增材显微组织形貌对比图  
(A~E 为 4~8mm/s 工艺变化, 放大倍数为 500X)

表 5-9 线扫描速度单变量实验激光增材试样一次枝晶间距计算结果

编号	功率(W)	送粉量 (rad/min)	扫描速度 (mm/s)	1、2 层平均 间距 (mm)	8、9 间层平均 间距 (mm)	15、16 层平均 间距 (mm)
10	1700	3	4	0.0152	0.0273	0.0412
11	1700	3	5	0.0131	0.0263	0.0372
4	1700	3	6	0.0130	0.0255	0.0356
12	1700	3	7	0.0128	0.0253	0.0344
13	1700	3	8	0.0104	0.0216	0.0324

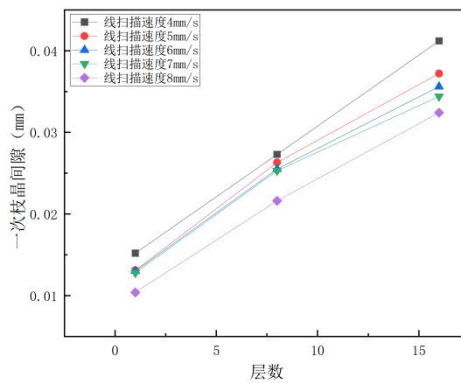


图 5-18 线扫描速度单变量实验激光增材试样一次枝晶间隙结果分析图

结合以上数据分析可以明显看出一次枝晶的平均间距受激光功率和线扫描速度影响较大，随着激光功率的提高和线扫描速度的降低一次枝晶的平均间距逐渐变大，增材部分的树枝晶一次枝更加粗大如图 5-19、图 5-20 所示，初步分析由于激光功率逐渐升高或线扫描速度的逐渐下降，单位面积接收的能量更多，能量散失较慢，增材内部热量升高，最终使组织粗大；而送粉量单变量实验在送粉量为 1.5rad/min 和 2rad/min 时一次枝晶间距的变化相比于其他三组实验组更加急剧，而送粉量在 2.5~3.5rad/min 之间时一次枝晶间距并无太大变化，如图 5-21 所示，由此分析可能是因为送粉量过低导致金属粉末在充分溶解成液体之后仍有能量溢出，而层与层之间反复熔融堆积使晶粒向过热方向发展导致这种情况的发生。

## 5.2.2 物相分析

图 5-22 为 Fe313 激光增材试样 XRD 分析图，通过 XRD 结果和 Jade 标准卡对比可知 Fe313 激光增材得到的相主要为体心立方结构的 Fe-Cr 固溶体、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ ，结合时运，胡荣祥等人通过外加磁场对等离子熔覆 Fe313 合金涂层进行的实验所得的 EDS 分析<sup>[10]</sup>以及党苏武对 Fe314 激光增材的组织 and 性能研究所得到的结论<sup>[13]</sup>类比得出，Fe313 粉末激光增材工艺所得到的组织中其中树枝晶部分主要为 Fe-Cr 的过饱和固溶体，在凝固过程中，液相温度降低，液相中所包含的成分达到过饱和、过冷却阶段，固液界面为非均匀形核有效地降低了表面能成核时的位垒，在固液界面晶核形成长大，由分析 EDS 结果<sup>[10]</sup>出现含大量 Cr 元素的 Fe-Cr-C 固溶体，因不同方向的散热不同，晶核向着适于散热的方向生长，使树枝晶优先形成，随着温度的降低固溶体中不断有第二相析出，结合 Fe313 熔覆层无外加电流的 EDS 结果分析 Fe 和 Cr 的原子数之和与 C 原子之比为 7: 3，故形成了较为复杂的 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  共晶碳化物，与铁素体相形成共晶组织，XRD 所得出的  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  可能也存在其中，如图 5-24 所示。在凝固过程中 B 元素难溶于铁水，B 元素在固液两相界面富集，在固溶体析出第二相后，与 Fe 原子和 Cr 原子发生反应形成脆性强化相 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$  不均匀分布在共晶组织当中<sup>[13]</sup>。

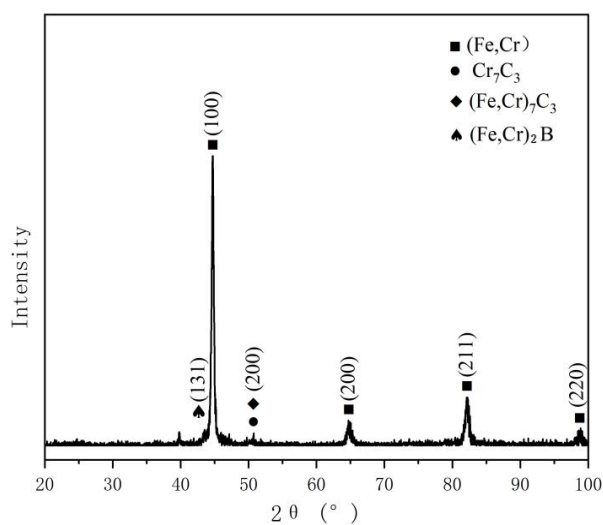


图 5-22 Fe313 激光增材试样 XRD 图谱分析结果

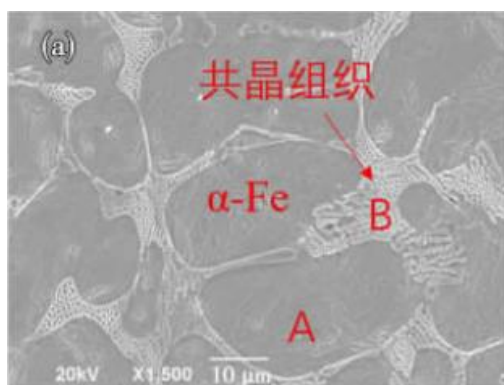


图 5-23 Fe313 熔覆层无外加电流 SEM 组织形貌图<sup>[10]</sup>

表 5-10 Fe313 熔覆层无外加电流 EDS 结果<sup>[10]</sup>

元素	C		O		Si		Cr		Fe	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
A	4.80	18.87	0	0	0	0	8.95	8.13	86.26	73.00
B	6.87	25.09	0	0	1.24	1.93	12.91	10.09	78.99	62.08

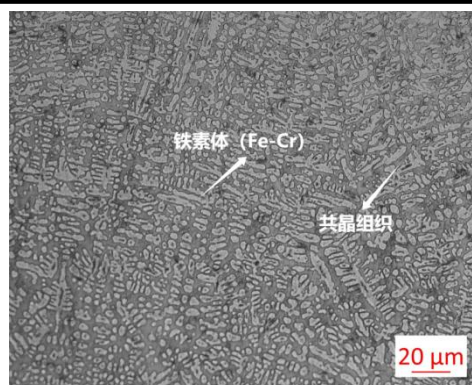


图 5-24 激光功率 1700W 线扫描速度 6mm/s 送粉量 3rad/min 工艺 Fe313 激光增材试样

## 增材第 8 层组织形貌照片

## 5.2.3 增材试样显微硬度分析

依据 GB/T 4340.1-2009《金属材料维氏硬度试验第 1 部分：试验方法》的显微硬度检测标准，采用 100gf 的载荷每距离 2mm 进行一次显微硬度测试，不同激光功率的显微硬度测试结果如图 5-25 所示，由图可知，随着增材过程的层层叠加，其显微硬度除第一个点外按照增材的先后顺序大体呈现逐步下降的趋势，第一个点的显微硬度打在基体熔合线上，Fe313 粉末与较软的 Q235 基体结合，从而导致硬度低于其他部分。结合表 5-3 的结果以及 5.2.1 的分析，其原因在层与层的逐渐堆积的过程中，内部的热积累量也在逐渐堆加，随着热量的积累逐渐增加，其内部的热量难以散去，热量由内向外传导，从而导致组织按照先后凝固的顺序逐渐变粗，最终硬度体现为递减的趋势。在不同激光功率的作用下其显微硬度呈现的总体变化趋势基本相同，功率为 1400W、1500W、1600W、1700W、1800W 的平均显微硬度分别为 624HV、612HV、604HV、603HV、588HV 如图 5-26 所示，随着激光功率的升高，其对应增材的平均显微硬度逐渐降低，激光功率较低时，热输入量较低，增材内部的热量与高功率相比较低，在每层凝固的过程当中，较低的热量使凝固速度加快，冷度较低，晶粒细化，使硬度升高，随着不同实验组的功率升高，在增材过程中粉末和底层所吸收的能量较多，热量较高，凝固速度较慢，晶粒长大，使平均硬度降低。

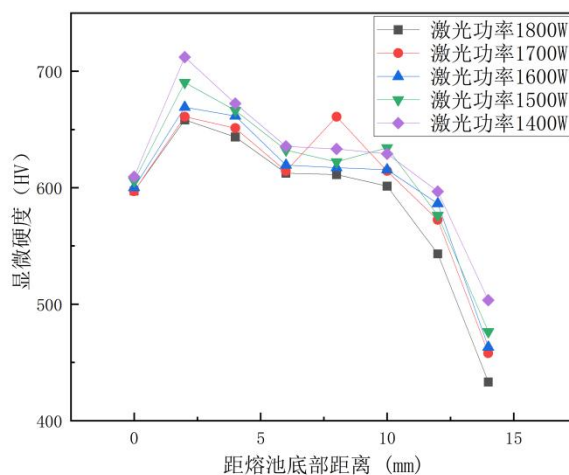


图 5-25 激光功率单变量实验激光增材试样显微硬度结果

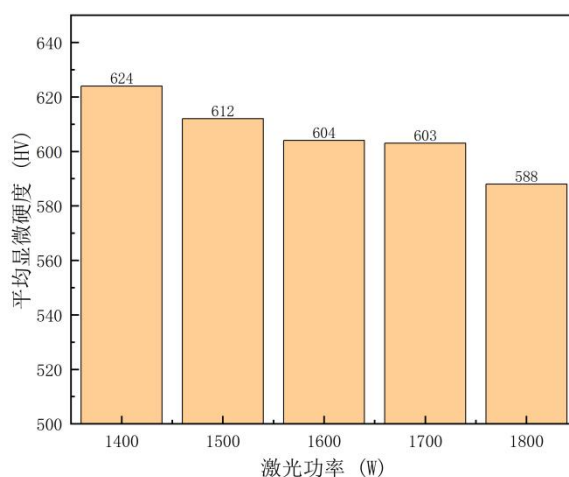


图 5-26 激光功率单变量实验激光增材试样平均显微硬度

不同送粉量的显微硬度测试结果如图 5-27 所示，送粉量为 1.5rad/min、2rad/min、2.5rad/min、3rad/min、3.5rad/min 的平均显微硬度分别为 560HV、565HV、590HV、603HV、607HV 如图 5-28 所示，随着送粉量的增加，其对应增材的显微硬度逐渐升高，送粉量较高时，激光的能量不变每层熔融的粉末较多，使每层重复吸收的能量较少，热输入量较低，增材内部的热量因其每层重复吸收的能量差异，在每层凝固的过程当中，较低的热量使凝固速度加快，过冷度较低，晶粒细化，使硬度升高，随着送粉量的减小，在增材过程中粉末和每层重复吸收的能量较多，凝固速度较慢，晶粒长大，使平均硬度降低。

