



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

本科生毕业设计

对45钢激光淬火的有限元数值模拟研究
**Numerical Finite Element Simulation Study of
Laser Quenching of 45 Steel**

姓 名 刘宇坤

学 院 机械工程学院

专 业 金属材料工程

指导教师 耿可屏

职 称 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 responsibility 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

激光淬火技术是一种先进的表面强化技术，因为其过程十分复杂，受到许多因素的影响，所以难以用实验的方法直接测量其瞬态温度场分布、控制优化相关参数。也很难对影响相变硬化区深度的诸多因素做出定量分析。随着计算机科学技术的普及和发展，可以借助相关先进技术，对影响相变硬化区深度的三大因素：离焦量（光斑半径）扫描速度和功率做出定量分析。本课题结合材料性能模拟软件Jmatpro和有限元模拟软件Abaqus，对45钢激光淬火过程进行有限元模拟分析，并在此基础上，针对实验室Laserline-Ldm3000半导体激光器的特征，利用Matlab中的数学模型对Gauss热源进行两次修正，使模拟结果更符合本实验室激光淬火实验结果，提高模拟的精确度和可靠性。

本课题根据固态三维瞬时热传导微分方程，基于Abaqus的环境下，建立三维有限元分析模型，以Jmatpro软件作为辅助，对45钢相关热物性进行模拟，考虑接近实际的加载条件，并对整个激光淬火的瞬态温度场进行模拟。通过分析后处理温度场云图，探究激光淬火过程的规律性。并以相变硬化区深度为指标，将Abaqus模拟计算结果与实验所得相变硬化区深度相比，二者并不吻合，存在较大误差（ $>10\%$ ）。通过合理分析与假设，对Abaqus热源进行两次修正。

激光淬火后的相变硬化层深度是衡量淬火效果好坏的重要指标。相变硬化层深度与激光功率 p ，扫描速度 v ，离焦量（光斑半径 r_0 ）等工艺参数有关。此外还与45钢表面对激光的吸收率 η 有关。根据相关文献，探究了 η 与 p - v 组合之间的关系，离焦量和光斑半径 r_0 之间的关系。建立了基于Matlab的数学模型，再次用实验验证了修正后的热源在 p 为400~600W、 v 为10~20mm/s、离焦量为0~30mm并且不使45钢表面产生熔化的参数组合范围内，具有较高的适用性。误差不超过10%。

本课题旨在提供一种提高模拟精度的研究思路和实验方法，通过先进的计算机技术，将材料模拟软件Abaqus和数学软件Matlab相结合，为精确控制工艺参数和相变硬化区深度提供理论依据。

关键词：激光淬火；温度场模拟；相变硬化区深度；热源修正

ABSTRACT

Laser quenching technology is an advanced surface strengthening technology, because its process is very complex and influenced by many factors, it is difficult to measure its transient temperature field distribution directly and control and optimise the relevant parameters by experimental methods. It is also difficult to make a quantitative analysis of the many factors that affect the depth of the phase hardening zone. With the spread and development of computer science and technology, it is possible to quantitatively analyse the three main factors affecting the depth of the phase change hardening zone: defocusing (spot radius) scan speed and power, with the aid of advanced technology. This project combines the material property simulation software Jmatpro and the finite element simulation software Abaqus to carry out finite element simulation analysis of the 45 steel laser quenching process, and on this basis, for the characteristics of the laboratory Laserline-Ldm3000 semiconductor laser, using the mathematical model in Matlab to make two corrections to the Gauss heat source, so that the simulation results are more The simulation results will be more consistent with the experimental results of laser quenching in this laboratory and improve the accuracy and reliability of the simulation.

In this project, a three-dimensional finite element analysis model based on the solid-state three-dimensional transient heat conduction differential equation was developed in an Abaqus-based environment, using Jmatpro software as an aid to simulate the thermal properties associated with 45 steel, considering loading conditions close to the actual one, and to simulate the entire transient temperature field of laser quenching. The regularity of the laser quenching process is explored by analysing the post-processing temperature field clouds. And using the depth of the phase hardening zone as an indicator, the results of the Abaqus simulation calculations were compared with the experimentally obtained depth of the phase hardening zone, and the two did not match and there was a large error ($>10\%$). Through reasonable analysis and assumptions, the Abaqus heat source was corrected twice.

The depth of the phase hardening layer after laser quenching is an important indicator of the quenching effect. The depth of the phase hardening layer is related to the laser power p , the scanning speed v , the amount of defocusing (spot radius r_0) and other process parameters. It is also related to the laser absorption rate η of the 45 steel surface. The relationship between η and the combination of p - v , the amount of defocusing and the spot radius r_0 was investigated according to the relevant literature. A Matlab-based mathematical model was developed and again experimentally verified the high applicability of the modified heat source in the range of parameter combinations with p from 400 to 600 W, v from 10 to 20 mm/s, defocusing from 0 to 30 mm and without melting of the 45 steel surface. The error does not exceed 10%.

The aim of this topic is to provide a research idea and experimental method to improve the accuracy of the simulation by combining the material simulation software Abaqus and the mathematical software Matlab through advanced computer technology to provide a theoretical

basis for the accurate control of the process parameters and the depth of the phase change hardening zone.

Key words: Laser Quenching; Temperature Field Simulation; Hardened Layer Depth;
Heat Source Correction

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及目的	1
1.2 激光淬火技术	1
1.2.1 激光淬火原理	1
1.2.2 激光淬火优势	2
1.3 温度场有限元数值模拟方法	2
1.4 激光淬火有限元模拟研究的国内外研究现状	3
1.5 课题主要研究内容及技术路线	4
1.6 创新点	6
第二章 45钢激光淬火的理论基础及实验	7
2.1 激光淬火的传热学理论基础	7
2.2 激光淬火的影响因素	8
2.3 激光淬火实验流程	9
2.3.1 试样的原始条件	9
2.3.2 实验参数及相变硬化区深度	10
2.3.3 淬火后组织分析	11
2.4 本章小结	12
第三章 基于Abaqus的45钢激光淬火有限元数值模拟	12
3.1 激光淬火模拟软件的选择	12
3.1.1 Abaqus有限元分析及特点	12
3.1.2 Jmatpro软件及特点	12
3.2 有限元模拟相关参数的确定	13
3.2.1 激光淬火热源的选取	13
3.2.2 材料热物性计算	13
3.2.3 淬透层边界的确定	15
3.3 激光淬火的有限元数值模拟	15
3.3.1 前处理	15
3.3.2 加载计算	18
3.3.3 后处理及模拟结果分析	20
3.4 相变硬化区深度计算及校验	22
3.5 本章小结	23
第四章 基于Matlab数学模型的Gauss热源修正	24
4.1 误差理论分析及修正条件假设	24

4.1.1 吸收率 η 修正的相关研究	24
4.1.2 修正条件假设	24
4.2 Gauss热源的第一次修正	25
4.2.1 数据预处理	26
4.2.2 fitype函数拟合	27
4.2.3 多元线性回归拟合	28
4.3 Gauss热源的第二次修正	31
4.3.1 数据预处理	32
4.3.2 Matlab多项式拟合	32
4.4 修正后热源模型的校验及分析	33
4.4.1 修正热源模型校验	33
4.4.2 修正热源模型分析	35
4.5 本章小结	35
第五章 总结及展望	37
5.1 全文总结	37
5.2 展望	37
参考文献	39
致 谢	40
附录1:英文文献及翻译	41
附录2:完整试样金相照片	47
附录3:Fortran热源子程序代码	51
附录4:Matlab相关代码	52
附录5:部分吸收率 η 检索表 (100/1000)	54

第一章 绪论

1.1 研究背景及目的

进入21世纪信息技术时代，计算机科学技术渗透进生活的各个方面，其在科学研究领域的作用更是不可替代。随着人们对新物质，新材料的迫切需求，计算机在材料科学中的应用领域日益广泛^[1]。通过准确的计算机模拟技术，如果能将计算机的模拟模型作为实际实验的参照，那么后续模拟实验会更加具有真实性^[2]。

而激光是20世纪以来最伟大的发明之一，它的出现改变了人们对世界的认知，引导着人们以一种全新的技术改造、探索世界^[3]。从激光炸弹到激光核聚变，从激光切割、激光打标、到激光增材、激光3D打印，激光技术已经逐步渗透进军事、工业、农业及人们生活的方方面面。激光将在21世纪加快我国从世界制造大国到世界制造强国的新进程。激光加工技术包括激光淬火、激光焊接、激光熔覆等，是一门高水平高综合性技术，与光学、材料学、机械学、电子学等学科交叉。并且由于激光的高单色性、高相干性、高能量密度、高方向性，激光技工技术被广泛的应用于国防、医学、国家级重大项目中，并发挥着十分重要的作用。

45钢是一种优质碳素结构钢，广泛应用于各个领域。并且由于良好的切削性能和力学性能已成为轴类、传动类零件的首选材料之一。但是随着时代的发展，人们对于45钢性能的要求不断增加，45钢经过一般的热处理后表面硬度往往达不到齿轮、轴类等零件所需要的硬度和耐磨度。激光表面淬火可以很好的改善这一不足。

本文基于当下主流的“实验加模拟”的研究方法对45钢激光淬火的温度场进行模拟，对高斯热源进行两次修正，得到在一定参数范围内符合实验室激光器的热源模型，并与实际45钢激光表面淬火实验所得到的相变硬化区深度相互验证的方法，验证模拟的可靠性并探究三个参数对淬火的影响。

1.2 激光淬火技术

激光淬火技术是一种激光加工技术，又称为激光相变硬化。这种方法主要作用于工件的表面，可以很好的改善材料及零件的耐磨性、耐蚀性尤其是能够大幅度提高材料的表面硬度和高温性能，同时可以保持齿轮零件心部具有较好的韧性。例如对钢管内壁的表面硬化、高精密刀具的刃部硬化、缸体和缸套的表面硬化等。以上例子都表现了激光淬火技术越来越受到人们的重视，在制造业中得到了一定的应用和发展。

1.2.1 激光淬火原理

激光淬火技术是以高能量密度（ $10^4\sim 10^5\text{W/cm}^2$ ）激光作为热源快速扫描工件，通过热传递的方式，使金属或合金表面以极快的速度（温度上升速度可达到 $10^5\sim 10^6\text{°C/s}$ ）上升到高于相变点和低于熔点的温度，等到激光离开被照射部位时，处于冷态的基体使其迅速冷却进行自冷淬火（冷却速度可达 $10^4\sim 10^5\text{°C/s}$ ），从而实现金属或合金的表面硬化过程。激光淬火过程也可以很好的用CCT(过冷奥氏体连续转变)曲线来解释。如图1-1所示。

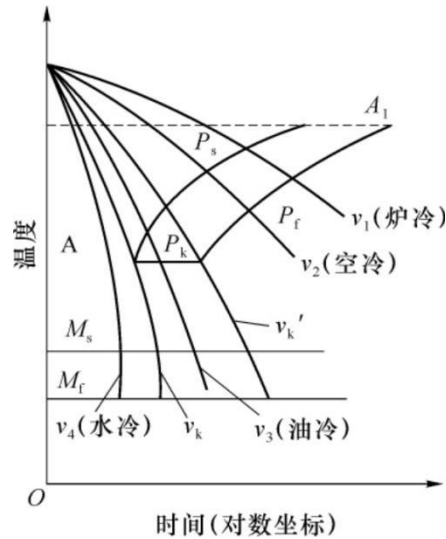


图1-1 CCT曲线

根据激光淬火的理论机制，当激光光束作用于工件表面时，激光通过热传导机制向表面进行热传递，使表面温度迅速达到奥氏体转变温度 A_{C1} 或者 A_{C3} 以上，完成奥氏体化，在表面形成奥氏体组织。当激光离开该位置时，由于工件自冷速度极快，远大于传统淬火中获得马氏体的临界速度 V_k ，故不需要其他的工序就可以完成从奥氏体到马氏体的相转变过程。

1.2.2 激光淬火优势

激光淬火相较于传统热处理淬火有独特的优势。经过传统热处理淬火后的工件往往存在工件变形量大、氧化脱碳程度严重、过热过烧产生的晶粒粗大等淬火缺陷，这些缺陷会对工件的性能产生恶化。激光表面淬火是快速加热、快速自我冷却的淬火过程，不仅可以很好的避免上述缺陷的产生，而且具有以下优点：

(1)激光淬火过程十分迅速。由于高的加热速度和自冷速度，整个过程可在0.1s内瞬间完成，生产效率很高。

(2)强化效果十分明显。由于是在快速加热和冷却下完成的，所以得到的硬化层组织较细，硬度也高于传统淬火后的硬度，硬度可比传统淬火高出15%~20%。

(3)激光淬火操作过程简单，可控性强。激光淬火配有特定的数控系统，操作简单且自动化程度高，可以实现工艺的精准度和稳定性。

(4)激光淬火工艺绿色清洁。由于激光淬火是依靠工件自冷完成淬火过程，故不需要水、油等冷却介质，避免环境污染。

(5)激光淬火后的工件变形程度小，表面几乎没有氧化和脱碳的现象，并且光滑。可以成为为工件加工的最后一道工序，相较于传统淬火，不需要进行高温回火的调质处理。

(6)能够对特殊位置进行局部淬火。由于激光束光斑小，淬火后的相变宽度小，不需要对非淬火部位防护，生产方式灵活。

1.3 温度场有限元数值模拟方法

在激光淬火的过程中，热力学和动力学变化过程十分复杂，并且受到很多因素的影响，包括激光热源的光束情况、输出功率、扫描速度、离焦量等工艺参数，与周围环境的热辐射及热对流等。并且热物性参数也会随着温度的变化而变化。想要准确无误地求解出激光淬火过程的温度场变化十分困难，甚至不可能。至今没有一种现有模型可以准确求解出其温度场变化过程^[4]，只能对激光淬火温度场进行数值模拟，运用有限元方法近似求解。数值模拟研究不仅可以用于激光淬火技术规律的进一步探究，还可以预测激光淬火的实验结果，得到最佳的性能参数组合，极大的节约了实验成本及人力物力^[5]。

有限元分析方法首次由克拉夫(Clough)教授在20世纪60年代提出，他将有限元分析形象地描述为：Rayleigh Ritz method(求泛函极小问题的极小化序列的一种直接方法)加分片函数。即将函数定义在简单几何形状单元域上，不考虑整个定义域复杂的边界条件^[6]。这也是有限元分析方法优于其他近似方法的原因之一。有限元法(FEM)是通过将物体在空间上进行特定的离散化实现的，即构建该物体的网格单元，使解决方案的数值域成为有限数量的点。每个点对应着一个相应的代数方程组，接着将所有点的代数方程组合成一个对整个问题进行求解的较大方程式系统，然后通过最小化关联的误差函数，使用来自变异演算的变异方法来近似求解^[7]。随着网格划分的数量增加，插值函数的精度提高，模拟得到的近似解就会更加精确，越接近实际值。

有限元分析方法适用于解决具有复杂边界条件或复杂几何形状的问题。随着现代工程对计算精度要求的不断提高，技术问题日趋复杂，尤其是在航天工业和军事工业当中，这类问题更加明显，而有限元分析方法是解决这类问题的快捷方法，并且已经被广泛使用^[8]。

1.4 激光淬火有限元模拟研究的国内外研究现状

国内激光淬火的有限元数值模拟研究最早开始于上世纪80年代中后期。但是近些年来，随着电子计算机的广泛应用和飞速发展，计算机与材料专业的交叉融合，其中一些与表面淬火数学模型相关学科方法，如计算传热学、热弹塑性理论、相变原理、有限元法等在我国都进行了较深入的研究，并取得了许多重大成果和突破性进展，为表面淬火计算机模拟技术的发展提供了宝贵的参考。

吴钢^[9]、石娟^[10]提出了激光表面淬火温度场和硬化层分析的简易模型，即将模型简化为非稳态二维半无限大固体的热传导问题进行分析，并通过实验加以校验，证明了该模型的可行性。管一弘^[11]等在激光表面淬火实验的基础上，根据热弹塑性理论及相变理论使用有限元法对淬火过程中的温度场、相变组织结构和材料性能进行了数值模拟分析，得到了最佳的工艺参数，很好的预测了材料性能变化。

激光淬火中最重要的过程是热传导。许多外国专家建立了各种不同的分析模型，对于边界和初始条件做出了一定的简化，并有着一定的适用范围。Anthony^[12]的三维热传导模型运用格林公式法，很好的呈现了GaussHeat的温度分布情况；Chande^[13]考虑了热源的空间分布、相变潜热、辐射热损失和对流等影响因素，用数值计算方法分析了激光热处

理的三维传热模型，推动了三维激光热处理模型分析的研究进程。法国的Bruycker^[14]用非线性有限元分析软件分析了激光表面淬火过程中以及处理后材料变形和内应力，建立了激光淬火时的温度和热应力三维模型。

许多国内外学者^[15-17]都对激光表面淬火创建了相应的热源模型进行分析，但这些模型或多或少都存在一些不足之处，不能完全呈现实际情况。模拟结果和实际结果相校验时总会存在些许误差，二者无法完全对应。不考虑人为误差，主要表现在以下方面：

(1)忽略了材料热物性参数随着温度而改变情况，通常将热物性参数设为定值。

(2)材料表面对激光的吸收率受多种因素的影响，且难以测定或用某个特定的表达式所表示。

(3)无法测量激光表面淬火过程中真实的温度场情况，与计算机模拟的理想结果存在较大误差。

(4)在模拟中通常将其温度场视为稳态温度场，并没有对非稳态温度场加以考虑。

(5)激光表面淬火是一个包含温度相变、热应力、应变之间相互作用的非线性热弹塑性的复杂过程，在有限元计算分析过程中迭代计算很多，要进行大量的计算，而尚未找到既能保证计算精度又能减少计算机求解时间的方法。

综上，激光表面淬火是一个复杂的过程，目前没有现成的数学模型能够完整的反应激光淬火过程，使得模拟和实验所得数据完全匹配。但随着传热学、相变热力学、动力学、材料计算等相关学科的快速发展，激光淬火的模拟过程和有限元数值分析亦将愈发完善，结果也会更加精确。

1.5 课题主要研究内容及技术路线

45钢是工业上常用的钢种，也是非常适合激光淬火工艺的材料之一。本文以45钢激光淬火过程为研究对象，基于热弹塑性理论、相变动力学热力学及传热学等对其温度场进行模拟，以相变硬化区深度为指标，验证模拟的准确性。

课题主要工作及内容如下，总流程图见图1-2。

(1)对45钢进行激光淬火

以热源拟合、验证为目的设计实验，制定功率-扫描速度-离焦量参数组合。经过大量预实验，获取23组有效参数组合，即45钢淬火过程中不会产生熔化的参数组合。将23份试样，根据不同目的分为三组。通过切割、制样、拍摄金相照片，获取三组试样的相变硬化区深度，作为热源修正拟合、验证的数据样本。

(2)基于Abaqus对45钢激光淬火温度进行模拟

根据固态的三维瞬时热传导微分方程，基于Abaqus的环境下，建立三维有限元分析模型，以Jmatpro软件作为辅助，对45钢相关热物性进行模拟，编写Fortran热源子程序，考虑接近实际的加载条件，并对整个激光淬火的瞬态温度场进行模拟。通过对后处理结果进行分析，探究激光淬火过程中的规律性。并获取模拟计算的相变硬化区深度。

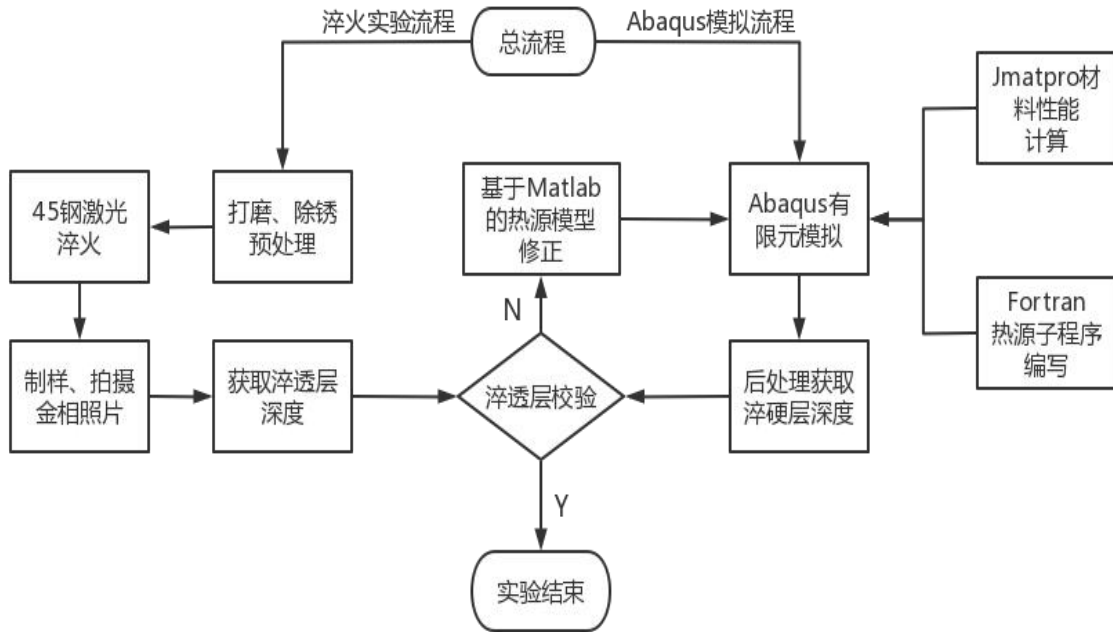


图1-2 实验流程

(3)基于Matlab数学模型对热源进行两次修正

由于模拟计算所得相变硬化区深度和实验所得相变硬化区深度相比，二者误差较大。参考相关文献，进行合理分析、假设，决定基于Matlab中的数学模型对热源进行两次修正。第一次修正主要是通过多元线性回归拟合的方法，探究了吸收率 η 和 $p-v$ 组合之间的关系，并绘制“吸收率 η 检索表”，方便后续进行模拟、修正等环节。第二次修正主要是通过二次多项式拟合，探究离焦量和光斑直径之间的关系。并安排四组验证实验，以相变硬化区深度为指标，控制误差在10%范围之内，以保证修正后热源的可靠性。修正流程如下图1-3所示。

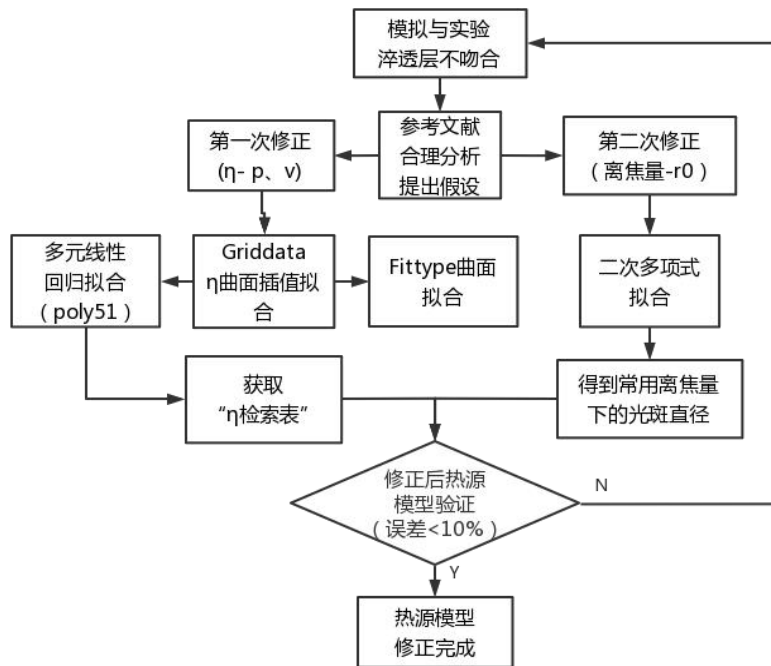


图1-3 热源修正流程图

1.6 创新点

在阅读文献的过程中，发现大部分学者在进行激光淬火有限元模拟的过程中并没有太关注热源模型的适配情况，并且大多数热源模型采用的是矩形光斑。本文针对实验室 Laserline-Ldm3000 半导体激光器的特征，以 Gauss 热源作为热源模型，并利用 Matlab 数学模型对影响淬火的相关参数，即功率 p 、扫描速度 v 、光斑半径 r_0 和吸收率 η 进行修正拟合，从而完成对 Gauss 热源的修正，使模拟结果更加精确，更符合实验室激光淬火的实际情况。本课题提供了一种新的提高模拟精度的研究思路和实验方法，为课题组之后做模拟实验奠定基础、积累经验，这也是本文的意义所在。

第二章 45钢激光淬火的理论基础及实验

2.1 激光淬火的传热学理论基础

当激光束在材料表面作用时，可以把金属表面的吸收层视为一个表面热源。在材料表面不产生熔化的情况下，表面热源通过热传递的机制向基体内部传递热能，使基体材料被加热^[3]。热传递的方式主要有以下三种：热传导、热对流和热辐射。

(1)热传导：指两个温度不同的物体相互接触，或者同一个物体不同温度部分在不产生相对宏观位移的条件下实现热量传递的过程。热传导是自发发生的。对于固体和液体物质，热传导是通过分子或原子间的碰撞传递热能的。由于气态分子的自由度很高，其次热传达导能力相对较差，但在温差足够大，行程足够远等条件下仍能显著表现出热传导现象。热传导是固体传热的主要方式，其规律符合傅里叶定律，又称为导热基本定律，可用式（2-1表示）。

$$q = -k \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-1)$$

式中 q 为热流密度，指单位时间内通过特定面积的热量，单位为 W/m^2 ； k 为物质的导热系数；一阶导为温度梯度，负号则表示热量传递的方向与升温方向相反自然对流发生在流体受到重力作用或温度差的驱动下，而强制对流是通过外因（如泵、风扇等）施加的力使流体产生流动的对流形式。发生相变时产生的对流。

(2)热对流：指流体（液体或气体）在温度梯度的作用下产生流动，将热量从高温区向低温区传递的过程。热对流通常分为自然对流和强制对流两种。自然对流发生在流体受到重力作用或温度差的驱动下。而强制对流是通过外因（如泵、风扇等）施加的力使流体产生流动的对流形式。物体的对流可以用牛顿的冷却公式，式（2-2）解释。

$$\frac{dT}{dt} = -k\Delta T \quad (2-2)$$

其中一阶偏导表示 t 时间内温度的变化率，单位为 K/s ； ΔT 表示物体与周围介质的温度差； k 表示牛顿冷却系数，表示物体和周围介质之间热传递能力，单位为 $W/m^2 \cdot K$ 。

(3)热辐射：热辐射是指物体在温度不同的情况下，通过发射的电磁辐射将能量传递给周围空间的过程。热辐射不需要介质作为传递媒介，可以在真空中传播。物体辐射和吸收的本领随着温度变化，但是绝对黑体可以吸收辐射在其表面的一切热能，具有相同温度下其他物体无法比拟的吸收和辐射本领，并且实际物体所发出的辐射能可用式（2-3）表示。

$$I = K\sigma T^4 \quad (2-3)$$

其中 I 代表辐射强度， K 为辐射率，取值在0~1之间； σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数，其数值为 $5.67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ， T 为温度，单位为 K 。

由于激光淬火过程是在固态下进行的，故激光作用于物体表面时产生的温度场遵循固体导热微分方程，如式（2-4）所示。

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + q^m = \frac{\partial T}{\partial t} \rho c \quad (2-4)$$

其中X,Y,Z为三维空间坐标， λ 为材料的导热系数，单位为W/m $^{\circ}$ C；c为材料的比热容，单位为J/kg $^{\circ}$ C； q^m 为材料的相变潜热，单位为J/mol；t为时间，单位为s； ρ 为密度，单位为kg/m 3 ；T为三维瞬态温度场。由于密度，热导率，比热容等热物性参数是随温度变化而变化的，故使用Jmatpro软件计算45钢热物性，并对单位进行统一处理后导入Abaqus材料属性之中。参数具体数值见第三章第3.2.2节。该热传导微分方程说明单元内部升温所需要的热量（等式右侧）要与单元内部热源生成的热量及传入单元的热量相平衡（等式左侧）。如果确定实际激光淬火时的边界条件及初始条件，可以将此温度场热物理问题转化为数学的偏微分方程定解问题，从而得到温度场的分布。

综上，可以确定激光淬火过程时一个复杂三维瞬态热传递问题，在热传导微分方程的求解过程中，可以将室温25 $^{\circ}$ C定义为初始条件，热对流看作是边界条件，同时忽略热辐射的作用^[18]。

2.2 激光淬火的影响因素

在激光淬火的过程中，影响淬火效率的因素有很多包括材料自身对激光的吸收效率，激光器自身的性能参数及工艺参数等。本节主要考虑三个工艺参数：光斑直径，输出功率，扫描速度对激光淬火结果的影响。