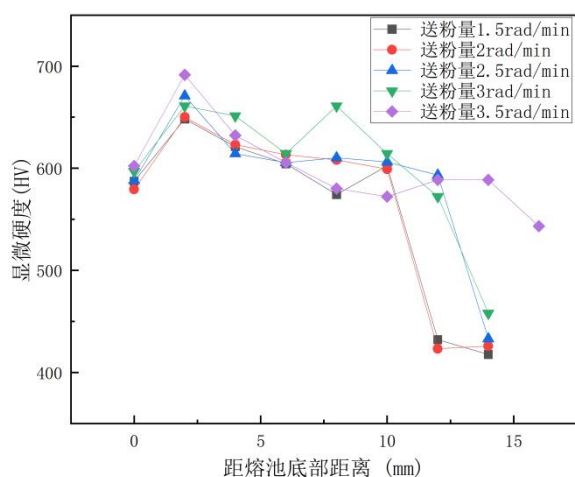


图 5-27 送粉量单变量实验激光增材试样显微硬度结果

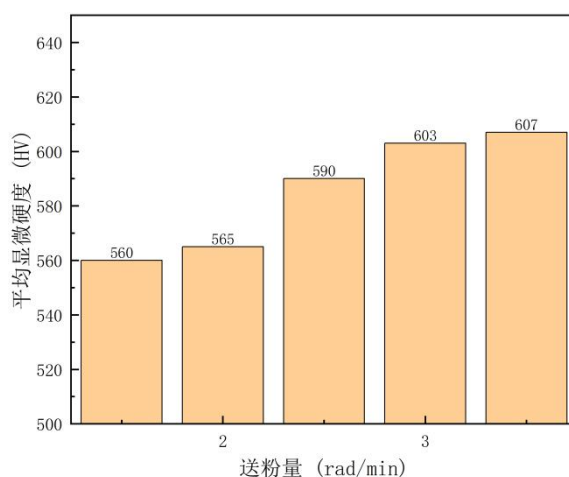


图 5-28 送粉量单变量实验激光增材试样平均显微硬度

不同扫描速度的显微硬度测试结果如图 5-29 所示，线扫描速度为 4mm/s、5mm/s、6mm/s、7mm/s、8mm/s 的平均显微硬度分别为 572HV、576HV、603HV、625HV、543HV 如图 5-30 所示，随着线扫描速度的加快，其对应增材的显微硬度逐渐升高，但通过比较可以清楚地发现，当线扫描速度为 8mm/s 时显微硬度较其他工艺而言明显较低，且下降速度较快，结合宏观数据分析原因可能是当线扫描速度为 8mm/s 时激光增材的高度最低，为 14.8mm，相较于其他组实验显微硬度所打的点处于更高的层数，其次在进行显微硬度测量时，线扫描速度为 8mm/s 的硬度都打在熔合线附近，其组织较为粗大，导致硬度偏低，除 8mm/s 的工艺外，扫描速度较高时，材料与粉末在单位面积上吸收的能量较低，热输入量较低，增材内部的热量少，在每层凝固的过程当中，较低的热量使凝固速度加快，冷度较低，晶粒细化，使硬度升高，随着不同实验组的线扫描速度的减小，在增材过程中粉末和每层重复吸收的能量较多，凝固速度较慢，晶粒长大，使平均硬度降低。

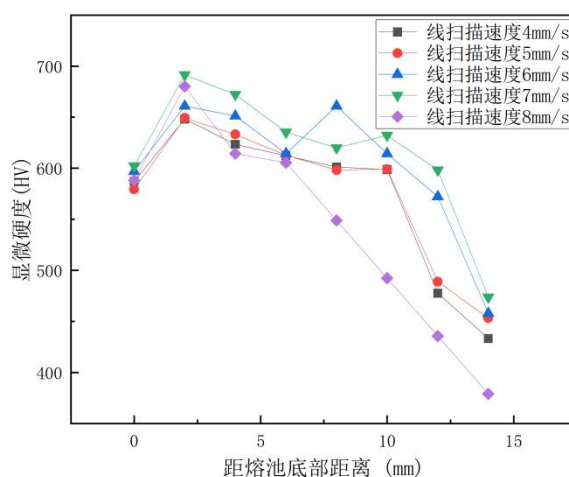


图 5-29 线扫描速度单变量实验激光增材试样显微硬度结果

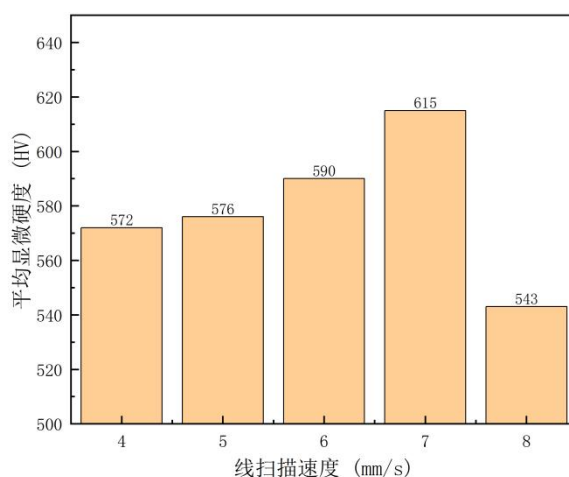


图 5-30 线扫描速度单变量实验激光增材试样平均显微硬度

综合以上数据分析可以得出不同的激光功率、送粉量、线扫描速度对激光增材的显微硬度均有影响，激光功率越低、送粉量越高、线扫描速度越快其对应的显微硬度越高，试样沿增材方向硬度呈下降趋势，所有试样的整体平均硬度为 589.9HV，其中工艺为激光功率 1700W 线扫描速度为 7mm/s 送粉量 3rad/min 的试样硬度最高，硬度最高点为 691.6HV；除去先扫描速度为 8mm/s 的试样后四点硬度均打在重熔区域以外，平均显微硬度最低的工艺为激光功率 1700W 线扫描速度为 6mm/送粉量 1.5rad/min，硬度最低点为 417.2HV。

## 第六章 结论

本课题通过利用铁基合金粉末 Fe313 在 Q235 基板上的不同激光工艺的增材样品来研究 Fe313 铁基合金粉末激光增材组织及性能，进行不同的功率、线扫描速度、送粉量三种工艺参数对激光增材铁基合金 Fe313 的显微组织和显微的影响的分析，得到的主要结论如下：

1. 在激光功率、线扫描速度和送粉量三个参数中，送粉量对于增材的高度宽度影响最大，在实际生产中在保证一定成型精度和性能的条件下较高较宽的成型参数有益于生产效率的提高，其次激光功率和线扫描速度的变化也对增材的高度和厚度有一定程度上的影响，激光功率越高其单位面积的热积累量越高，这就使更多的粉末融化。

2. 激光增材制备 Fe313 的组织形态大多以树枝晶、等轴晶和共晶组织为主，通过 XRD 结果和其他学术研究分析得出 Fe313 粉末激光增材工艺所得到的组织中其中树枝晶部分主要为 Fe-Cr 的过饱和固溶体，共晶组织部分为  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$  与铁素体相的纤维状机械混合物，随着热量的积累逐渐形成层片状。

3. 激光增材制备 Fe313 的组织在成分偏析和温度影响的双重作用下，沿增材方向组织呈现逐渐粗大的趋势，熔合线附近的组织对比同层其他部分较粗大，一次枝晶的平均间距受激光功率和线扫描速度影响较大，随着激光功率的提高和线扫描速度的降低一次枝晶的平均间距逐渐变大，增材部分的树枝晶一次枝更加粗大，送粉量单变量实验在送粉量为 1.5rad/min 和 2rad/min 时一次枝晶间距的变化相比于其他三组实验组更加急剧，而送粉量在 2.5~3.5rad/min 之间时一次枝晶间距并无太大变化。

4. 不同工艺所制备的 Fe313 在成型结合良好的情况之下，激光功率由低到高、线扫描速度由快到慢、送粉量由多到少的工艺都会使激光增材制备 Fe313 的组织呈现由细到粗的趋势，硬度值受激光工艺影响较大，硬度随着不同激光工艺形成的组织的粗细而变化，整体硬度沿增材方向整体呈现下降趋势，熔合线部分硬度对比其他部分而言较低。其中工艺为激光功率 1700W 线扫描速度为 7mm/s 送粉量 3rad/min 的试样硬度最高，硬度最高点为 691.6HV；除去先扫描速度为 8mm/s 的试样后四点硬度均打在重熔区域以外，平均显微硬度最低的工艺为激光功率 1700W 线扫描速度为 6mm/s 送粉量 1.5rad/min，硬度最低点为 417.2HV。所以综合考虑，在追求较高的平均硬度的情况下激光功率 1700W 线扫描速度为 7mm/s 送粉量 3rad/min 的工艺参数最为合适。

## 参考文献

- [1] 张楚琦,于宏飞,叶志鹏等.增材制造技术在船舶领域的应用及技术现状研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2023,41(01):90-94.
- [2] 柴媛欣,邢飞,李殿起等.金属材料激光增材制造路径规划研究现状与展望[J/OL].材料导报:1-14[2023-05-07].
- [3] 陈放,王文宇,杨冠军等.激光增材再制造工艺规划及性能提升研究进展[J/OL].热加工工艺:1-6[2023-05-07]
- [4] 张林浩. 304 不锈钢表面激光熔覆铁基中熵合金涂层组织性能研究[D].兰州理工大学,2022.
- [5] 高占勇,王波尧,高文志,呼云飞,唐振虎,段江红,王建平.陶瓷颗粒增强铁基表面复合材料的研究进展与展望[J].铸造技术,2023,44(01):68-74.
- [6] 王跃明,侯伟鹏,解路,李晨龙,韩旭航,黄杰,邓鹏飞,颜建辉.激光熔覆制备 Fe 基合金涂层的微观结构与力学性能[J].润滑与密封,2022,47(11):96-105.
- [7] 王义赛. 16Mn 钢表面激光熔覆铁基合金涂层强化试验研究[D].中国矿业大学,2022.
- [8] 冯凯,郭彦兵,冯育磊,姚成武,朱彦彦,张群莉,李铸国.激光熔覆高强韧铁基涂层精细组织调控与性能研究[J].金属学报,2022,58(04):513-528.
- [9] 孙晓辉.激光熔覆技术在零件修复上的应用[J].机械工人(热加工),2003(11):30-31.
- [10] 时运,胡荣祥,马骏等.外加磁场对等离子熔覆 Fe313 合金涂层组织性能的影响[J].材料导报,2020,34(24):24127-24131
- [11] 高万东,胡孔友,张学军等.等离子熔覆 WC 颗粒增强 Fe313 涂层组织和性能研究[J].热加工工艺,2022,51(14):78-82.
- [12] 杨林. 基于激光熔覆技术的直线导轨再制造工艺基础研究[D].东北大学,2019.
- [13] 党苏武. 野外环境下 Fe314 集约化激光增材修复工艺研究[D].西安科技大学,2021.
- [14] 高跃岗,姚秀荣,刘兆晶等.国外铁基复合材料的发展及应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2006(04):431-436.
- [15] 白峭峰,欧阳昌耀,赵春江,闫献国,刘映良.激光熔覆 Fe 基合金涂层不同熔覆区域组织与耐磨性能[J].热加工工艺,2022,51(08):94-97.
- [16] 齐勇田,曹润平,栗卓新.激光熔覆铁基合金涂层开裂行为及其产生机制[J].应用激光,2015,35(06):639-642.
- [17] 王乐钊,王成,王伟.激光熔覆 Fe 基涂层的耐蚀性能研究[J].特种铸造及有色合金,2022,42(09):1163-1170.
- [18] 徐一飞,孙耀宁,王国建,贵永亮.高速激光熔覆铁基合金涂层的组织及性能研究[J].中国激光,2021,48(10):222-230.

- [19]徐勤官,曲仕尧.铁基合金激光熔覆层的组织与性能研究[J].金属加工(热加工),2022(10):20-23.
- [20]D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *Int. Mater. Rev.* 57 (2012) 133 – 164.
- [21]M. Zhong, W. Liu, Laser surface cladding: the state of the art and challenges, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 224 (2010) 1041 – 1060.
- [22]X. Lei, C. Huajun, L. Hailong, Z. Yubo, Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*[J]. 90 (2017) 1383 – 1392.
- [23]Tianbiao Yu, Lin Yang, Yu Zhao, Jiayu Sun, Baichun Li. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313[J]. *Optics and Laser Technology*,108(2018),43-66.
- [24]王永霞,丁国华,梁莉蒙.送粉速率对铁基合金激光熔覆层组织形貌的影响[J].应用激光,2022,42(12):38-44.
- [25]李百奇. 等离子熔覆原位 VC 颗粒增强铁基复合材料覆层的研究[D].郑州大学,2021.
- [26]李文博. 激光熔覆制备铁基非晶复合涂层的组织演变与性能调控研究[D].福建农林大学,2020.
- [27]杨振,柳宁,樊湘芳,李勇,邱长军.2Cr12NiMoWV 钢表面激光熔覆铁基合金组织及力学性能研究 [J].应用激光,2020,40(01):22-28.
- [28]祁琦,柴蓉霞,张汉杰,张丽苹.转速对激光熔覆铁基合金耐磨性的影响[J].应用激光,2020,40(01):50-55.
- [29]刘旭波,操顺森,李学文,赖志慧,熊瑞亮,赵丽.3D 激光熔覆铁基合金温度场模拟及其试验[J].材料科学与工程学报,2020,38(03):439-444.
- [30]Andreiev Anatolii,Hoyer Kay-Peter,Hengsbach Florian,Haase Michael,Tasche Lennart,Duschik Kristina,Schaper Mirko. Powder bed fusion of soft-magnetic iron-based alloys with high silicon content[J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 317(2023), 322-345.
- [31]Lai Youbin,Yue Wenwen,Zhang Yichuan. Effect of ultrasonic vibration on residual stress in plasma cladding of iron-based alloy[J]. *Frontiers in Materials*, 77(2023), 1030-1037.
- [32]Qiu Siyi,Liu Hui,Jiang Menglei,Min Shiling,Gu Yanlin,Wang Qingyan,Yang Jing,Li Xuejun,Chen Zhuoer,Hou Juan. A Brief Review on He Ion Irradiation Research of Steel and Iron-Based Alloys in Nuclear Power Plants[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 36(4): 56-73.

## 致 谢

大学的最后一项任务毕业设计终于迎来了落幕，四年来在学校每个奋斗的日日夜夜都记在心里，感谢天津中德应用技术大学给了我这四年如同珍宝般的体验，这四年来学会了很多，不过在大学时光里更多的还是养成了一个良好的习惯，当我们步入社会五年或许十年以后，我们在学校学到的知识可能早就抛之脑后，没有几个人会记得多少，甚至很多从事非本专业工作的人一点都不会记得，但是在大学宝贵的四年里，我们除了课本上学到的知识，学到更多的是如何面对生活、学习和工作。当我们面对一些事情时如何坦然面对，如何以良好的心态面对繁重的工作，当遇到挫折坎坷的时候我们应该如何去面对。

身为一个即将毕业的大四学生，我觉得我从这四年来学到最多的就是当面对一条条繁杂沉重的任务时，我已经不像刚入学那时的疲于应对，害怕沉重的任务量我是否能完成，更多的我会去想我能做什么、现在我应该去做什么并且付诸行动。大学这四年来过得很累，总会有这样那样的事情出现，但我很庆幸我拥有这份经历，这种磨练让现在的我可以用坦然的心态面对生活与工作。现在的我马上就要步入社会，在未来我的道路绝不会那么理想的一帆风顺，但是我觉得通过这四年的经历，无论未来多么挫折、多么坎坷，我都能等到雨过天晴的时刻。

在这大学四年之中，我首先要感谢伴随了我们 19 金属一班四年的班主任——耿可屏老师，在您的庇护下我们拥有了充实的四年，带着我们全班 30 来号人踏上这四年的旅途想必您一定很累吧，我们从刚来学校什么都不懂到现在即将步入社会，您在生活上和学习上都全程关注着我们，对我们的生活望闻问切，我仍然记得每次生病都能收到老师的问候。大家都是人，每个人都有自己的生活，您生活上也一定有自己的事情，也会有自己的难处，带着我们您也一定顶着很大的压力，但您是位好老师，和您相处我们并未感受到您在生活上的疲乏，更多的我们感受到了您对待工作认真乐观的态度，同时作为毕业设计的指导教师，您对待我们的实验严谨认真，授人以鱼不如授人以渔，在我们遇到解决不了的问题时，您都会想各种办法引导我们去寻找解决问题的办法，在毕设期间多次在深夜麻烦您批改论文进行实验指导，大学四年我觉得在金属材料专业相关的方面，最令我难忘的就是大三上激光加工技术这门课的时候，在这门课上我们从激光淬火的工艺加工到显微硬度的测量，再到金相组织分析都为我这篇论文打下了良好的基础，我觉得我们整个 19 金属一班都从这门课上学到了很多，四年过来零零散散跟着您做了很多实验，出现了很多问题，在所有人的努力之下也都解决了，不仅是在这篇论文中在我的人生中也不乏有很多您批改的痕迹，就像原本满是问题的论文

在您的不断打磨批改之下逐渐成形，结论更加精确，人生的方向也更加光明。同时感谢高忠林老师对我毕业论文的指导。

我很庆幸选择了天津中德应用技术大学金属材料工程专业，来到学校以后我遇到的每个老师都超级好，感谢董纪老师、孙伟老师、张慧星老师、胡晓丽老师、王丽老师、宫子琪老师、赵峰老师、田春英老师、高智芳老师、王传财老师、冯光勇老师，感谢各位老师对我四年以来对我的培养与包容，各位老师严谨认真的态度时时刻刻影响着我，在过往的四年跟着各位老师做实验做项目的过程中让我学会很多，无论是技术、做人还是面对生活的心态都让我受益匪浅，在毕设期间对一些设备的使用和修护更是倾囊相授，对我而言各位老师不仅是教师更像是朋友，总是在我最需要帮助的时候帮助我，谢谢各位老师，人生有幸在这段路程中遇到您们并在人生道路上共走一段，每一份记忆与教诲牢记于心，受益终生。希望各位老师在工作之余也要注意身体健康，祝各位老师合家欢乐、幸福美满。

在这里我特别感谢从大一开始陪伴我四年的社团老师——石路晶老师，感谢您四年来对我生活和学习上的帮助，在社团里发生了很多事，刚来到这里时很多事情我不知道我能不能做好，到了后面换届成为社团负责人，我也不清楚自己能不能像往届学长那样带给这里这么多荣誉，我不知道自己有没有能力担起这份责任，但是幸好有您在身边鼓励我勇于尝试，让我从什么事情都不敢做什么事情都怕做坏，到现在什么事情不试试怎么会知道行不行？在社团我最大的收获就是经过这几年的历练，无论什么事情我都可以有条不紊地完成。我也不再畏惧与人交流，在每一件事情中培养与人沟通的能力。逐渐一年一年过去，一件又一件事情的完成，我也逐渐成长到现在这样，虽然现在的我依旧还有很多不足的地方，但是在您的帮助下我一次次超越自我成为更好的自己。即将毕业，我依旧记得大一时候刚来到社团去参加互联网+比赛，写的材料是相当惨不忍睹，经历了一次又一次改稿交上去的材料也有很多问题，但是您并没有因为这些事情而生气，反而以极其耐心地讲解为我一次又一次改错。到了现在顺利完成毕业论文，在社团的历练不可或缺。在生活上您对我也关怀有加，新冠期间更是每天都能收到您的问候，这令我十分感动，谢谢您。同时也十分感谢在社团工作中认识的谢久明老师、张培老师、毕彦老师、王占辉老师、冯延嫣老师、韩晓方老师，感谢各位老师在过去四年里对我的帮助和支持，社团繁重的工作没有你们在旁边帮助我指导我，我可能很难走到现在，谢谢各位老师。

过去四年除了 19 金属材料工程的同学，还有一群来自不同专业，给予我鼓励和支持，在我失落迷茫时给我力量的朋友们，我们都因为一个相同的原因汇聚在一起，感谢陈卓、张栋瑞、郭琦等 3D 打印及逆向工程社团成员们，谢谢你们这几年的陪伴，希

望同届的兄弟一帆风顺，未来大展宏图，学弟学妹们学业有成、前途无量，愿大家一起将社团发展得越来越好。

感谢各位在我身边陪伴我四年的 19 金属材料一班的同学们以及 H4-164 的兄弟们，谢谢你们让我大学四年的生活如此丰富多彩。感谢已经从中德走向社会的闫晓泉学长、李黎学姐、赵玮学长以及李建伟学长，在过去的几年里没少受到你们的照顾，无论生活上还是学习上都离不开你们的帮助，谢谢你们。最后特别感谢激光毕设组的陈祎迪、于建民、马琳、朱乾瑞、刘金钊、秦鹤宁、柴凯琪、师泽慧、李雨彤、刘宇坤同学以及阮媚欣、张壮、聂洪博等学弟学妹，感谢各位同学在毕业设计过程中对我的陪伴与帮助，日日夜夜的通宵赶稿，每时每刻的交流对接，让我们一起走到了现在，未来我们每个人一定会走得更远。