(1)光斑直径：光斑直径主要是通过调整离焦量而改变的。在相同的光斑直径下，焦点内侧的温度往往高于外侧，故激光作用于工件表面时，工件各部分温度并不是相同的，在材料表面各部分温度不均匀及自冷速度不同的条件下，激光淬火形成的淬硬层呈现月牙状，如图2-1所示。在相同的输出功率和扫描速度下，光斑直径越大，功率密度越低，硬化层越浅；光斑直径越小，功率密度越高，硬化层越深。并且光斑直径的大小直接影响淬透层宽度。

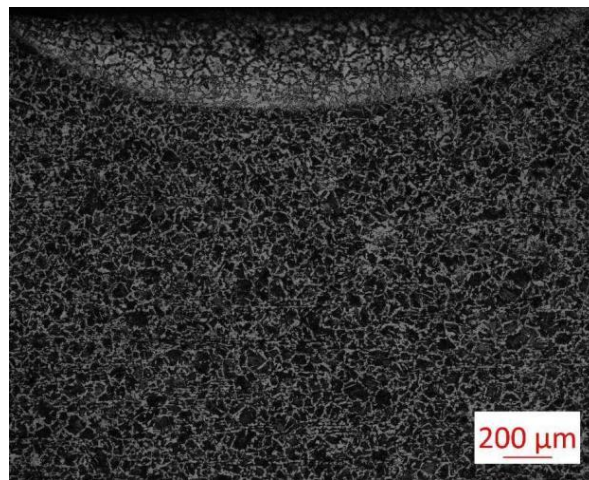


图2-1 试样1激光淬火后组织（50倍）

(2)输出功率（后文都简称“功率”）：在光斑直径和扫描速度相同的条件下，功率越大，相变硬化区深度就越深。但是在相同的功率条件下，光束的形状也会对激光淬火

效果产生影响。例如矩形光斑由于形状均匀，更适用于激光淬火工艺当中，双椭球热源更适用于激光熔覆工艺之中。

(3)扫描速度：扫描速度实际上反映了激光束在材料表面作用的时间，在光斑直径和功率相同的条件下，扫描速度越低，代表激光在材料表面作用的时间就越长，温度就越高，材料表面也更容易熔化，硬化层深度就越深；反之，扫描速度越快，硬化层深度就越浅。

综上，激光淬火的硬化层深度与三个参数的关系可以由式（2-5）表示：

$$\text{硬化层深度 } H \propto \frac{\text{激光功率 } P}{\text{光斑直径 } D \cdot \text{扫描速度 } V} \quad (2-5)$$

2.3 激光淬火实验流程

(1)对试样进行预处理，将试样切成4块尺寸为 $12 \times 8 \times 2\text{cm}$ 的小块。并用角磨机去除表面锈迹。

(2)将试样放置于激光置物台上，并在Kuka机器人上编好程序，使激光沿着图2-2所示方向进行淬火，淬火距离为6cm。单道激光淬火示意图如图2-2所示。

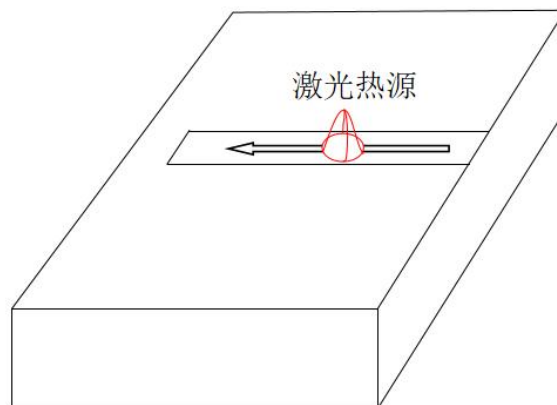


图2-2 激光淬火示意图

(3)每道淬火完后等待10~15分钟，待试样充分冷却后再进行下一道淬火。防止淬火过程中产生的热积累对实验结果造成影响。每道间隔为1cm，每块试样淬8-9道。

(4)待全部试样淬火完成后，使用线切割机对试样中间位置进行切割取样，并用激光打标机做好标记。

(5)在蔡司显微镜下拍摄每块试样淬火后的截面金相图，如图2-1所示。随后根据等比法测量其相变硬化区深度，做好记录，作为后续模拟的数据样本。

2.3.1 试样的原始条件

本实验所用材料为退火态45钢长方体块，组织为铁素体F和珠光体P，如图2-3，图2-4所示，其中黑色部分为片状珠光体，白色部分为铁素体。其化学成分（Jmatpro计算时的化学成分）如表2-1所示。

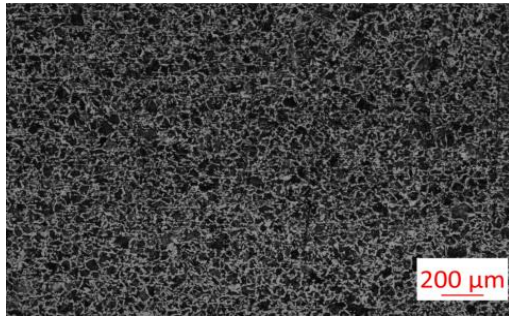


图2-3 45钢退火态组织（50倍）

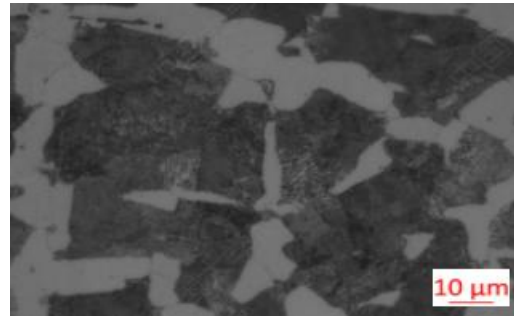


图2-4 45钢退火态组织（1000倍）

表2-1 45钢化学成分

元素	C	Cr	Cu	Mn	Ni	Si
含量/wt%	0.45	0.25	0.2	0.5	0.2	0.2

2.3.2 实验参数及相变硬化区深度

激光淬火实验主要是调整影响激光淬火的三个参数：离焦量、功率和扫描速度，在45钢表面不出现熔化的前提下，获得不同参数组合下的相变硬化区深度作为后续Gauss热源修正的数据样本。根据修正方案，将23组试样分为以下三大组：

试样1~10号为第一组。控制离焦量为0，改变功率 p 和扫描速度 v ，作为Gauss热源第一次修正的数据样本，探究吸收率 η 和 p - v 组合之间的关系。

试样11~19号为第二组。在离焦量为10~30mm、功率为400~600W、扫描速度为10~20mm/s的参数范围内，经过大量预实验，挑选出不会使表面产生熔化的参数组合，作为Gauss热源第二次修正的数据样本，探究离焦量和光斑直径 r_0 之间的关系。

试样20~23号为第三组。从第二组参数区间内随机挑选出4组不会使表面产生熔化的参数组合，与使用修正后热源模拟结果进行校验，控制误差在10%之内，保证修正后热源的可靠性。

表2-2 第一组实验数据

试样编号	离焦量/mm	功率/W	扫描速度/mm/s	相变硬化区深度/mm
1	0	400	10	0.257
2	0	400	12	0.204
3	0	450	12	0.306
4	0	450	14	0.297
5	0	500	14	0.313
6	0	500	16	0.148
7	0	550	16	0.210
8	0	550	18	0.237
9	0	600	18	0.303
10	0	600	20	0.205

表2-3 第二组实验数据

试样编号	离焦量/mm	功率/W	扫描速度/mm/s	相变硬化区深度/mm
11	10	400	10	0.264
12	10	450	12	0.184
13	10	500	14	0.289
14	20	450	12	0.235
15	20	500	14	0.277
16	20	550	16	0.184
17	30	500	14	0.217
18	30	550	16	0.203
19	30	600	18	0.157

表2-4 第三组实验数据

试样编号	离焦量/mm	功率/W	扫描速度/mm/s	相变硬化区深度/mm
20	15	450	12	0.283
21	15	500	14	0.293
22	25	500	14	0.237
23	25	550	16	0.172

表2-5 各离焦量所测光斑直径

离焦量/mm	光斑直径/mm
0	2.80
10	3.24
15	3.42
20	3.56
25	3.65
30	3.76

2.3.3 淬火后组织分析

根据前面讨论45钢在激光淬火后表面硬度大幅提高是产生了马氏体相变，现对淬火后45钢组织进行分析。45钢激光淬火后组织从表面到内部可分为三部分：

(1)表面硬化区，如图2-5所示，该区由隐晶马氏体组成，硬度可达800HV以上。相较于传统淬火硬度高出15%~20%。

(2)过渡区，如图2-6所示，该区也称为热影响区，主要是由混合马氏体，屈氏体及未熔铁素体组成，主要是受温度梯度及冷却速度影响，显微硬度也由高到低变化。其中白色部分为未熔铁素体，上面部分为混合马氏体。

(3)基体区，如图2-4所示，由原始态的珠光体和铁素体组成。

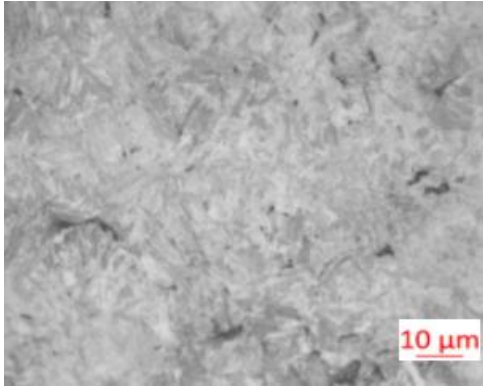


图2-5 表面硬化区(1000倍)

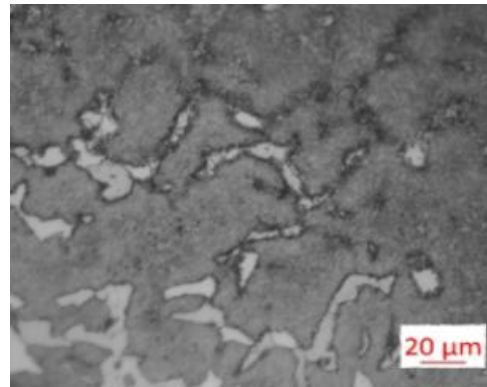


图2-6 过渡区(500倍)

2.4 本章小结

本章主要介绍了激光淬火的传热学原理及激光淬火过程中的影响因素。分析了淬火前后的组织，为更好的理解激光淬火过程和后续模拟部分打好基础。并且设计完善的激光淬火实验方案，为第四章Gauss热源的两次修正提供可靠的数据样本。

第三章 基于Abaqus的45钢激光淬火有限元数值模拟

3.1 激光淬火模拟软件的选择

由前两章可知，有限元数值模拟方法是将物体划分为若干独立且相互关联的单元网格，将插值基函数合理的分布在每个单元之间，利用基函数对单元进行积分获得每个单元的线性有限元方程，并整合而成该物体的线性有限元方程组，随后对该方程组离散求解，得到所有单元解的集合，即所有插值基函数的解。这些解对应分布在相应的单元网格上，故划分网格数量越多，计算量就越大，计算结果也更加精确。故本文选择功能强大的Abaqus软件对45钢激光淬火进行有限元模拟，探究激光淬火中温度场的分布情况，以相变硬化区深度为指标，验证模拟的准确性。并且选择具有强大性能仿真的Jmatpro软件作为辅助，计算45钢密度、比热容、热导率等热物性，使模拟结果更加精确。

3.1.1 Abaqus有限元分析软件及特点

Abaqus软件是由法国达索系统公司开发的一款有限元分析软件，主要用于模拟和分析复杂的结构力学问题、热分析问题和多物理场问题等。它是全球范围内使用广泛的有限元分析软件之一，被广泛应用于航空航天、汽车、能源、建筑、医疗、电子等领域。并且Abaqus软件操作相对简单，易建立复杂问题的模型进行分析。在使用Abaqus时只需要提供前处理模块中模型的尺寸、热物性参数、边界条件、载荷等数据，Abaqus会选择合适的载荷增量和收敛准则，在计算过程中会根据材料的变化情况自动调节相关参数^[19]，可以大幅提高计算的准确性。并且Abaqus带有种类齐全的材料库和单元库，可以模拟形状复杂的材料，如直升机螺旋桨、弹性泡沫、纤维增强塑料等。

本次激光淬火温度场的研究属于复杂三维瞬态热传递问题，可以通过Abaqus软件进行建模，并编写运行对应的Fortran热源子程序，后处理得到结果进行分析。本课题主要模拟流程如图3-1所示：

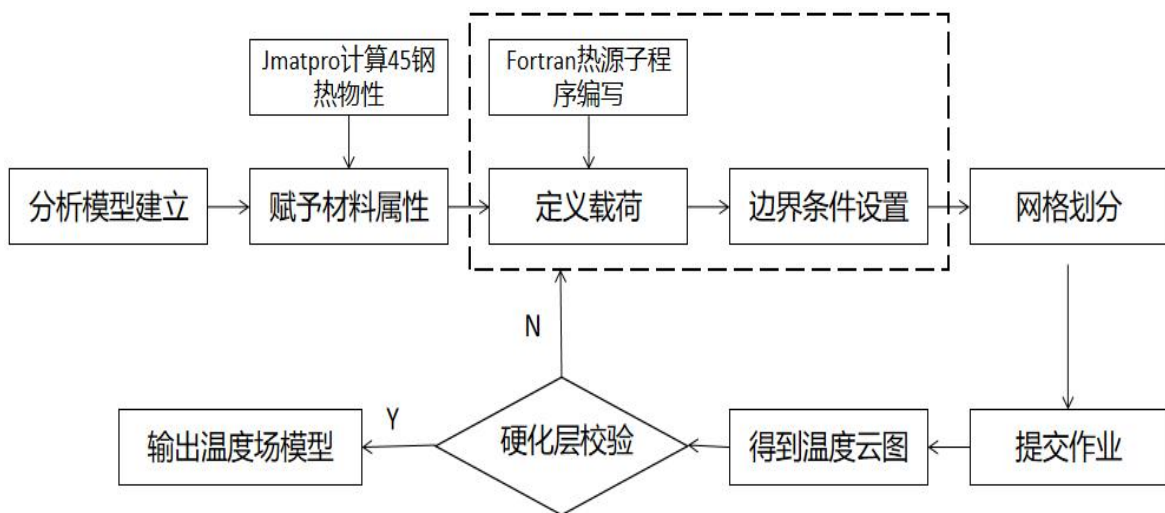


图3-1 Abaqus模拟流程

3.1.2 Jmatpro软件及特点

Jmatpro软件是由Sente Software公司研发的一款用于金属热处理模拟和设计的软件。基于材料的多样性，Jmatpro软件可以对多种材料性能进行计算，主要功能包括但不限于：