## 附录

### 中文译文及外文资料

#### 实验研究多影响多参数激光熔覆 Fe313 的优化

##### 摘要

作为一种先进的增材制造技术，激光熔覆已成为美国工业领域的研究热点。材料表面改性与绿色再制造领域。包层的质量直接取决于工艺参数的选择。本文通过以下方式优化了工艺参数相关法。25 组的正交实验选择包层宽度、包层高度和稀释率作为影响目标。等值线图、表面图和信噪比（SNR）的方差分析（ANOVA）响应目标可以得到过程参数对几何特征的影响趋势和大小，结合灰色关系理论，对 3 个响应目标进行变换转化为单个灰色关系等级（GRG）值，对其进行量化以优化工艺参数最大包层宽度，最小包层高度和适当的稀释率。然后进行验证实验，验证响应目标的改进情况。最后，发现 3 个响应目标均按预期改进，优化包层明显在形貌和微观结构上优于其他包层，验证了关系法的可行性。

关键词：激光熔覆；多响应；参数优化；田口法；灰色关系分析

激光熔覆被称为一种表面改性技术，它通过在零件表面添加材料在基表面上形成冶金结合涂层，并且使用高能激光束将粉末融合在一起基板表面的薄层。它已成为热门主题在材料表面改性由于冶金与基材结合，广泛应用于航空航天、汽车工业、石油和化学工业等。

它是最重要和最常见的技术之一实现表面修复再制造，具有突出特点在零件表面修复方面的优势，可以使组件的覆层具有更好的性能，使它更耐磨，耐高温和耐腐蚀电阻。如今，激光熔覆越来越受欢迎技术为再制造提供有效的解决方案的机床零件，可以有效解决能耗高，环境污染严重零件维修率低。基于线性再制造数控机床导轨，不仅避免浪费，而且节省制造成本。

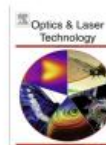
激光熔覆的目的是提高性能基材和包层的质量受以下因素影响直接选择工艺参数。目前，有许多优化工艺参数的方法，例如田口法、响应面法、数学统计学、人工神经网络等。其他学者比较了 316 不锈钢粉末的耐磨性加入相同质量分数的 TiC、WC 和 TiN 粉末后通过气体保护焊，将工艺参数组合为通过信噪比方差分析获得硬度最大化单一响应目标（涂层硬度）。里克尔梅等铝合金基体上的包层复合涂层，以最大化包层宽度和高度，最小化渗透深度，通过信噪比分析发现影响几何特征的工艺参数不同，并且在最大长径比和最小缺陷率的优化条件下，得到最优参数组合，因此，优化单个响应非常容易使用方差分析作为目标，但很难使用田口方法为了优化多目标参数，一些学者通过田口法与灰色关系分析法相结合，实现了多响应、多参数。施等改善了干

铣镁合金的粗糙度和硬度，方差分析用于查找参数在响应目标、灰色相关性分析中起主要作用用于获得最佳铣削工艺以满足目标响应，最优参数实验结果显示表面粗糙度有了相当大的改善和显微硬度。Dhas & Satheesh 使用了 Taguchi-Grey 获得压力容器最佳焊接参数的相关分析方法，参数对压力容器的影响通过 27 个正交试验研究了焊接的几何特性，最佳参数组合为：通过灰色关系等级的响应图获得。Farahmand 等人使用中心复合材料设计（CCD）来设计实验，采用响应面法优化多参数激光熔覆工艺参数和多响应。



Contents lists available at ScienceDirect

## Optics and Laser Technology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/optlastec](http://www.elsevier.com/locate/optlastec)

Full length article

## Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313

Tianbiao Yu <sup>a,b,\*</sup>, Lin Yang <sup>a,b</sup>, Yu Zhao <sup>a,b</sup>, Jiayu Sun <sup>c</sup>, Baichun Li <sup>a,b</sup><sup>a</sup>School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China<sup>b</sup>Liaoning Provincial Key Laboratory of High-end Equipment Intelligent Design and Manufacturing Technology, Shenyang 110819, China<sup>c</sup>Deformation Processing Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 19 March 2018

Received in revised form 8 May 2018

Accepted 14 June 2018

## Keywords:

Laser cladding

Multi-response

Parameter optimization

Taguchi method

Grey relational analysis

## ABSTRACT

As an advanced additive manufacturing technology, laser cladding has become a research hotspot in the field of material surface modification and green remanufacturing. The quality of the cladding layer directly depends on the choice of process parameters. This paper optimized the process parameters by Taguchi-grey correlation method. The orthogonal experiment of 25 groups was designed by Taguchi method, the cladding width, cladding height and dilution rate were selected as the response targets. Contour plot, surface plot and the analysis of variance (ANOVA) for signal to noise ratio (SNR) of the response targets can obtain the influence trend and magnitude of the process parameters on the geometric characteristics, combined with the grey relational theory, three response targets were transformed into single grey relational grade (GRG) value, which was quantified to optimize the process parameters for maximum cladding width, minimum cladding height and proper dilution rate. Then validation experiment was conducted to verify the improvement of the response targets. Finally, it was found that the three response targets were improved as expectation, and the optimized cladding layer has obvious advantages over those of other cladding layers in morphology and microstructure, which verified the feasibility of Taguchi-grey relational method.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Laser cladding is known as a type of surface modification technology, it forms a metallurgical bonding coating on the base surface by adding material to the surface of a part's surface and using high energy laser beam to fuse the powder together with the thin layer of the substrate surface [1–3]. It has become a hot topic in the material surface modification due to the metallurgical combination with the substrate, and it is widely used in fields of aerospace, automobile industry, petroleum and chemical industry etc.

It is one of the most important and common technologies to realize remanufacturing of surface repair, it has outstanding advantages in the surface repair of parts [4–6], which can make the cladding layer of components with better performance, make it more wear resistance, high temperature resistance and corrosion resistance. Nowadays, the growing popularity of laser cladding technology provides an effective solution for the remanufacturing

of machine tool parts, which can effectively solve the problem of high energy consumption, serious environmental pollution and low repair rate of parts. Based on the remanufacturing of linear guide of CNC machine tool [7], it not only avoids waste but also saves manufacturing costs.

The purpose of laser cladding is to improve the performance of the substrate, and the quality of the cladding layer is affected by the selection of process parameters directly. At present, there are many methods to optimize the process parameters, such as Taguchi method, response surface methodology, mathematical statistics, artificial neural network and so on [8–11]. Peng et al. [12] compared the wear resistance of 316 stainless steel powder after adding the same mass fraction of TiC, WC and TiN powder by gas shielded welding, the process parameter combination to hardness maximization was obtained through the ANOVA of SNR of single response target (coating hardness). Riquelme et al. [13] cladded composite coating on aluminum alloy matrix in order to maximize the cladding width and height, minimize the penetration depth, it was found that the process parameters that affect geometrical features were different by means of SNR analysis, and the optimum parameters combination was obtained with the optimization conditions of the maximum aspect ratio, and minimum

\* Corresponding author at: School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
E-mail address: [tbyu@mail.neu.edu.cn](mailto:tbyu@mail.neu.edu.cn) (T. Yu).

defect rate finally. So it is very easy to optimize the single response target by using ANOVA, but it is difficult to use the Taguchi method to optimize the multi-objective parameters [14], some scholars have realized the multi-response and multi-parameter by combining Taguchi method with grey relational analysis method. Shi et al. [15] improved the roughness and hardness in the dry-milling magnesium alloy, the ANOVA was used to find the parameters which played a major role in response target, the grey correlation analysis was used to obtain the best milling process to meet targets response, the experimental results of optimal parameters showed that there was a considerable improvement in surface roughness and micro-hardness. Dhas & Sathesh [16] used the Taguchi-Grey correlation analysis method for obtaining the best welding parameters for the pressure vessel, the influence of parameters on the geometrical characteristics of welding was studied by 27 orthogonal experiments, and the optimum parameters combination was obtained through the response plot of grey relational grade. Farahmand et al. [17] used the central composite design (CCD) to design the experiment, used the response surface method to optimize the laser cladding process parameters with multi-parameter and multi-response. However, the disadvantage of this method is that the surface plot will appear to be climbing all the time if the initial parameter selection is irrational, it will be regarded as failure in this parameter selection and another retest is required. Erfanmanesh et al. [18] used empirical data statistical methods to optimize the laser cladding process parameters, each response target was represented by a regression mathematical model in the same graph, and the optimal parameters were selected by the range interval. The disadvantage of this method is that the error of the fitted curve is large if the data is irregular, or it cannot even be represented in the same coordinate system. Gao et al. [9] used Kriging model and genetic algorithm (GA) to optimize the parameters after design of experimental (DOE) in order to obtain the parameters of hybrid laser-arc welding. However, this method uses a large amount of data for training and a few data for verification, and requires repeated calculation. The disadvantage of this method is that there are large errors when the number of experimental groups is small. In contrast, the Taguchi-grey correlation method can be used to optimize the required relatively reliable process parameters at one time.

In this study, the optimal parameter combination of laser cladding was optimized based on Taguchi-grey correlation analysis, and multi-parameter optimization under multi-response was realized. The common material of linear guide (S55) was used as the substrate, Fe313 was chosen as the cladding powder. The cladding width, cladding height and dilution rate were selected as the response targets, the SNR of three response targets was analyzed by ANOVA. The influence trend and order of each factor on the response target were analyzed respectively. The Taguchi method combined with grey relational analysis can transform multi-response targets into a single grey correlation degree to find the optimal combination of process parameters for the maximum cladding width, minimum cladding height and proper dilution rate. Finally, final experiment was used to verify the prediction of the grey correlation degree and the improvement of the response targets.

## 2. Material and methods

### 2.1. Experiment condition

The laser cladding device that used for experiment is composed of the laser head, 6-axis KUKA robot, powder feeder, laser generator, water cooler, robot control system, and laser control cabinet. The rated power of Germany IPG YLR-500 fiber laser with a wave-

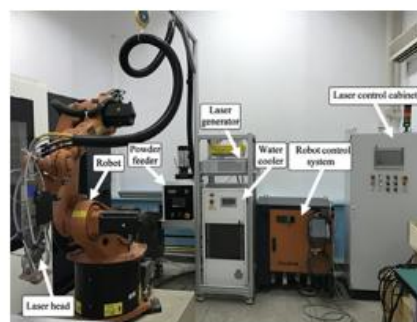


Fig. 1. Laser cladding system experimental device.

length of 1070 nm is 500 W, and the laser head adopts coaxial nozzle, the schematic view of laser cladding experiment device is shown in Fig. 1.

### 2.2. Material and procedure

Quality carbon steel S55C was selected as substrate with a dimension of  $120 \times 80 \times 12 \text{ mm}^3$ . The powder was iron-based self-fluxing powder Fe313 [19,20] whose shape is nearly sphere with a size of 100–270 screen mesh, as shown in Fig. 2. Their chemical compositions are shown in Table 1. The upper surface of the substrates was ground on grinding machine, and then wiped clean with absolute ethanol. The powders were dried at  $100^\circ\text{C}$  for 4 h.

After programming through offline programming software Robot Art, the single-track experiment of laser cladding was deposited on the already prepared substrate, each track is 40 mm in length and the distance between each other is 4.5 mm, the plate was cut into pieces on the wire cut electrical discharge machining, then they were ground with different types of sandpaper from coarse to fine in turn and polished through diamond paste, corroded with 4% nitric acid alcohol solution, and then measured the geometry with a laser scanning confocal microscopy.

### 2.3. Design of experiment

Taguchi method provides an effective method to design the experiment, it can help minimize the number of it [15,21], three main factors that primarily influence the heat and mass transfer, cladding geometry characteristics, microstructure were considered. The laser spot diameter (D) is 1.045 mm, the three

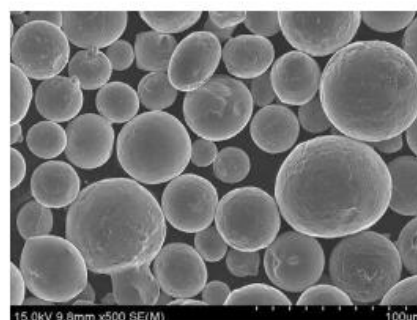


Fig. 2. The morphology of the powder Fe313.

**Table 1**  
Chemical composition of the substrate and powder.

Compositions (wt.%)	C	Si	Cr	Ni	B	Mn	Cu	P	S	Fe
S55C	0.52–0.58	0.15–0.35	≤0.2	≤0.2	–	0.6–0.9	≤0.3	≤0.03	≤0.035	–
Fe313	0.1–0.2	1.0–1.5	14–18	2.0–2.5	1.0–2.0	0.2–0.5	–	–	–	Bal.

parameters and their values were presented with five levels in Table 2, and the parameter combinations were shown in Table 3.

**3. Results and discussion**

**3.1. Experiment results**

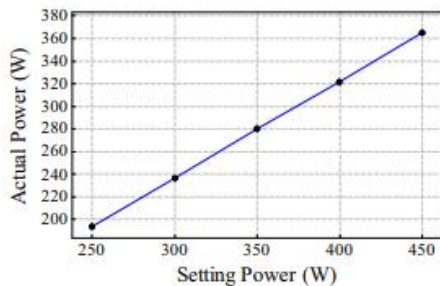
During the experiment, it could be found that the actual power is not consistent with the setting power, and it can't get the amount of powder per unit time directly because what can be adjusted is the speed of powder disk, so it should be transferred by weighing the powder that blows for a minute. The transition diagrams of them are shown in Figs. 3 and 4 respectively, it can be seen that both have a good stability, and the actual power values and powder feeding rates (mg/s) will be used in subsequent calculations.

**Table 2**  
Factors and their levels.

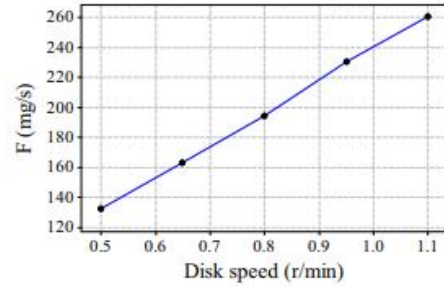
Factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Laser power P (W)	250	300	350	400	450
Scanning speed S (mm/s)	3	4	5	6	7
Powder feeding rate F (r/min)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10

**Table 3**  
Orthogonal arrays L25(5<sup>4</sup>) of Taguchi experiments.

NO.	P (W)	S (mm/s)	F (r/min)	NO.	P (W)	S (mm/s)	F (r/min)
1	250	3	0.50	14	350	6	0.50
2	250	4	0.65	15	350	7	0.65
3	250	5	0.80	16	400	3	0.95
4	250	6	0.95	17	400	4	1.10
5	250	7	1.10	18	400	5	0.50
6	300	3	0.65	19	400	6	0.65
7	300	4	0.80	20	400	7	0.80
8	300	5	0.95	21	450	3	1.10
9	300	6	1.10	22	450	4	0.50
10	300	7	0.50	23	450	5	0.65
11	350	3	0.80	24	450	6	0.80
12	350	4	0.95	25	450	7	0.95
13	350	5	1.10				

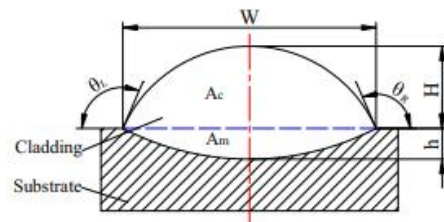


**Fig. 3.** Transition diagram about actual power and setting power.

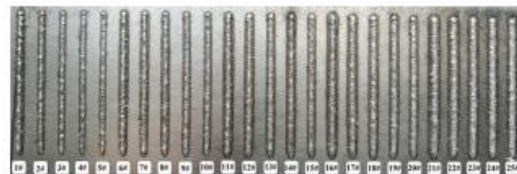


**Fig. 4.** Transition diagram about F and powder disk speed.

Fig. 5 shows the typical geometry characteristics of single-track cross-section, including the cladding width (W), cladding height (H), cladding depth (h), cladding angle ( $\theta_l$  and  $\theta_r$ ), cladding area ( $A_c$ ), molten area ( $A_m$ ). Morphology of the single-track experiment is shown in Fig. 6. After taking cross-section photos with 3D measuring laser microscope (Olympus OLS4100), it can get these geometric dimensions which are listed in Table 4, and Fig. 7 shows the laser track cross-section map that was consisted of 25 tracks in the same proportion, each row had the same P value and different F/S values from small to large, and the red numbers below each track were their F/S values which represented the amount of powder delivered per unit length, it can be found that the molten pools in the upper right part of the figure were very small or almost absent, and no good metallurgical bonding was formed, this will result in insufficient bonding strength and further affect the forming quality, and it can qualitatively conclude that cross-section cladding area increased with the increase of F/S value, and the



**Fig. 5.** Typical geometry characteristics of single track cross-section (W, H, h,  $\theta$ ,  $A_c$ ,  $A_m$ ).



**Fig. 6.** Morphology of single-track experiment.

**Table 4**  
Raw data about geometry dimensions of single-track.

NO	W (um)	H (um)	h (um)	$\theta_L$ (°)	$\theta_R$ (°)	$A_c$ (um <sup>2</sup> )	$A_m$ (um <sup>2</sup> )
1	730.03	510.06	14.18	91.64	71.89	314325.19	2756.94
2	746.37	326.59	6.42	111.65	114.86	181602.17	1255.49
3	697.06	363.97	6.66	110.99	113.74	177250.76	1066.72
4	719.12	254.41	18.40	125.92	121.53	127997.95	2369.70
5	834.83	250.90	25.89	128.13	150.21	137087.05	4673.15
6	1045.46	581.82	30.70	48.64	26.80	505264.72	7709.19
7	946.16	412.50	51.93	127.43	102.07	304588.57	16305.47
8	893.09	382.69	86.54	114.47	105.12	241752.03	28032.54
9	816.68	285.00	88.34	109.17	129.12	173193.75	24348.61
10	797.51	290.83	100.83	114.66	129.81	161293.06	29465.28
11	1212.50	645.03	88.76	45.49	31.18	617326.56	31825.00
12	993.75	520.85	136.46	88.83	77.12	438726.13	56533.20
13	998.97	437.50	126.05	119.11	111.59	317539.06	57671.44
14	1104.47	388.24	135.30	118.05	127.10	359558.82	58179.07
15	1013.67	286.38	155.69	139.32	130.17	182306.30	68615.70
16	1344.49	729.17	137.50	114.27	79.38	746494.98	67881.94
17	1243.77	638.79	167.50	39.20	66.40	625957.81	76828.13
18	1186.26	505.01	160.00	39.52	59.25	451896.88	89475.00
19	1090.92	376.15	192.05	106.61	120.02	313034.61	105787.71
20	1027.09	286.46	238.54	128.35	131.71	202854.82	126077.47
21	1559.58	962.50	120.31	115.29	108.52	657783.20	64738.77
22	1271.27	655.04	202.52	105.08	75.68	668548.44	130310.94
23	1237.62	526.25	227.53	101.83	120.80	488562.50	163712.50
24	1140.91	426.26	266.00	114.00	107.45	238959.19	118693.18
25	1125.15	395.53	197.76	111.55	116.46	333483.99	122953.25

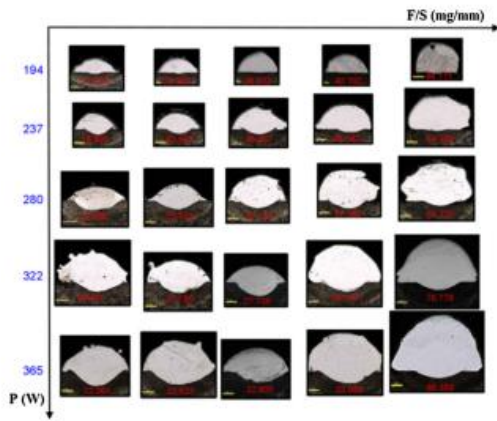


Fig. 7. Cladding layer cross-section map for P and F/S.

depth of the substrate melt area was dramatically affected by laser power.

3.2. Contour plot and surface plot

In order to obtain an intuitive understanding of the influence of process parameters on cladding geometry, the contour and surface plots [22,23] which were fitted through 25 groups of experimental data (red dots in figure) were made, powder distribution density (I), cladding angle ( $\theta$ ) and dilution rate ( $\eta$ ) are calculated by Eqs. (1), (2), (3) respectively.

$$I = \frac{F}{D \cdot S} \tag{1}$$

$$\theta = (\theta_L + \theta_R) / 2 \tag{2}$$

$$\eta = \frac{A_c}{A_c + A_m} \tag{3}$$

The effect of laser power (P) and powder distribution density (I) on cladding width can be found in Figs. 8 and 9. The cladding width can be increased with the increasing of P and I respectively. It is not difficult to understand that when the density of the powder is constant, the greater the laser power is, the more the powder that can melt in the unit time, the extra powder which haven't been melted is blown away, so the greater the melting width is. When the laser power is constant and within the range of power that can be melted, the larger the powder distribution density is, the more the amount of powder is melted per unit area, and the greater the cladding width is. Obviously, the influence of laser power on cladding width is more significant than that of powder distribution density.