(1)预测材料性能：Jmatpro可以预测材料的物理、力学和热力学性质的变化，包括密度、相变潜热、热导系数、塑性应变、强度、疲劳寿命、热膨胀系数等。

(2)金属材料的热处理模拟：Jmatpro可以预测金属材料在热处理过程中的组织结构和性能变化，如传统热处理中淬火、回火、时效等，材料的晶体结构、相变和孪晶产生等。

(3)优化材料设计和热处理工艺：Jmatpro可以帮助设计者通过均匀化组织、减少残余应力等方法，优化材料设计和热处理工艺。同时还可以优化热处理过程中的时间、温度、冷却速率和回火条件等参数。

由于本文研究的对象是45钢，一种常见的中碳钢，因此可以用Jmatpro材料库中45钢成分进行相关性能（密度、热导率，比热容）计算，化学成分见表2-1。Jmatpro计算45钢热物性参数原理为：将密度、热导率、比热容等参数随温度变化的热力学模型视为性能-温度-成分之间的函数表达式，确定材料的成分之后，以温度为自变量，热物性参数为应变变量进行求解。

3.2 有限元模拟相关参数的确定

3.2.1 激光淬火热源的选取

目前激光淬火中最常见的两种光源形状有矩形热源和圆形光源，而双椭球热源模型常用于焊接中。圆形光源大多出现在CO₂激光器中^[20]，例如CO₂-ULR10激光器。圆形光源大多利用高斯（Gauss）分布函数来描述光斑区域内热能密度分布状态。圆形光斑在淬火过程中，由于热能分布不均匀，导致淬火硬化层中心区域与边界层相差较大，会影响淬硬层分布均匀性和淬火质量^[21]。矩形光源的形成在圆形光斑的基础上经过积分镜的聚焦，其内部功率密度较为均匀，中心区域与边缘区域热量密度差异不大大^[22]。相较于圆形光源，矩形热源内的热量密度分布更加均匀，中心与边界的热量差也更小，更适合激光淬火工艺，可以提高激光淬火的质量。

实验室中的激光器为Laserline-Ldm3000半导体激光器。根据激光器说明书上热源图形显示，初步采取圆形光源，即Gauss热源作为模拟的热源模型。由早期预实验及模拟结果验证结果得，如果采用Gauss热源作为热源模型，实验结果会与模拟结果存在较大出入，说明高斯热源并不完全实验室激光器热源模型。故需要对高斯热源进行修正，使模拟结果更符合实验结果。该部分内容会在本章3.4节中详细说明。

3.2.2 材料热物性计算

在Abaqus软件对激光淬火模拟的步骤中需要对模型赋予材料属性，为了提高模拟的精确度，故使用Jmatpro软件对45钢的热物性进行模拟计算，并经过单位统一化处理后导入Abaqus中。在Jmatpro材料库“General Steel中”选择“45”输入45钢材料成分，各元素比列如图3-2所示，对应第二章表2-1。

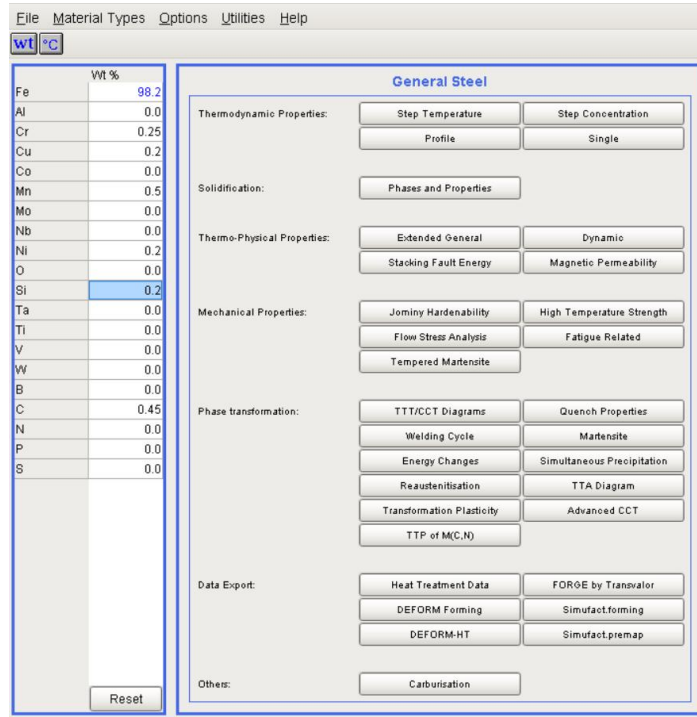


图3-2 Jmatpro45钢成分输入栏

随后通过“Phases and Properties”模块，模拟计算45钢的热密度、比热容、热导率和热膨胀系数的热物性参数随温度变化的数值曲线。如图3-3所示：

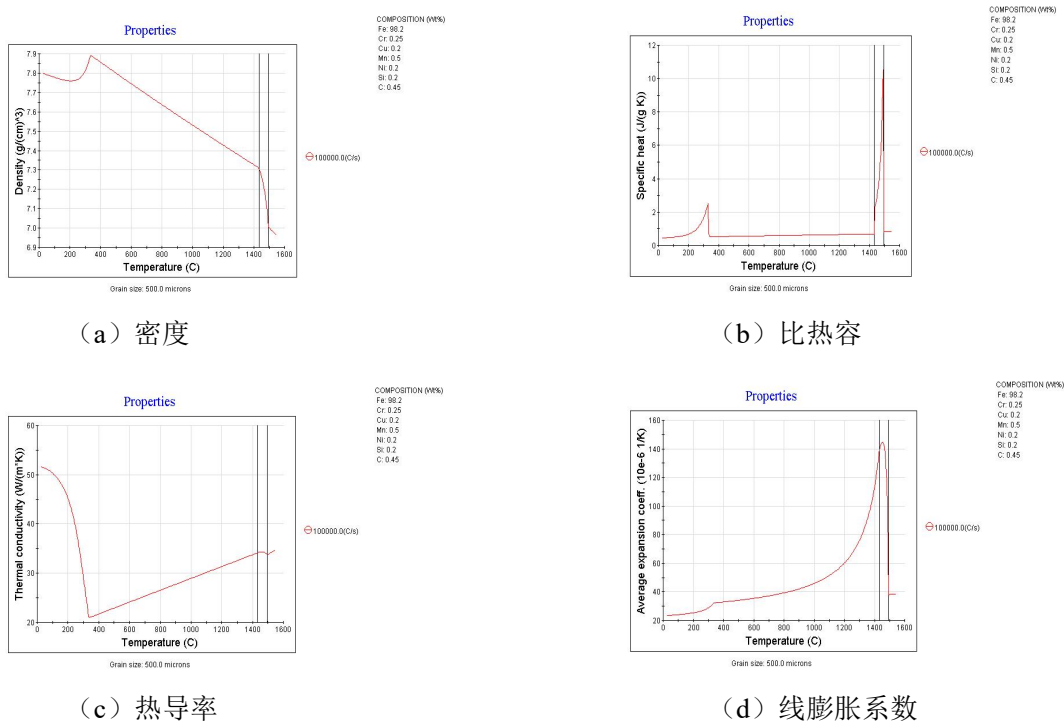


图3-3 45钢热物性参数

在温度场模拟中对于材料相变潜热，即奥氏体向马氏体转变时的潜热的考虑基于热物性参数的设置，但是在随温度变化的热物性参数下，可以利用比热容作为相变潜热变化的参考，通常认为比热容随温度的变化已经包含了相变潜热的变化^[23]，故在模拟过程

中不考虑相变潜热的影响。本次模拟计算已经算出45钢比热容随温度的变化过程，即在淬火过程中已经考虑了相变潜热的影响。

根据Abaqus软件的“无单位”的特点，需要人为的“选择”一组量纲作为Abaqus模拟的单位，并且以Abaqus单位为标准，对Jmatpro模拟计算得到的热物性参数进行单位统一化，避免模拟结果出现较大误差。为了后续对模拟结果进行分析的方便，选择SI国际单位作为本次模拟的单位，部分单位如表3-1所示。

表3-1 Abaqus模拟软件中的统一单位

量纲	SI (m)
长度	m
载荷	N
质量	kg
功率	W
时间	s
能量	J

3.2.3 淬透层边界的确定

对于平衡态而言，45钢的相变温度为724℃。但是根据其他学者的研究在激光淬火过程中，升温速度可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ，远大于 $10^2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ， A_{c1} 有升高的趋势。产生这个现象的原因有两个：(1)产生新相需要孕育时间；(2)在快速升温的过程中，吸收相变潜热需要一些时间，这两点共同作用使得 A_{c1} 的值升高。激光淬火过程属于非平衡态，由于 A_{c1} 的值升高，材料的相变温度和熔化温度都要高于平衡态。根据先前学者的研究发现，45钢激光淬火过程中相变温度为800℃~900℃。故本文的45钢完全奥氏体化温度为850℃，熔化温度设置为1600℃。

3.3 激光淬火的有限元数值模拟

Abaqus模拟仿真主要分为三大部分：前处理，加载计算和后处理。其中前处理包括材料的建模、模型的假设条件、赋予模型材料属性、网格的定义和划分等。加载计算需要考虑激光淬火温度场的初始条件、设定分析步步长及后处理输入结果类型、定义载荷类型即Fortran语言编写的热源子程序等。后处理输出单元节点温度场并对输出结果进行分析等。接下来将对以上内容进行详细说明。

3.3.1 前处理

1. 材料的建模及假设条件

淬火试样尺寸为 $12 \times 8 \times 2 \text{ cm}$ 的长方体，建模模型如图3-4。建立完模型后，结合热力学相关理论，对激光淬火中的模型做出以下假设条件：

(1)将45钢视为各向同性的材料，并且在激光淬火过程中热物性参数会随着温度的变化而变化，忽略相变潜热的影响。

(2)在激光淬火开始前，材料具有完全相同的初始温度25℃，并且以边界条件定义热对流的影响，忽视热辐射的影响。

(3)由于实际实验中激光的淬火长度为6cm，小于试样长度8cm，激光光束并未离开试样表面，在淬火结束时由于热量的剧烈变化，会导致在淬火结束处产生瞬时强烈的热积累，在光源内甚至会出现熔化现象，如图3-5红色框线部分所示。Abaqus在模拟过程中无法反应此特殊现象，故忽略该特殊情况对温度场的影响。

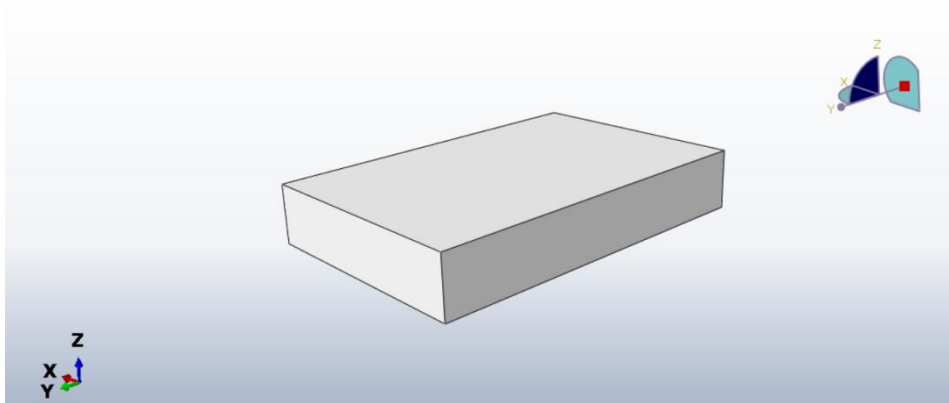


图3-4 Abaqus软件中淬火工件的建模模型

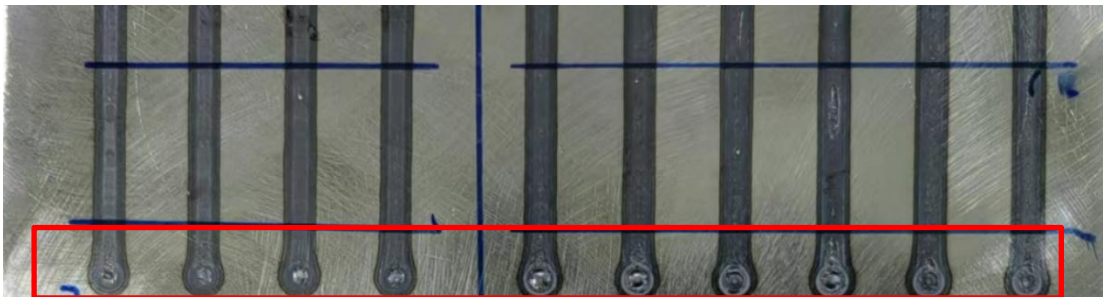


图3-5 部分激光表面淬火试样

2.赋予模型45钢材料属性

为了减少Abaqus的计算时间，设定初始温度为25℃及临界熔化温度为1600℃，并且从100℃开始，每隔100℃设定一组参数，一直到1600℃为止。共计17组数据作为作为45钢的热物性导入Abaqus中。Jmatpro原始数据导入Excel中对四类数据进行单位统一化处理（如将密度单位由g/cm³，修改为kg/m³）并且将密度、热导率、比热保留整数，线膨胀系数保留2位小数，结果如表3-2所示，输入Abaqus材料属性如图3-6所示。

表3-2 45钢热物性参数

温度 /℃	密度 /kg/m ³	热导率 /W/m·k	比热 /J/(kg·K)	线膨胀系数 /1/K
1600	7005	34	809	3.82E-05

表3-2 (续)

1500	7218	34	765	2.45E-05
1400	7326	34	691	1.13E-04
1300	7377	33	675	7.59E-05
1200	7428	31	660	6.02E-05
1100	7479	30	646	5.15E-05
1000	7531	29	628	4.60E-05
900	7584	28	613	4.22E-05
800	7637	27	597	3.94E-05
700	7691	25	582	3.72E-05
600	7745	24	567	3.55E-05
500	7800	23	551	3.42E-05
400	7856	22	535	3.30E-05
300	7811	29	1653	2.90E-05
200	7760	45	679	2.54E-05
100	7778	50	502	2.41E-05
25	7798	52	453	2.34E-05