The effect of laser power (P) and powder distribution density (I) on cladding height can be found in Figs. 10 and 11. From the two figures, it can be seen that the cladding height is positively related to P and I, when I is constant, the greater P is, the more energy can melt the rebounded powder in a short time, thus increasing the height of the cladding layer. When P is constant, the greater I is, the greater the amount of powder sprayed per unit area, the less laser energy is wasted, and the more molten powder increases the cladding height. The influence of laser power and powder

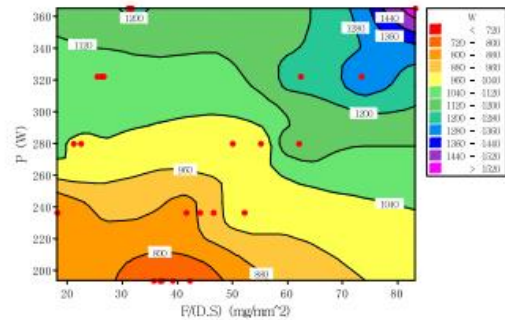


Fig. 8. Contour plot of W about P and I.



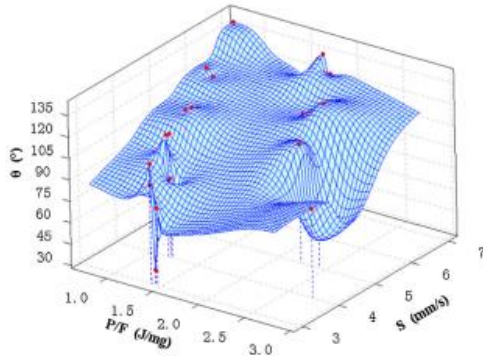


Fig. 15. Surface plot of  $\theta$  about S and P/F.

angle is lower than  $110^\circ$  when the scanning speed is less than 5 mm/s. It is known as that the smaller cladding angle is more liable to cause overlapping blind zones when multi-track cladding occurs. In order to better forming quality, the cladding angle needs to be larger than  $110^\circ$ , so the scanning speed is greater than or equal to 5 mm/s. The cladding angle is almost completely dependent on the scanning speed obviously, once the speed is smaller than 5 mm/s, the molten metal will flow downwards, and the formation of the small cladding angle will be adverse to the quality of the cladding.

3.3. ANOVA using Taguchi method

The Taguchi method defined SNR as a measurement to evaluate process robustness. According to the goal of the research, SNR can be divided into the larger the better (LTB), the smaller the better (STB), and the nominal the better (NTB) [14,15,21]. Eq. (4) represents their expressions for calculating SNR respectively. In the research, the cladding width (W), cladding height (h), and dilution rate ( $\eta$ ) are chosen as response targets, it is desirable to have a wider cladding width and lower cladding height, so as to reduce defects when the deposited tracks are overlapped, in order to avoid energy waste caused by excessive dilution rate and poor metallurgical combination caused by too small dilution, we selected 30% as the target value of the dilution rate [24,25]. The calculated dilution rate ( $\eta$ ) and the SNR of the three response targets are listed in Table 5.

$$S/N = \begin{cases} -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) & \text{LTB} \\ -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) & \text{STB} \\ -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2\right) & \text{NTB} \end{cases} \quad (4)$$

The ANOVA can study which parameters have a significant effect on geometric characteristics, and the SNR response table and the SNR response graph can be obtained by Minitab software, the SNR response table can show which factor has a great effect on the response targets and whether effect is large/small or have no effect, the optimum process parameters can be obtained at the highest value from the SNR response graph.

The ANOVA of the cladding width is shown in Table 6, line 3–7. According to the F distribution table,  $F_{0.1}(3,5) = 3.62$ ,  $F_{0.05}(3,5) = 5.41$ ,  $F_{0.01}(3,5) = 12.01$ ;  $F(P) > F_{0.01}(3,5)$ , so the laser power has an extremely significant effect on the cladding width;  $F_0(1,3,5) < F(S) < F_{0.05}(3,5)$ , so the scanning speed has a significant effect on the cladding width;  $F(F) < F_{0.1}(3,5)$ , the influence of powder feeding

Table 5  
Calculated dilution rate ( $\eta$ ) and SNR of response targets.

NO.	dilution rate ( $\eta$ )	S/N <sub>w</sub>	S/N <sub>h</sub>	S/N <sub><math>\eta</math></sub>
1	0.87%	57.267	-54.152	10.713
2	0.69%	57.459	-50.280	10.659
3	0.60%	56.865	-51.221	10.633
4	1.82%	57.136	-48.111	11.000
5	3.30%	58.432	-47.990	11.469
6	1.50%	60.386	-55.296	10.904
7	5.08%	59.519	-52.308	12.069
8	10.39%	59.018	-51.657	14.151
9	12.33%	58.241	-49.097	15.053
10	15.45%	58.035	-49.273	16.741
11	4.90%	61.674	-56.192	12.007
12	11.41%	59.946	-54.334	14.617
13	15.37%	59.991	-52.820	16.695
14	13.93%	60.863	-51.782	15.878
15	27.35%	60.118	-49.139	31.520
16	8.34%	62.571	-57.257	13.285
17	10.93%	61.895	-56.107	14.394
18	16.53%	61.484	-54.066	17.411
19	25.26%	60.756	-51.507	26.481
20	38.33%	60.232	-49.141	21.588
21	8.96%	63.860	-59.668	13.539
22	16.31%	62.085	-56.325	17.273
23	25.10%	61.852	-54.424	26.194
24	33.19%	61.145	-52.593	29.933
25	26.94%	61.024	-51.944	30.279

Table 6  
ANOVA for cladding width (W), Cladding height (H), Dilution rate ( $\eta$ ).

Source		Laser power (P)	Scanning speed (S)	Powder feeding rate (F)	Residual Error	Total
DF		4	4	4	12	24
Cladding width (W)	Seq SS	886,413	154,574	23,512	94,317	1,158,817
	Adj MS	221,603	38,643	5878	7860	
	F	28.19	4.92	0.75		
	P	0.000	0.014	0.578		
	Contribution	<b>83.27%</b>	<b>14.52%</b>	<b>2.21%</b>		
Cladding height (H)	Seq SS	194,329	458,650	29,204	33,056	715,239
	Adj MS	48,582	114,662	7301	2755	
	F	17.64	41.62	2.65		
	P	0.000	0.000	0.085		
	Contribution	<b>28.49%</b>	<b>67.23%</b>	<b>4.28%</b>		
Dilution rate ( $\eta$ )	Seq SS	0.140781	0.093181	0.014697	0.027554	0.276213
	Adj MS	0.035195	0.023295	0.003674	0.002296	
	F	15.33	10.15	1.60		
	P	0.000	0.001	0.237		
	Contribution	<b>56.62%</b>	<b>37.47%</b>	<b>5.91%</b>		

rate on the cladding width isn't obvious which the main reason is that the powder from the nozzle isn't all molten on the substrate, a part of which absorbs laser energy is melted to form the cladding, another rebounds after hitting the substrate.  $F(P) > F(S) > F(F)$ , according to the theory of ANOVA, it shows that the cladding width is mainly affected by P, and S less affected. The contribution rate of P, S, F to the cladding width is 83.27%, 14.52% and 2.21% respectively.

According to the SNR of the cladding width in Table 5, it is easy to get SNR response table of the cladding width, as shown in the 2–4 column of Table 7, the rank of the process parameters that affects the cladding width is P, S, F. This is consistent with the effect on the cladding width in the ANOVA. The main effects plot for SNR of the cladding width is shown in Fig. 16. It can be seen that the SNR of the cladding width increases steeply with laser power, it decreases gently with the scanning speed, and the powder feeding rate fluctuates within a small range near the average, it shows that it has little effect on the cladding width, it can be seen that the influence degree of the parameter on the cladding width from the main effects plot, and in order to get the maximum cladding width individually, it can select P5S1F5.

The ANOVA of the cladding height is shown in line 8–12, Table 6.  $F(P) & F(S) > F_{0.01}(3,5)$ , so both P and S have an extremely significant effect on the cladding height;  $F(F) < F_{0.1}(3,5)$ , so the effect of powder feeding rate on the cladding width isn't obvious.  $F(S) > F$

$(P) > F(F)$ , in order to get the smaller cladding width, it shows that the influencing order of the cladding width about the three process parameters is S, P, and R. The contribution rate of P, S and F to the cladding height is 28.49%, 67.23% and 4.28% respectively. According to the SNR of the cladding height in Table 5, it is easy to get SNR response table of the cladding width, as shown in the 5–7 column of Table 7, the rank of the process parameters that affects the cladding width is S, P, and F. This is consistent with the effect of the three on cladding height in the ANOVA. The main effects plot for SNR of the cladding height is shown in Fig. 17. It can be seen from the change trend in the figure, the SNR of the cladding height decreases gently with the laser power, it increases more steeply with the scanning speed, and it fluctuates within a small range near the average, it shows that it has little effect on the cladding height. In order to get the minimum cladding height individually, it can select P1S5F2 from the main effects plot for SNR of the cladding height.

The ANOVA of the dilution rate is shown in line 13–17, Table 6.  $F(P) > F_{0.01}(3,5)$ , P has an extremely significant effect on the dilution rate;  $F_{0.05}(3,5) < F(S) < F_{0.01}(3,5)$ , so S has a significant effect on it;  $F(F) < F_{0.1}(3,5)$ , so the influence of powder feeding rate on it isn't obvious.  $F(P) > F(S) > F(F)$ , it shows that the influencing order of the dilution rate about the three process parameters is P, S and F. The contribution rate of the three to the dilution rate is 56.62%, 37.47% and 5.91% respectively. According to SNR of

**Table 7**  
Response table for signal to noise ratios of W, H,  $\eta$ .

Level	Cladding width (W)			Cladding height (H)			Dilution rate ( $\eta$ )		
	P	S	F	P	S	F	P	S	F
1	57.43	61.15	59.95	-50.35	-56.51	-53.12	5.447	6.045	7.802
2	59.04	60.18	60.11	-51.53	-53.87	-52.13	6.892	6.901	10.576
3	60.52	59.84	59.89	-52.85	-52.84	-52.29	9.072	8.508	8.623
4	61.39	59.63	59.94	-53.62	-50.62	-52.66	9.316	9.835	8.333
5	61.99	59.57	60.48	-54.99	-49.50	-53.14	11.722	11.160	7.115
Delta	4.56	1.58	0.60	4.64	7.02	1.01	6.275	5.115	3.461
Rank	1	2	3	2	1	3	1	2	3

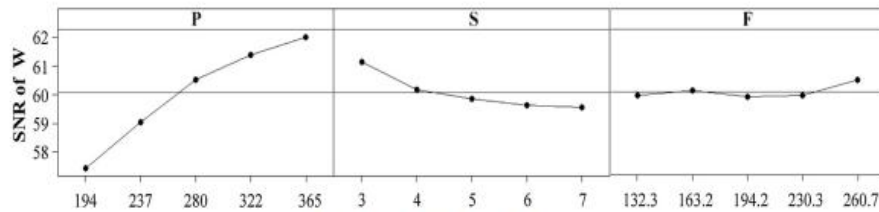


Fig.16. Main effects plot for SNR of the cladding width.