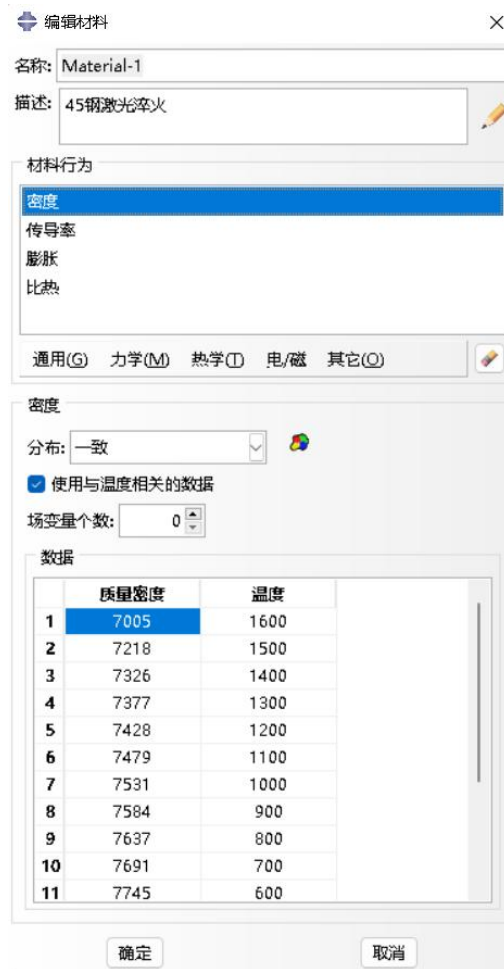


图3-6 Abaqus输出材料属性

3.模型网格划分

根据Abaqus的计算原理可知，运用Abaqus对激光淬火温度场进行模拟，本质上是对每个节点处的平衡方程进行求解，所以网格的划分将直接影响模拟计算结果的精度。由于选取Gauss热源作为热源模型，热能分布不均匀且激光扫描区域内温度梯度变化大，相反在基体区，由于热量来不及传递，所以温度梯度很小。因此，划分网格时不能以单一的形式进行，而采取“2进1”过渡法对网格进行划分，即在中心淬火部位划分尺寸为0.001m的网格，而在淬火区域外划分尺寸为0.002m的网格，在淬火区与外部区域的交接位置采用过渡网格进行衔接，过渡区网格如图3-7所示。同时设置网格的单元类型为DC3D8线性热传递，模型网格划分如图3-8所示，单元总数为28000个。

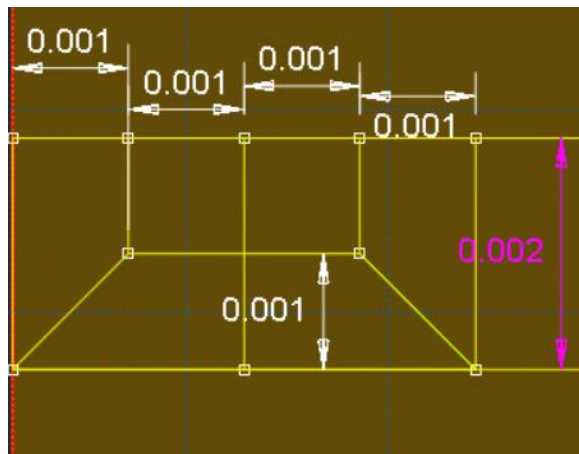


图3-7 “2进1”过渡网格尺寸

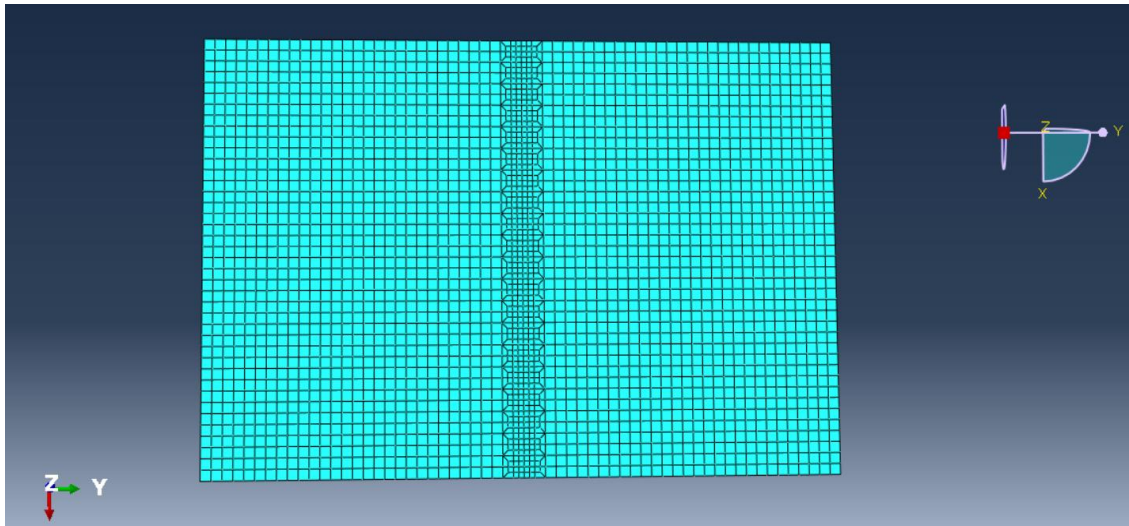


图3-8 模型网格划分

3.3.2 加载计算

1. 初始条件与边界条件

设定模型的边界条件时，首先设定试样周围环境温度相同为25℃，即各个节点在 $t=0$ 时，施加25℃的初始温度条件，由式3-1表达。

$$T(x, y, z)_{t=0} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-1)$$

由第二章可知，试样在激光淬火的过程中，试样与周围环境热量传递的方式为热对流，而忽视热辐射的影响。试样表面与空气中流体对流时的热量转移系数目前还无法通过实验测量或是根据理论计算出来，参考之前学者的处理方法，为方便计算，通常将热系数简化为常量，取值为 $10\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ^[24]。

2. 设置分析步

在Abaqus模拟的过程中，分析步时间步长大小的设定也会直接影响最后模拟结果的精度。与模型网格的划分类似，分析步步长设置的越小，模拟计算的精度就越高，但模拟计算的时间也越长。分析步步长设置的越大，模拟计算的精度就越低。为了保证模拟数据结果的可靠性，并节约时间，故将分析步步长设置为0.01s。同时将程序类型设定为热传递。

3. 热源子程序的编写及加载

Abaqus在模拟激光淬火的过程中，需要加载用户自定义的DFLUX热源子程序。由上文第3.2.1节可知，选取Gauss热源作为热源模型对45钢激光淬火的过程进行有限元模拟。假设热源沿着x轴移动，当 $t=0$ 时，热源在 $x=0$ 处。Gauss热源的表达式如式(3-2)所示。

$$flux(1) = \frac{\eta p}{\pi r_0^2} \exp\left(-\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2\right) \quad (3-2)$$

其中 r_1 表示试样表面任意位置到光源的距离，由式(3-3)、式(3-4)所示。

$$r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2 + y^2} \quad (3-3)$$

$$x_0 = vt \quad (3-4)$$

由于Abaqus的程序是由Fortran语言编写的，基于以上式公式，以表2-2试样1中参数组合为例，定义功率 $p=400\text{W}$ ，扫描速度 $v=10\text{mm/s}$ ，光斑半径为 1.4mm ，暂定吸收率 η 为常数0.7。利用Visual Studio中的Fortran编译器编写的热源子程序及相关注解如图3-9所示。

```

1      SUBROUTINE DFLUX (FLUX, SOL, KSTEP, KINC, TIME, NOEL, NPT, COORDS, JLTYP,
2          I TEMP, PRESS, SNAME)
3          INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
4          DIMENSION COORDS (3), FLUX (2), TIME (2)
5          CHARACTER*80 SNAME
6          C 固定格式不动
7          double precision ita, p, x, y, r0, t, v, x0, r1, pi
8          t=time(1)
9          pi=3.1416
10         r0=0.0014
11         ita=0.7
12         p=400
13         v=0.01
14         x=coords(1)
15         y=coords(2)
16         C 定义相关参数
17         x0=v*t
18         C x0表示热热点的位置。t=0时，表示热热点的边缘位于起点
19         r1=((x-x0)**2+(y)**2)**0.5
20         C r1表示与热热点中心距离。x, y表示表面某一点的坐标
21         flux(1)=((ita*p)/(pi*r0**2))*exp(-(r1/r0)**2)
22         flux(2)=0
23         C
24         return
25     end

```

图3-9 热源子程序

将编写好的DFLUX热源子程序调用到作业模块中，随后提交分析即可实现激光淬火的模拟过程，加载过程如图3-10所示。若材料参数赋予越准确，网格划分越密集，时间增量会在设定值0.05s上下产生波动，迭代次数也会提高，由激光淬火长度为6cm，扫描速度为10mm/s，激光淬火所需时间为6s，经过600次左右增量后，模拟过程结束，单次模拟计算的实际时间约为10分钟左右。



图3-10 模拟加载过程

3.3.3 后处理及模拟结果分析

在任意合理参数组合下，激光淬火过程的规律性不会随着参数而改变，参数的改变仅对激光淬火的数值结果（相变硬化区深度、硬化宽度）或温度场实际分布等产生影响。以上述参数组合：功率 $p=400\text{W}$ ，扫描速度 $v=10\text{mm/s}$ ，光斑半径为 1.4mm ，吸收率 η 为常数0.7下的模拟结果为例，对模拟结果进行分析。通过分析不同时刻温度场分布、不同界面下温度场分布和垂直于淬火表面不同深度的温度场分布情况，探究激光淬火过程中的规律性。

(1) 不同时刻的温度场分布

Abaqus模拟计算结束后，整个激光淬火过程的温度场变化云图可在可视化模块中用动画的方式呈现出来。温度场的颜色代表了不同的温度区间。图3-10为 $t=0.14\text{s}$ 、 1.64s 、 2.64s 、 3.64s 对应的等温云图。其中图3-11 (a) 为激光未完全进入试样表面时的温度场，图3-11 (b) ~ (d) 为激光完全进入试样表面时的温度场。

由图3-11 (b) ~ (d) 任意一图可知，热源的中心温度最高，在光斑区域内温度梯度较大，离光斑的距离越远，温度梯度则越小。如图3-11 (a) 所示，激光在未完全进入试样表面之前，表面的最高温度只有 705°C 左右，在此阶段激光并未完全作用于试样表面，并且由于热传导的作用试样进行散热而导致的。而在图3-11 (b) ~ (d) 所示阶段，激光完全进入试样表面，表面峰值温度也趋于稳定，在 1240°C 左右，在离激光热源较远位置，由于激光作用效率低，加上试样的散热和与空气发生对流作用，温度会降至最低 128°C 。

在激光扫描区的前端，出现温度升高的现象。这是因为热传导的作用使未扫描的区域预热。并且可以看出，激光热源前端的温度梯度明显高于淬火完成区域内的温度梯度。试样表面上，整个温度场呈现非对称分布的特征。

所以，当激光完全进入试样表面之前，试样表面温度场处于非稳态阶段，即表面最高温度会随着时间显著增加；在激光完全进入试样表面之后，温度场则处于亚稳态阶段，表面最高温度在1240℃上下几十度的温度范围内波动，这两点与前人实验所得结论不谋而合。并且由朱习栋^[25]、范雪燕^[26]等之前的研究可知，若激光光束扫出试样表面，由于45钢整个端面会与空气接触，通过热辐射，试样会向空气中传导能量，速度要比热传导慢很多，故会导致能量在试件的扫出端积累，使得热量大量的聚集在45钢的端面没有能够及时的消散掉，从而使得该阶段45钢表面的峰值温度明显大于前两个阶段。故温度场又处于非稳态阶段。即激光淬火过程是一个非稳态-亚稳态-非稳态的动态变化过程。

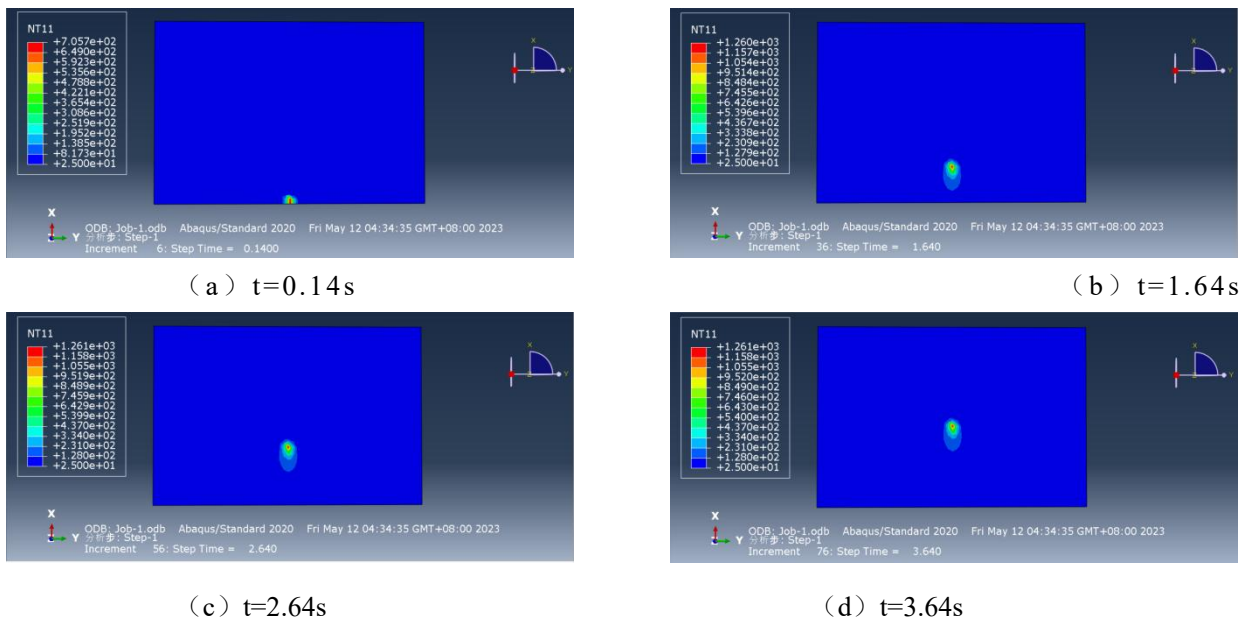


图3-11 不同时间温度场云图

(2)不同截面的温度场分布

图3-12和图3-13分别为 $t=1.64s$ 平行于激光淬火方向即沿x轴的剖面图，和 $t=4.04s$ 垂直于试样表面即沿y轴的剖面图。观察图3-12可知，激光淬火的瞬态过程只发生在很小的空间范围内，并且温度场分布并不均匀，热源前方的温度梯度大于热源后方。由图3-13可知激光淬火所产生的硬化层呈月牙状。