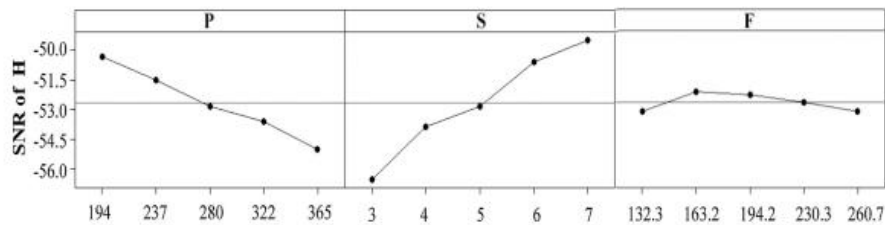


Fig.17. Main effects plot for SNR of the cladding height.

dilution rate in Table 5, it is easy to get SNR response table of dilution rate, as shown in the 8–10 column of Table 7, the rank of the process parameters affects dilution rate is P, S, F. This is consistent with the effect of the three on dilution rate in the ANOVA. The main effects plot for SNR of the dilution rate is shown in Fig. 18. It can be seen that the SNR of the dilution rate increases steeply with the laser power, it increases gently with the scanning speed, and it fluctuates near the average, it shows that it has little effect on the dilution rate. In order to get the proper dilution rate individually, it can select P555F2 from the main effects plot for SNR of the dilution rate.

3.4. Optimization of multi-response targets based on grey relational theory

The ANOVA based on Taguchi method is suitable for the case of single-target optimization, and has some difficulties when facing multi-targets [14], from Figs. 16–18, it can't select parameters that satisfy three response target characteristics. Taguchi method combined with grey relational theory can solve complex multi-response problems effectively; it offers an efficient solution to multi-response, multi-parameter optimization problems. The optimization problem of multiple process parameters is transformed into the optimized grey correlation degree, and the optimum parameters combination which has considered the cladding width, cladding height and dilution rate is obtained. Grey relational theory includes three steps [14,21,26]: normalizing of the SNR, calculating grey relation coefficient, calculating grey relation grade (GRG).

Firstly, experiment data needs to be normalized range from 0 to 1 owing to the existence of multi-scales for different response values. The cladding width (W), cladding height (H), dilution rate ( $\eta$ ) follows the LTB, STB, NTB respectively, the normalization [14,21,26] is defined by Eq. (5).

$$x_i(k) = \begin{cases} \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} & LTB \\ \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} & STB \\ \frac{\max |y_i(k) - a(k)| - |y_i(k) - a(k)|}{\max |y_i(k) - a(k)| - \min |y_i(k) - a(k)|} & NTB \end{cases} \quad (5)$$

where  $x_i(k)$  is the normalized value for  $i^{\text{th}}$  experiment,  $y_i(k)$  is SNR data for  $i^{\text{th}}$  experiment in Table 5, and  $a(k)$  is the target value of  $y_i(k)$ .

Then, the grey correlation coefficient of the three process parameters can be obtained by the Eq. (6) [14,21,26], it presents the relationship between actual normalized SNR and ideal values.

$$\xi_i(k) = \frac{\min_j |x_i^0 - x_i(k)| + \zeta \max_j |x_i^0 - x_i(k)|}{|x_i^0 - x_i(k)| + \zeta \max_j |x_i^0 - x_i(k)|} \quad (6)$$

where  $x_i^0$  is the ideal normalized SNR for the  $i^{\text{th}}$  experiment and is equal to 1 in this case.  $\zeta$  is the distinguishing coefficient which is defined in the range  $0 \leq \zeta \leq 1$ ,  $\zeta$  was taken as 0.5 in this study.

Finally, the GRG that considers the combination of the SNR of three response targets (W, H,  $\eta$ ) can be calculated by Eq. (7) [14,21,26].

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (7)$$

where  $n$  is the number of the response targets,  $n$  is equal 3 in this research.

According to the three steps of grey correlation analysis, calculated data can be shown in Table 8, and the ANOVA of GRG is shown in Table 9. From the F distribution table,  $F_{0.1}(1,5) = 4.06$ ,  $F_{0.05}(1,5) = 6.61$ ,  $F_{0.01}(1,5) = 16.26$ ;  $F(S) \& F(P) > F_{0.01}(1,5)$ , so scanning speed and laser power have an especially significant effect on grey relational grade;  $F(F) < F_{0.1}(1,5)$ , so the influence of powder feeding rate on grey relational grade isn't obvious.  $F(S) > F(P) > F(F)$ , it shows that the influencing order of GRG on the three parameters is S, P, and F. The contribution rate of P, S and F to the cladding height is 33.46%, 58.78% and 4.05% respectively. Response for means of GRG is shown in Table 10. The main effects plot for means of GRG is shown in Fig. 19. It can be seen that the optimal process parameters combination were P555F2, namely, P is 365 W (setting power is 450 W), S is 7 mm/s, F is 163.167 mg/s (powder disk speed is 0.65r/min).

4. Verification experiment

Since the levels of the optimal parameters combination which obtained from the main effects plot of GRG aren't in the L25 experimental table designed by Taguchi method, it is necessary to verify it by extra experiment. The predicted grey correlation grade can be calculated as Eq. (8). [14,21,26]

$$\gamma_p = \bar{\gamma}_i + \sum_{i=1}^n (\hat{\gamma}_i - \bar{\gamma}_i) \quad (8)$$

where  $\gamma_p$  is the predicted GRG,  $\bar{\gamma}_i$  is the total mean value of GRG,  $\hat{\gamma}_i$  is mean of the GRG at the  $i^{\text{th}}$  optimal level.

The experimental verification table is shown in Table 11, the three response targets have been improved as expected after optimization, the cladding width increased from 1104.47  $\mu\text{m}$  to 1107.629  $\mu\text{m}$ , the cladding height decreased from 388.24  $\mu\text{m}$  to 276.736  $\mu\text{m}$ , and the dilution rate increased from 13.93% to 38.65%. At the same time, the GRG value is improved by 0.153282, and the predicted GRG value (0.686237) of the optimal parameter combination can be well coincided with the experimental value (0.701267).

As shown in Fig. 20(a), it can be found that the entire cladding layer has no pores and cracks, and the cladding layer under the above optimized parameters has formed a good metallurgy combination with the substrate. Fig. 20(b) shows the upper microstructure of the cladding layer, it's the equiaxed dendrite which is solidified when it has not yet nucleated to become bigger, and it's finer than the other parts due to the high cooling

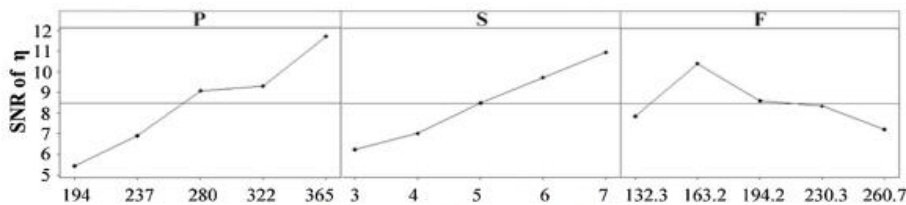
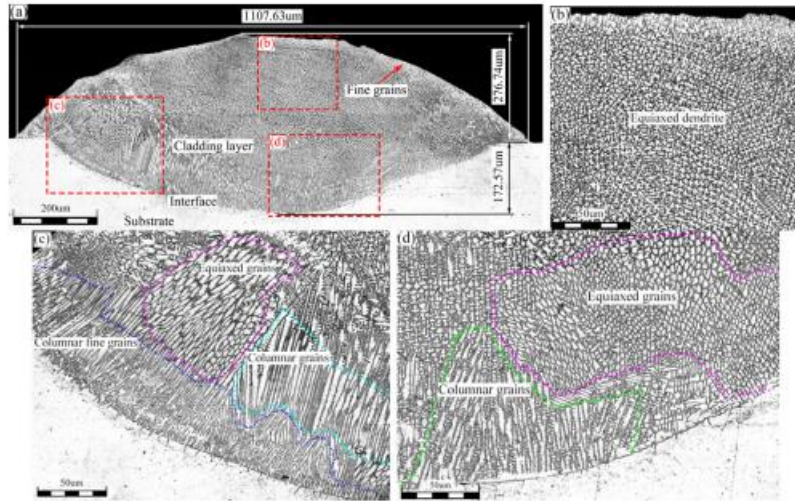
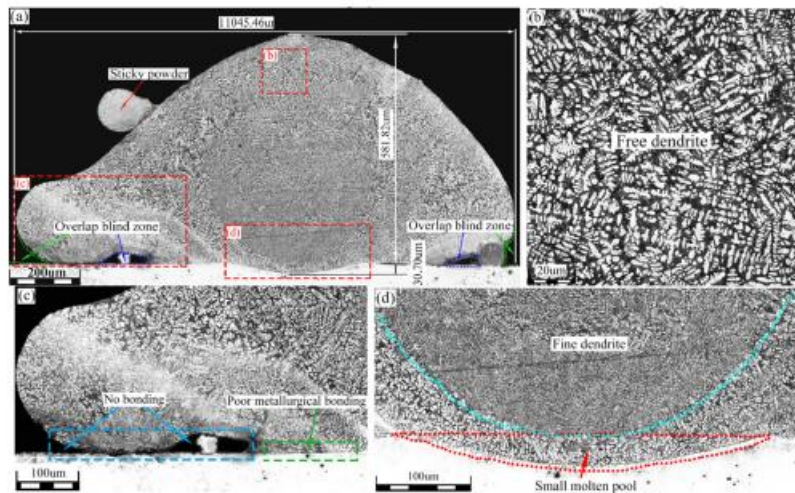


Fig. 18. Main effects plot for SNR of the dilution rate.



**Fig. 20.** Micrographs of different zones in optimized cladding layer. (a) Morphology of single-track cross-section. (b) The upper microstructure of the cladding layer. (c) The left microstructure of the cladding layer. (d) The bottom microstructure of the cladding layer.



**Fig. 21.** Micrographs of different zones in NO.6 cladding layer. (a) Morphology of single-track cross-section. (b) The upper microstructure of the cladding layer. (c) The left microstructure of the cladding layer. (d) The bottom microstructure of the cladding layer.

this process parameter (P: 300 W S: 3 mm/s F: 0.65 r/min), and it can be seen that there isn't enough energy to melt the powder within unit time and unit distance, and the formed molten pool is too small to allow heat to dissipate before it solidifies, finally there are fine equiaxed grains instead of columnar crystals that shown in Fig. 21(d). At the top of the cladding layer, there are some primary free dendrites, as shown in Fig. 21(b). There is an area poor metallurgical bonding between the cladding layer and the substrate, the melted metal liquid flows toward the outermost part of the molten pool, gradually solidifies during it flows, then a region that don't bond to the substrate is formed, as shown in Fig. 21(c), the overlap blind zone will be formed when the cladding layer is lapped, which is unfavorable to the forming quality extremely.