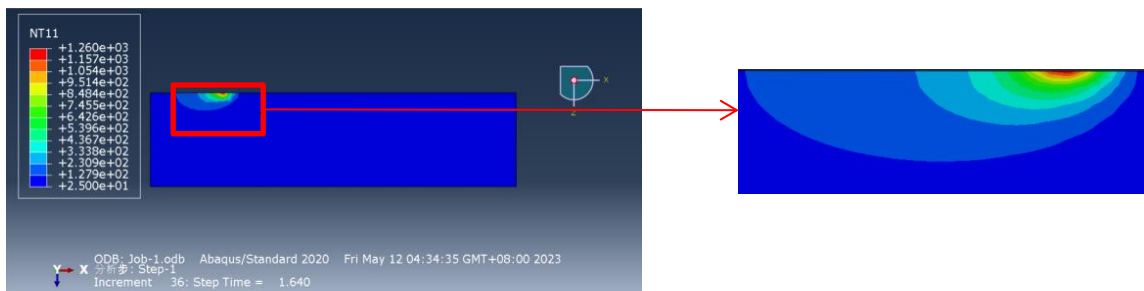


图 3-12 $t=1.64s$ 沿x轴剖面

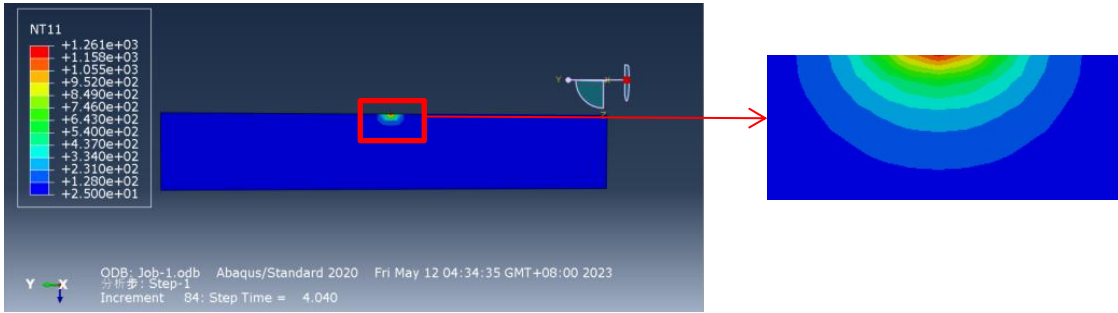


图3-13 t=4.04s沿y轴剖面

(3)垂直于淬火表面不同深度的温度场分布

在Abaqus可视化模块中，在第3.74s对模型进行路径设置，如图3-14所示，并通过“XY数据”模块绘制沿纵向层深的温度分布，如图3-15所示。由图可知，随着节点离试样表面距离加大，温度会呈线性下降的趋势。并可以由此判定模拟所得相变硬化区深度。

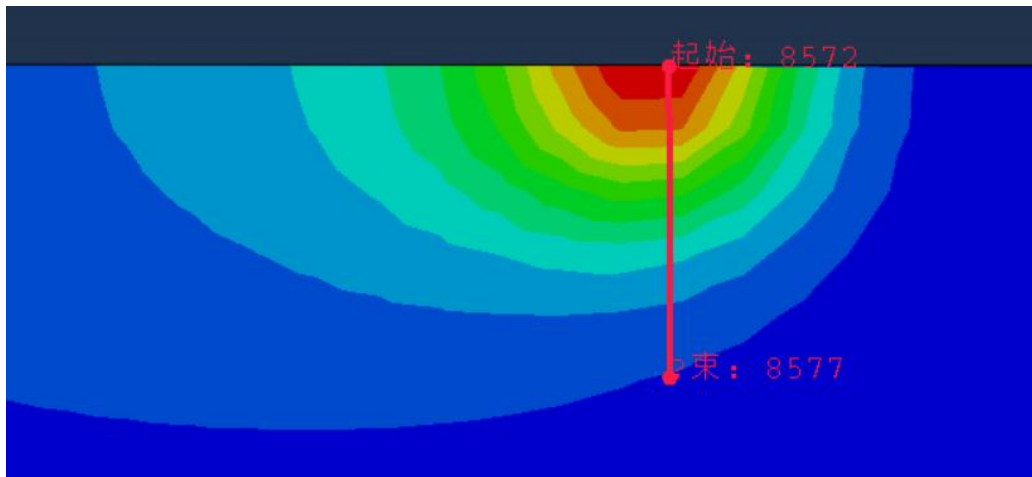


图3-14 路径设置图

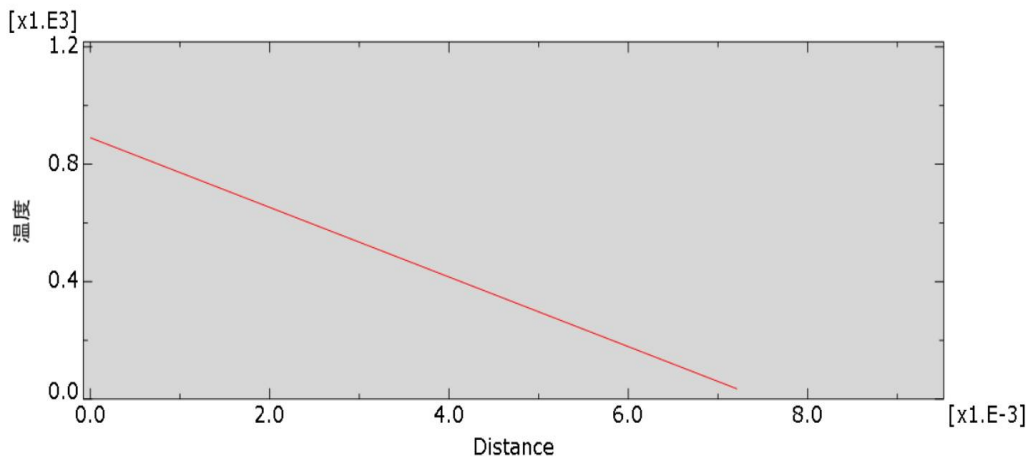


图3-15 纵向温度场分布

3.4 相变硬化区深度计算及校验

根据之前实验设定，将850℃作为45钢激光淬火过程中完全奥氏体化温度，将图3-15中的x轴坐标缩放处理之后如图3-16所示，可以判断试样1，即在光斑直径为2.8mm，功

率为400W，扫描速度为10mm/s，吸收率为0.7的参数组合下，模拟所得相变硬化区深度为大约为0.340mm与实验所得相变硬化层深度0.257mm相比，仍然存在较大误差约为33%。

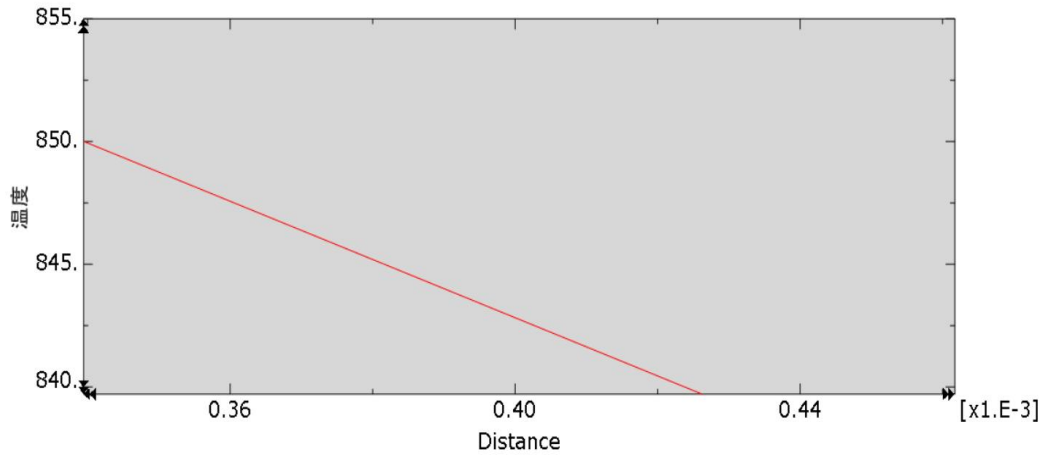


图3-16 纵向温度场分布

3.5 本章小结

本章使用Jmatpro材料性能模拟软件和Abaqus有限元模拟软件对45钢激光淬火过程进行模拟。首先对激光淬火的一些关键参数进行定义，包括利用Jmatpro软件对45钢相关热物性进行计算、设定45钢的完全奥氏体化温度为850℃、熔化温度为1600℃等。然后通过Abaqus模拟软件，完成分析模型建立、赋予属性、设置分析步、定义载荷、划分网格等步骤完成对45钢激光淬火的有限元模拟。并对经过后处理的温度场云图进行分析，分析了不同时刻的温度场分布，不同截面的温度场分布和垂直于淬火表面不同深度的温度场分布，探究了激光淬火过程的规律性。

通过对比Abaqus模拟计算所得相变硬化区深度与实验所得相变硬化区深度，两者误差较大，模拟不能很好的实验室激光淬火的实际情况，因此需要对热源模型进行修正，以保证模拟的可靠性，该部分会在第四章做详细阐述。

第四章 基于Matlab数学模型的Gauss热源修正

4.1 误差理论分析及修正条件假设

Abaqus模拟计算所得的相变硬化区深度与实际激光淬火相变硬化层深度相对比，仍具有较大误差（>10%）。误差出现的原因大概率是因为模拟中的热源模型和实验室中Laserline-Ldm3000半导体激光器的热源模型并不适配造成的。在本课题中，Abaqus有限元模拟是使用Gauss热源作为热源模型，但没有任何资料能保证未经修正的Gauss热源可以直接用于本激光器中，故决定对Gauss热源进行修正，来提高模拟精度。

由第3.3.2节对Gauss热源公式进行分析，发现Gauss热源主要与以下四个参数有关：功率 p ，扫描速度 v ，光斑半径 r_0 和45钢表面对激光的吸收率 η 。所以对Gauss热源修正主要是对上述参数进行合理修正、拟合，探究各参数之间的相互作用，使模拟结果更加精确。

4.1.1 吸收率 η 修正的相关研究

早在2004年，范雪燕^[23]就对45钢激光淬火过程中的能量转换系数 η 进行了拟合修正。作者首先通过大量的实验数据观察，得出 η 随着功率 p 的增加而降低，而随着 v 的增加而增加的结论，随后通过数学软件Maple使用样条插值和曲线拟合回归的方法得到 η 与 p ， η 与 v ， η 与 p ， v 三者之间的关系，最后拟合结果如式（4-1）所示：

$$Q = -\frac{0.2593839966p}{v} - 0.01312446295p - \frac{105.2329513}{v} + 106.0887958 \quad (4-1)$$

式中用 Q 表示 η ， $Q=100\eta$ 。

虽然材料相同，但是其所用的激光器为HJ-2000的二氧化碳激光器，并且对45钢试样表面喷涂活性炭涂层的预处理，大幅提高了材料表面对激光的吸收效果，最高可达98.5%，所以式（4-5）并不符合本次实验，不可直接照搬。并且经过带入验证再次证明上式并不符合本次实验45钢的表面吸收率，但其研究方法思路对本次修正有着重大参考价值。

4.1.2 修正条件假设

参考上述文献的研究思路及结果，可以得知在激光淬火过程中，当功率 p 和扫描速度 v 在激光淬火设备中设定完成时，不考虑电流紊乱、淬火设备存在故障等特殊情况，功率 p 和扫描速度 v 可作为热源修正中的定量，而材料表面对激光的吸收率 η 并不是常数，吸收率 η 和功率 p 和扫描速度 v 密切相关，故可以探究 η 与不同 p - v 组合之间的关系，作为对Gauss热源的第一次修正。

随着离焦量的改变，热源在试样表面上的光斑半径 r_0 也会变化，通过实验所测量的光斑半径 r_0 （表2-5）与真实值仍存在一定误差。单独探究离焦量对 r_0 取值的规律作为对Gauss热源的第二次修正。

为保证Gauss热源两次修正的合理性，做出以下假设条件：

(1) η 的取值仅与 p , v 的取值相关, 而与 r_0 的取值无关。在离焦量为0时求出的 η 与 p , v 的关系式适用于任何离焦量下。

(2)由激光器说明书中插图, 如图4-1, 可知激光在零离焦量时的光斑直径为2.8mm。因此当离焦量为0时, 所输出的 r_0 等于1.4mm真实值并不需要对 r_0 的取值再做考虑。所以当离焦量为0时, 淬透层不吻合的原因仅仅由于 η 与 p , v 引起的, 与 r_0 无关, r_0 为1.4mm。

(3)只考虑 η 与 p - v 组合的关系, 和 r_0 与离焦量之间的关系, 并不考虑其他的参数组合之间的交互作用。

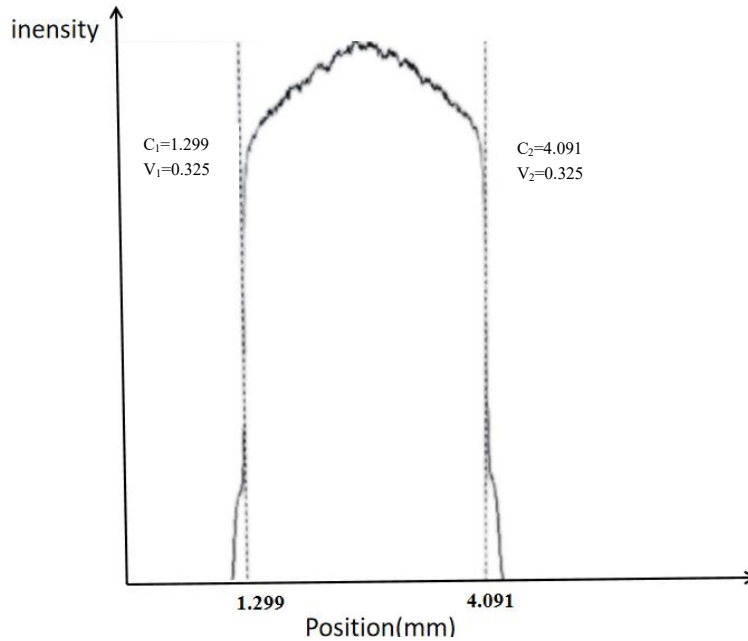


图4-1 激光器在零离焦量时热源图像

4.2 Gauss热源的第一次修正

对Gauss热源的第一次修正就是对能量转化系数 η 的修正。由于材料表面对激光吸收系数的变化规律对能量转换系数 η 的变化影响最大, 故能量转换系数等价于材料对激光的吸收率, 可用式(4-2)表示:

$$\eta = \frac{E_1}{E_0} \quad (4-2)$$

其中 E_0 为激光束能量, E_1 为材料实际吸收的激光能量。材料表面的吸收率越高, 表面温度越高, 淬火效果就越好。材料的吸收率 η 与激光波长、激光功率、材料类型、表面处理情况、环境温度等因素有关。一般来说, 激光波长与材料的吸收率呈反比关系, 而激光功率与吸收率呈正比关系, 即功率越大吸收率越高。当激光功率持续增加到一定值时, 材料的吸收率不再单纯与功率有关, 和其他因素也有关系。对于同一种材料, 表面粗糙度对吸收率的影响也非常显著, 表面粗糙度越大, 吸收率越高。若将材料的吸收率定为常数, 必然会对模拟结果产生或多或少的误差。所以在实际激光淬火过程中, 需要综合考虑这些因素。若将吸收率定义为常数, 将必然导致模拟得到的结果产生误差。

4.2.1 数据预处理

参考上述实验结论，已知45钢对材料的吸收率 η 主要是受到功率 p 和扫描速度 v 的影响，而与光斑半径 r_0 无关，即确定功率和扫描速度之后，吸收率为特定常数。故设计第一组实验（试样1~10），在Abaqus中经过大量模拟计算，改变吸收率 η 的值，控制相变硬化层深度误差在10%之内。确定好每个试样的吸收率 η 后，将 η 作为应变变量， p - v 作为自变量，探究 η 与 p - v 组合之间的相互作用关系。所得吸收率 $\eta(p, v)$ 作为材料在任何离焦量下的吸收率变化规律。第一组实验的相关数据如表4-1所示。

表4-1 第一组实验所对应吸收率

试样编号	离焦量/mm	功率/W	扫描速度/mm/s	吸收率/%
1	0	400	10	0.60
2	0	400	12	0.62
3	0	450	12	0.63
4	0	450	14	0.63
5	0	500	14	0.62
6	0	500	16	0.58
7	0	550	16	0.59
8	0	550	18	0.59
9	0	600	18	0.60
10	0	600	20	0.53

通过大量激光淬火预实验，控制离焦量为0mm，即光斑半径 r_0 为1.4mm，不断改变 p 和 v 的取值，得到以上十组有效数据（不会使45钢表面产生熔化）。首先对三维离散点进行插值拟合后，再进行函数拟合。但可以预料的是要拟合的曲面为不规则曲面，故选择Matlab软件中的griddata函数对十组离散点进行曲面拟合。

Matlab（Matrix Laboratory）是一种高级技术计算环境和编程语言，它广泛应用于科学、工程、工业、金融等领域，为用户提供科学计算、数据分析、可视化和模型设计等功能。Matlab支持矩阵操作及函数计算，具有数据可视化、图像处理、机器学习、神经网络等功能，同时还可以轻松地与其他编程语言进行接口对接。

Matlab中的Griddata函数可以将位于同一空间坐标系下的散点插值为规则格网，该函数提供了4种插值方法：线性插值(linear)、3次多项式插值(cubic)、最近点插值(nearest)、四格点样条插值(v4)，可以方便地实现结合邻近离散点分布特征的光滑曲面拟合。其中线性插值和最近点插值结果构成的曲面不光滑不连续，3次多项式插值和四格点样条插值结果构成的曲面较光滑^[27]。为了得到光滑美观的曲面，故使用其中的“四格点样条插值法(v4)”对离散点进行插值处理。离散点坐标如图4-2所示，经过griddata函数插值后的曲面如图4-3所示。

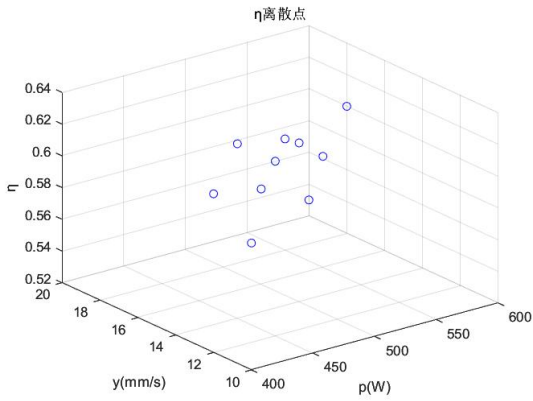


图4-2 η离散点图

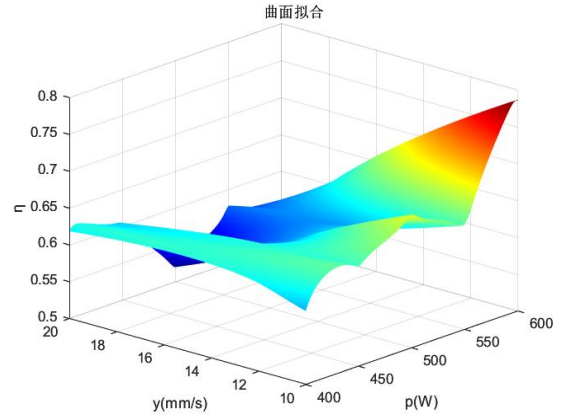


图4-3 Griddata插值曲面

对未知曲面进行函数拟合通常有两种手段：(1)若已知函数类型，例如： $z=ax^2+bx+cy^2$ ，的函数类型为 x^2 ， xy 和 y^2 的多项式组合，只是系数未知的可以用Matlab中的fitype函数对曲面方程进行拟合。(2)若不知道函数类型，曲面的函数表达式完全未知，可以考虑采用多元线性回归拟合^[28]。下面将分别对两种情况进行分析。

4.2.2 fitype函数拟合

fitype是Matlab中用于创建非线性拟合模型的函数。它可以帮助我们定义一个函数，将这个函数拟合到特定的数据集中，并对该函数进行评估和预测。

根据式(4-1)，假设曲面函数类型为 p/v ， p ， $1/v$ 的多项式组合，利用fitype拟合，拟合曲面如图4-4所示。图4-5为Griddata插值曲面与fitype拟合函数曲面的重叠云图，蓝色部分为Griddata插值曲面图，彩色部分为fitype拟合函数图。图4-6为Matlab的拟合结果图，其中包括拟合方程和拟合优度参数^[29]。根据图4-6拟合结果图，得到本次拟合曲面的函数表达式如式(4-3)所示。

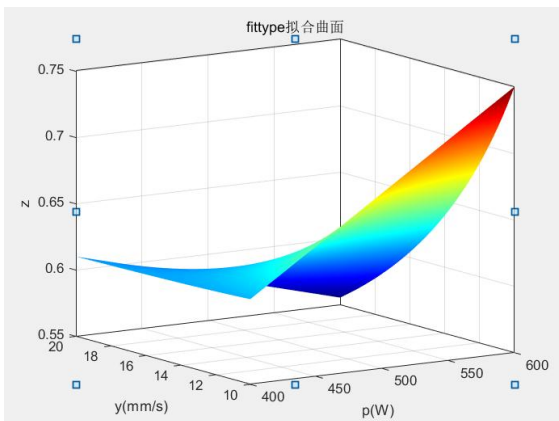


图4-4 fitype拟合曲面

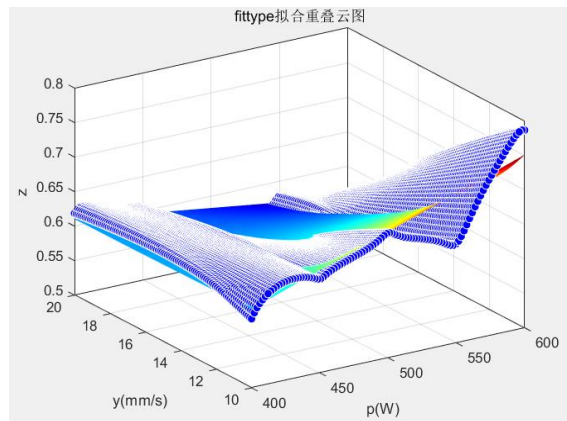


图4-5 fitype拟合重叠云图

```

常规模型:
myfit(X,Y) = a*(X/Y)+b*(X)+c*(1/Y)+d
系数(置信边界为 95%):
a =      0.01914  (0.01859, 0.01969)
b =     -0.001232 (-0.001271, -0.001193)
c =      -7.576  (-7.853, -7.299)
d =       1.099  (1.079, 1.118)

gof1 = 包含以下字段的 struct:
      sse: 5.3630
    rsquare: 0.6679
      dfe: 9996
adjrsquare: 0.6678
      rmse: 0.0232
    
```

图4-6 拟合结果图

fittype拟合函数表达式:

$$\eta(p, v) = a \frac{p}{v} + bp + c \frac{1}{v} + d \quad (4-3)$$

$$\begin{cases} 0.01859 < a < 0.01969 \\ -0.001271 < b < -0.001193 \\ -7.853 < c < -7.299 \\ 1.079 < d < 1.118 \end{cases}$$

显然，根据图4-5直观上来看，本次拟合误差较大，二者重叠云图重合部分较低，并不能准确反应吸收率随参数变化规律。并且由图4-6拟合优度参数来看，结果也并不理想。其中sse代表真实值和预测值的平方和误差，取值越小拟合效果越好；rsquare表示判定系数，adjrsquare为rsquare的修正版本，更适合在多元线性回归拟合中作为参考，二者取值都在0~1范围内，取值越大拟合效果越好。而rmse是均方误差，是一种常用的评估回归模型预测性能的指标，表示真实值与预测值之间的偏差，越小代表拟合效果越好。而dfe代表残差自由度，dfe越大，代表误差部分的自由度就越高，模型的拟合效果越精确。

而rsquare的值为0.6679，其数值过低，也能反应若参考式（4-1），利用fittype对Gauss热源进行吸收率修正，会引起较大误差。

4.2.3 多元线性回归拟合

假设对吸收率曲面拟合的方程式一无所知，仅知道该曲面是通过插值拟合法得出的，可以使用多元线性回归拟合的方法对该曲面进行求解。在本实验中，多元线性回归是利用多个自变量 p 和 v 来预测应变量 η 的线性模型。多元线性回归拟合的函数可用式（4-4）来表示。

$$[\text{myfit1}, \text{gof}] = \text{fit}([\text{X1}, \text{Y1}], \text{Z1}, 'poly41') \quad (4-4)$$

其中X1, Y1, Z1表示一维向量组, poly41表示拟合方程中x, y最高阶的次数, 即x最高阶为 x^4 而y的最高阶为y, 并且应变量最高阶也为4。其上限为poly55, 即方程中最高次项为5。通过改变多项式最高阶次数, 发现poly45和poly51的拟合效果最好, 且二者非常接近。拟合重叠云图如图4-7, 图4-8所示, 其中蓝色部分为Griddata插值曲面图, 彩色部分为拟合曲面: 拟合结果图如图4-9、图4-10所示。