The microstructure of the NO.9 cladding layer is shown in Fig. 22. In this process parameters (P: 300 W S: 6 mm/s F: 1.1 r/min), the scanning speed and feeding rate are larger, and the laser power is smaller, the final cladding layer has a width of only 0.817 mm, it is smaller than the measured diameter of laser spot (1.045 mm), it can be concluded that this is caused by too small energy density and too much feeding powder, which will cause more overlap times in the unit area and increase the probability of the generation of overlap defects, and at the same time, it causes the lower utilization rate of powder, it can be seen that there are some pores in the upper zone of the cladding layer in Fig. 22(b). Therefore, in order to get better geometry and forming quality, the cladding layer whose parameters have been optimized has obvious advantages over those of the NO.6 and NO.9 cladding layers.

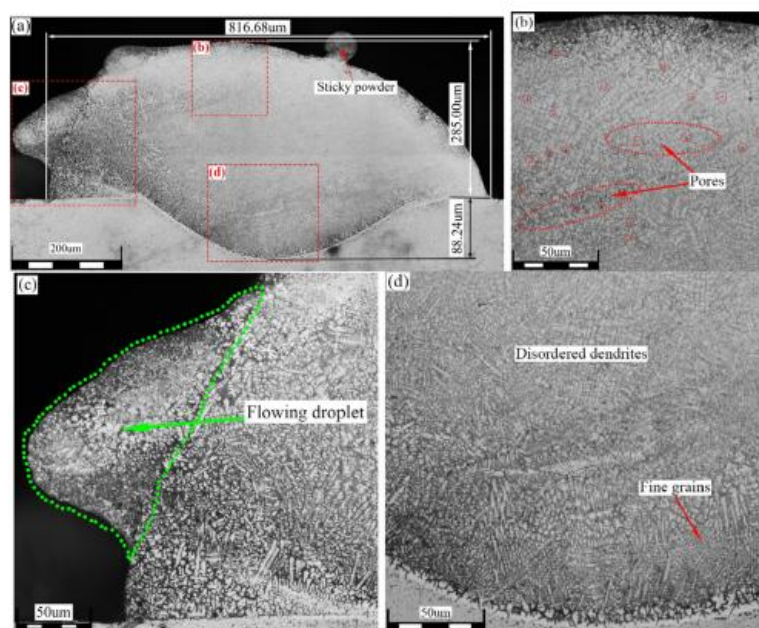


Fig. 22. Micrographs of different zones in NO.9 cladding layer. (a) Morphology of single-track cross-section. (b) The upper microstructure of the cladding layer. (c) The left microstructure of the cladding layer. (d) The bottom microstructure of the cladding layer.

## 5. Conclusions

In this paper, the multi-objective optimization of laser cladding process parameters is carried out combining Taguchi and gray correlation theory. Based on the above research, the following conclusions can be concluded:

- (1) Contours and surface plots intuitively reflected the influence between process parameters and response targets, and ANOVA of SNR showed that the cladding width depended on the laser power mainly, the cladding height and dilution rate mainly depended on the laser power and scanning speed, the effect of powder feeding rate on cladding width, cladding height and dilution rate wasn't obvious.
- (2) Combined with the grey correlation theory, the three response targets (the cladding width, cladding height, and dilution rate) were transformed into a single GRG to evaluate comprehensively. The optimal process parameters combination for maximum cladding width, minimum cladding height and proper dilution rate was obtained from the main effects plot of GRG, namely, laser power, scanning speed and powder feeding rate was about 365 W (setting power is 450 W), 7 mm/s, 163.167 mg/s (powder feeding rate is 0.65r/min) respectively.
- (3) Finally, the optimized parameter combination was verified by experiment which ensured the robustness of the optimized results, it can be found that the three response targets were improved as expectation, the grey relational grade value was improved by 0.153282. There were no defects (pores and cracks) in the entire cladding layer of the optimized cladding layer. The optimized cladding layer has obvious advantages over those of the NO.6 and NO.9 cladding layers in morphology and microstructure obviously. It can

be proved that the Taguchi-grey relational method is an effective solution to optimize the process parameters of laser cladding with multi-response targets.

## Acknowledgements

This work was supported by grants from the Major Project of the Ministry of Industry and Information Technology of China (No. 201675514) the Science and Technology Planning Project of Shenyang (No. 18006001) and the key Laboratory of Shenyang (No. 15153100), the authors gratefully acknowledge their financial support.

## Appendix A. Supplementary material

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.030>.

## References

- [1] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties, *Prog. Mater. Sci.* 92 (2018) 112–224, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- [2] D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *Int. Mater. Rev.* 57 (2012) 133–164, <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>.
- [3] M. Zhong, W. Liu, Laser surface cladding: the state of the art and challenges, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 224 (2010) 1041–1060, <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1782>.
- [4] X. Lei, C. Huajun, L. Hailong, Z. Yubo, Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90 (2017) 1383–1392, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9445-z>.

- [5] Z. Liu, Q. Jiang, T. Li, S. Dong, S. Yan, H. Zhang, B. Xu, Environmental benefits of remanufacturing: a case study of cylinder heads remanufactured through laser cladding, *J. Clean. Prod.* 133 (2016) 1027–1033, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.049>.
- [6] W.J. Wang, Z.K. Fu, X. Cao, J. Guo, Q.Y. Liu, M.H. Zhu, The role of lanthanum oxide on wear and contact fatigue damage resistance of laser cladding Fe-based alloy coating under oil lubrication condition, *Tribol. Int.* 94 (2016) 470–478, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.017>.
- [7] Y. Wang, B. Liu, Z. Guo, Wear resistance of machine tools' bionic linear rolling guides by laser cladding, *Opt. Laser Technol.* 91 (2017) 55–62, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.015>.
- [8] Y. Shi, Y. Li, J. Liu, Z. Yuan, Investigation on the parameter optimization and performance of laser cladding a gradient composite coating by a mixed powder of Co50 and Ni/WC on 20CrMnTi low carbon alloy steel, *Opt. Laser Technol.* 99 (2018) 256–270, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.010>.
- [9] Z. Gao, X. Shao, P. Jiang, L. Cao, Q. Zhou, C. Yue, Y. Liu, C. Wang, Parameters optimization of hybrid fiber laser-arc butt welding on 316L stainless steel using Kriging model and GA, *Opt. Laser Technol.* 83 (2016) 153–162, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.04.001>.
- [10] M. Ansari, R. Shoja Razavi, M. Barekat, An empirical-statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy, *Opt. Laser Technol.* 86 (2016) 136–144, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.06.014>.
- [11] J. Deeying, K. Asawarungsangkul, P. Chutima, Multi-objective optimization on laser solder jet bonding process in head gimbal assembly using the response surface methodology, *Opt. Laser Technol.* 98 (2018) 158–168, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.07.045>.
- [12] D.-X. Peng, Optimizing wear resistance of ceramic (TiN, WC and TiC) clad layer by gas tungsten arc welding (GTAW), *Ind. Lubr. Tribol.* 66 (2014) 452–458, <https://doi.org/10.1108/ilt-03-2012-0030>.
- [13] A. Riquelme, M.D. Escalera-Rodriguez, P. Rodrigo, J. Rams, Role of laser cladding parameters in composite coating (Al-SiC) on aluminum alloy, *J. Therm. Spray Technol.* 25 (2016) 1177–1191, <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0431-7>.
- [14] T.V. Šibalija, V.D. Majstorović, Adv. Multiresponse Process Optim. (2016), <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19255-0>.
- [15] K. Shi, D. Zhang, J. Ren, Optimization of process parameters for surface roughness and microhardness in dry milling of magnesium alloy using Taguchi with grey relational analysis, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 81 (2015) 645–651, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7218-8>.
- [16] J.E.R. Dhas, M. Satheesh, Multi objective optimization of welding using grey relational analysis with entropy measurement, *J. Manuf. Technol. Res.* 4 (2012) 181–189.
- [17] P. Farahmand, R. Kovacevic, Parametric study and multi-criteria optimization in laser cladding by a high power direct diode laser, *Lasers Manuf. Mater. Process.* 1 (2014) 1–20, <https://doi.org/10.1007/s40516-014-0001-0>.
- [18] M. Erfanmanesh, H. Abdollah-Pour, H. Mohammadian-Semnani, R. Shoja-Razavi, An empirical-statistical model for laser cladding of WC-12Co powder on AISI 321 stainless steel, *Opt. Laser Technol.* 97 (2017) 180–186, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.026>.
- [19] P. Yi, Y. Liu, C. Fan, X. Zhan, P. Xu, T. Liu, Impact analysis of the thermal mechanical coupling characteristics of graphite morphologies during laser cladding of gray cast iron, *Opt. Laser Technol.* 90 (2017) 52–64, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.11.011>.
- [20] Y.Z. Sun, S. Liu, S.Y. Wang, J.B. Li, C.N. Yang, B.R. Hai, X.R. Zhang, C.S. Liu, Study on macroscopic morphology, microstructure and hardness of F313 iron-based coatings prepared by laser cladding using different powder feed rate, *Adv. Mater. Res.* 1095 (2015) 631–635, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1095.631>.
- [21] Z. Zhang, R. Kovacevic, Multiresponse optimization of laser cladding Steel + VC using grey relational analysis in the Taguchi method, *Jom* 68 (2016) 1762–1773, <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1942-x>.
- [22] M. Hussain, V. Kumar, V. Mandal, P.K. Singh, P. Kumar, A.K. Das, Development of cBN reinforced Ti6Al4V MMCs through laser sintering and process optimization, *Mater. Manuf. Process.* 32 (2017) 1667–1677, <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1303152>.
- [23] D.M. Goodarzi, J. Pekkarinen, A. Salminen, Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry, *Weld. World.* 61 (2017) 883–891, <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0495-0>.
- [24] U. de Oliveira, V. Ocelik, J.T.M. De Hosson, Analysis of coaxial laser cladding processing conditions, *Surf. Coatings Technol.* 197 (2005) 127–136, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>.
- [25] V. Ocelik, U. de Oliveira, M. de Boer, J.T.M. de Hosson, Thick co-based coating on cast iron by side laser cladding: analysis of processing conditions and coating properties, *Surf. Coatings Technol.* 201 (2007) 5875–5883, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.044>.
- [26] S. Mondal, C.P. Paul, L.M. Kukreja, A. Bandyopadhyay, P.K. Pal, Application of Taguchi-based gray relational analysis for evaluating the optimal laser cladding parameters for AISI1040 steel plane surface, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66 (2013) 91–96, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4308-8>.