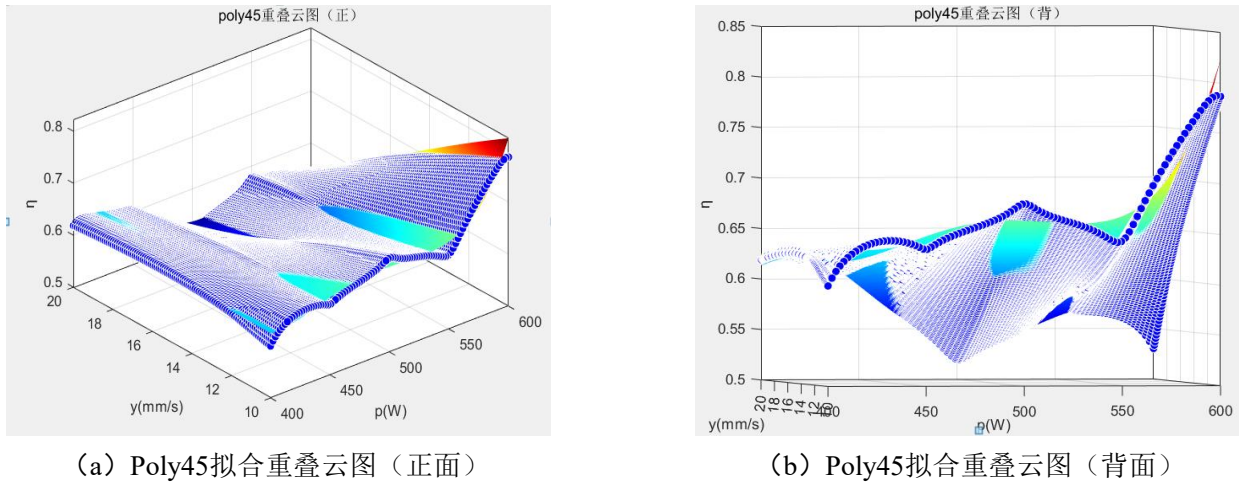


图4-7 Poly45拟合结果

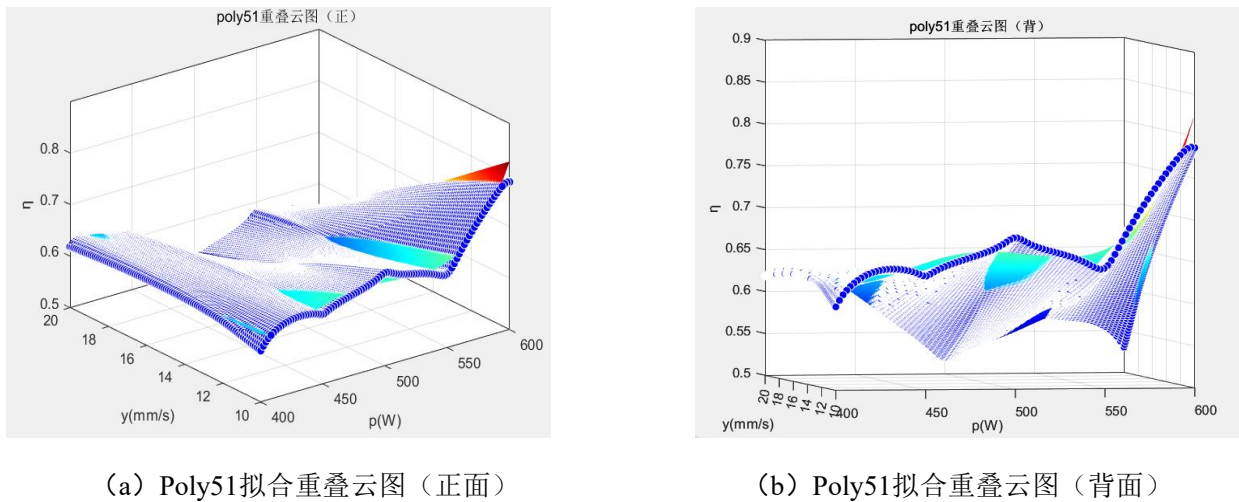


图4-8 Poly51拟合结果

在图4-7和4-8的重叠云图中, 虽然无法从宏观上对比poly45与poly51拟合结果的优劣程度。但是参考图4-9和图4-10中的拟合优度参数, Poly51的拟合优度参数都要略优于Poly45。虽然二者都能很好的在参数区间范围内完成对吸收率拟合曲面的方程拟合, 为了提高模拟的准确度, 故选取Poly51对函数进行拟合, 由Poly51拟合得到的吸收率曲面拟合方程如式(4-5)所示。Poly51拟合曲面如图4-11所示。

```

线性模型 Poly45:
myfit2(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3
              + p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p03*y^3 + p40*x^4 + p31*x^3*y
              + p22*x^2*y^2 + p13*x*y^3 + p04*y^4 + p41*x^4*y + p32*x^3*y^2
              + p23*x^2*y^3 + p14*x*y^4 + p05*y^5
系数(置信边界为 95%):
p00 =      214.8 (208.3, 221.3)
p10 =      -1.78 (-1.828, -1.732)
p01 =     -16.71 (-17.48, -15.95)
p20 =      0.005512 (0.005374, 0.005649)
p11 =       0.1356 (0.1314, 0.1397)
p02 =       0.07769 (0.02295, 0.1324)
p30 =     -7.53e-06 (-7.709e-06, -7.351e-06)
p21 =    -0.0004109 (-0.0004211, -0.0004008)
p12 =    -0.0003857 (-0.0005317, -0.0002397)
p03 =    -0.001296 (-0.004108, 0.001517)
p40 =     3.832e-09 (3.743e-09, 3.921e-09)
p31 =       5.5e-07 (5.379e-07, 5.621e-07)
p22 =     7.148e-07 (5.167e-07, 9.128e-07)
p13 =     2.555e-06 (-1.036e-06, 6.146e-06)
p04 =     2.299e-05 (-6.044e-05, 0.0001064)
p41 =    -2.741e-10 (-2.799e-10, -2.683e-10)
p32 =    -4.652e-10 (-5.784e-10, -3.521e-10)
p23 =    -1.429e-09 (-3.692e-09, 8.347e-10)
p14 =    -1.982e-08 (-6.624e-08, 2.659e-08)
p05 =    -1.785e-07 (-1.246e-06, 8.893e-07)
gof2 = 包含以下字段的 struct:
      sse: 0.4662
    rsquare: 0.9711
      dfe: 9980
adjrsquare: 0.9711
      rmse: 0.0068

```

图4-9 Poly45拟合结果图

```

线性模型 Poly51:
myfit2(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p30*x^3 + p21*x^2*y
              + p40*x^4 + p31*x^3*y + p50*x^5 + p41*x^4*y
系数(置信边界为 95%):
p00 =       306 (294.7, 317.3)
p10 =     -2.754 (-2.864, -2.644)
p01 =      -15 (-15.35, -14.65)
p20 =     0.009599 (0.009167, 0.01003)
p11 =       0.1255 (0.1226, 0.1283)
p30 =    -1.597e-05 (-1.682e-05, -1.512e-05)
p21 =    -0.0003905 (-0.0003991, -0.0003818)
p40 =     1.241e-08 (1.158e-08, 1.325e-08)
p31 =     5.361e-07 (5.245e-07, 5.477e-07)
p50 =    -3.433e-12 (-3.766e-12, -3.1e-12)
p41 =    -2.741e-10 (-2.799e-10, -2.683e-10)
gof2 = 包含以下字段的 struct:
      sse: 0.4656
    rsquare: 0.9712
      dfe: 9989
adjrsquare: 0.9711
      rmse: 0.0068

```

图4-10 Poly51拟合结果图

$$\eta(p, v) = c_{00} + c_{10}p + c_{01}v + c_{20}p^2 + c_{11}pv + c_{30}p^3 + c_{21}p^2v + c_{40}p^4 + c_{31}p^3v + c_{50}p^5 + c_{41}p^4v \quad (4-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 294.7 < c_{00} < 317.3 \\ -2.864 < c_{10} < -2.644 \\ -15.35 < c_{01} < -14.65 \\ 0.009167 < c_{20} < 0.01003 \\ 0.1226 < c_{11} < 0.1283 \\ -1.682 \times 10^{-5} < c_{30} < -1.512 \times 10^{-5} \\ -0.0003991 < c_{21} < -0.0003818 \\ 1.158 \times 10^{-8} < c_{40} < 1.325 \times 10^{-8} \\ 5.245 \times 10^{-7} < c_{31} < 5.477 \times 10^{-7} \\ -3.766 \times 10^{-12} < c_{50} < -3.1 \times 10^{-12} \\ -2.799 \times 10^{-10} < c_{41} < -2.683 \times 10^{-10} \end{array} \right.$$

通过Matlab强大的功能性，可以直接提取式（4-5）拟合方程中 η 与 p ， v 的点，从而生成一张具有10000组数据的“吸收率 η 检索表”（ η 保留两位小数）。从而避免每次都如此复杂的函数进行计算。部分数据见附录5。

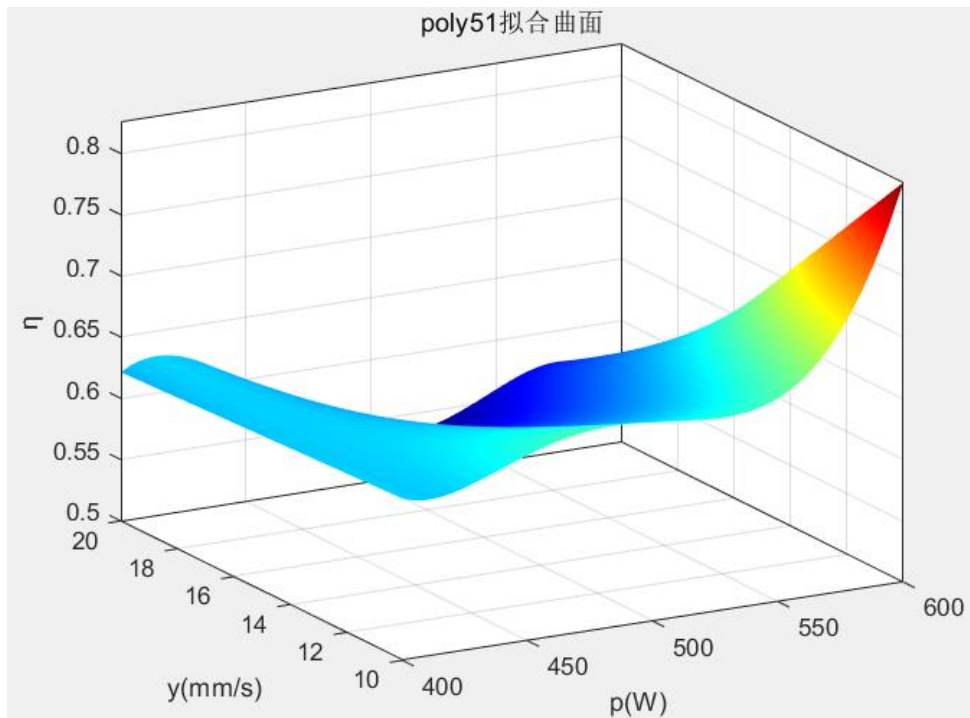


图4-11 Poly51吸收率 η 拟合曲面

4.3 Gauss热源的第二次修正

Gauss热源的第二次修正是基于第一次修正完成的，当确定功率和扫描速度后，离焦量为某一定值。对第二组实验（试样11~19）然后在Abaqus热源子程序中改变 r_0 的取值，控制相变硬化层深度误差在10%之内。确定好不同离焦量所对应的 r_0 取值，探究离焦量与光斑半径 r_0 的关系。

4.3.1 数据预处理

对上文得到的“吸收率 η 检索表”进行检索，找到表4-2参数组合下的 η 作为第二次修正中的定量。表4-3为检索表中原始数据。

表4-2 第二组实验参数

试样编号	离焦量 /mm	功率 /W	扫描速度 /mm/s	相变硬化区深度 /mm	吸收率 /%
11	10	400	10	0.270	0.600
12	10	450	12	0.190	0.630
13	10	500	14	0.305	0.618
14	20	450	12	0.229	0.630
15	20	500	14	0.297	0.618
16	20	550	16	0.204	0.590
17	30	500	14	0.237	0.618
18	30	550	16	0.223	0.590
19	30	600	18	0.177	0.597

表4-3 η 检索表原始数据

编号	功率 /W	扫描速度 /mm/s	吸收率 /%
1	400	10	0.600
2522	450.5050505	12.02020202	0.630
5042	501.010101	14.04040404	0.618
7461	549.4949495	15.95959596	0.590
9982	600	18.08080808	0.597

4.3.2 Matlab多项式拟合

经过若干次修改参数 r_0 进行模拟验证，将误差控制在10%范围内，得到以下 r_0 与离焦量之间的数值对应关系，如表4-4所示：

表4-4 离焦量与光斑直径对应关系

离焦量/mm	光斑直径/mm
0	2.8
10	3.09

表4-4 (续)

20	3.48
30	3.61

由于数据样本过少，并且随着离焦量的增加，光斑直径也增加。函数特征较为明显，直接选用Matlab中的polyfit函数进行插值和多项式拟合即可。结果如图4-12，红色代表插值曲线，紫色代表二次多项式拟合曲线。二次多项式如式（4-6）所示，其中x代表离焦量，y代表 r_0 的取值。

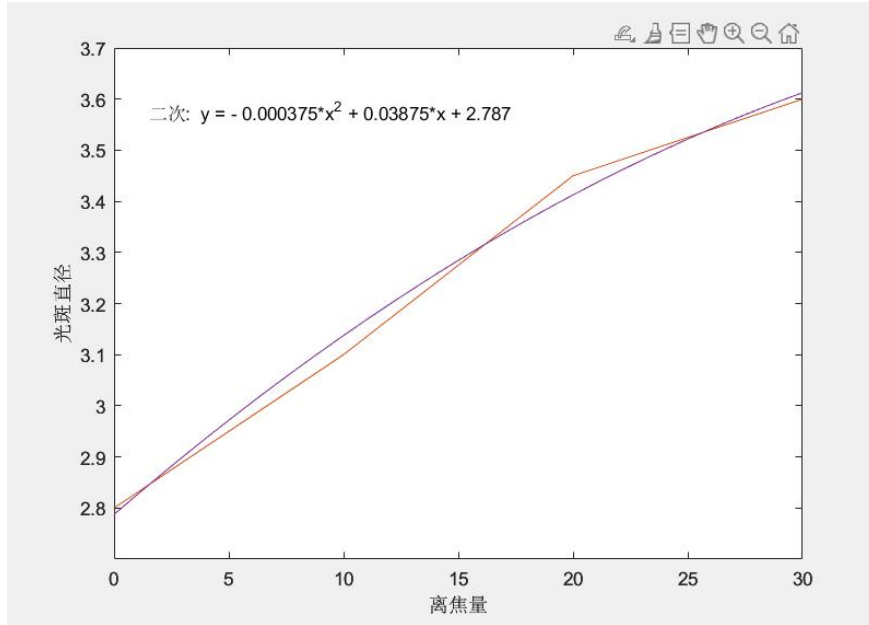


图4-12 二次多项式拟合结果

二次多项式拟合函数表达式：

$$y = -0.000375x^2 + 0.03875x + 2.787 \quad (4-6)$$

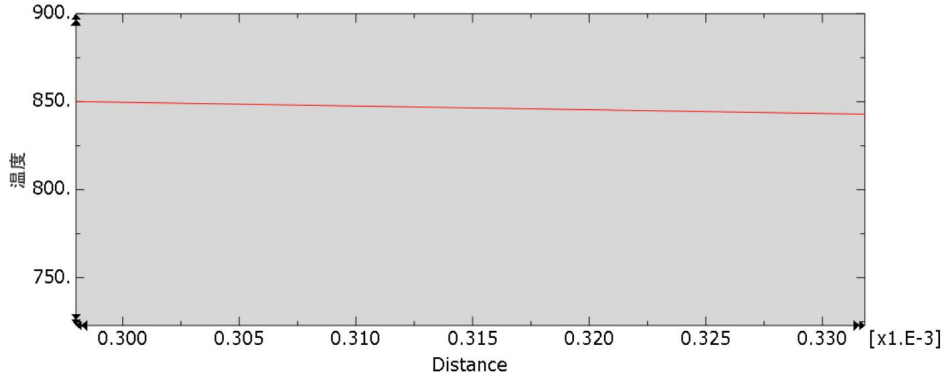
4.4 修正后热源模型的校验及分析

4.4.1 修正热源模型校验

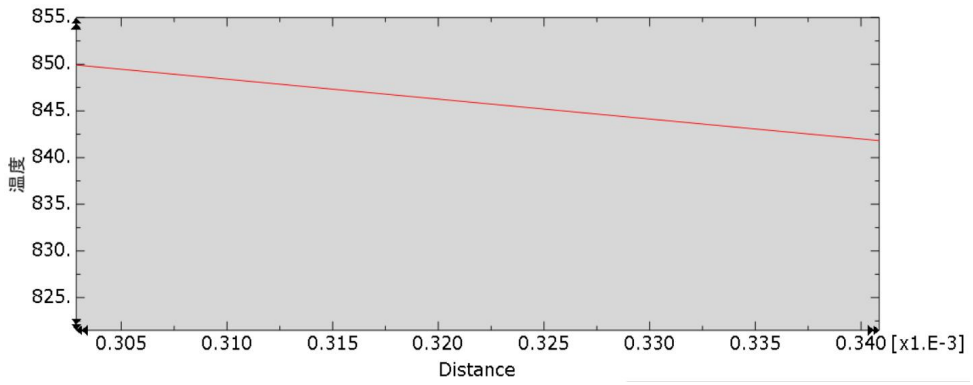
为保证修正后热源的可靠性，设计四组实验对修正后热源进行相变硬化区深度比对，四组实验相关参数如表4-5所示。模拟结果如图4-13所示。

表4-5 校验组数据

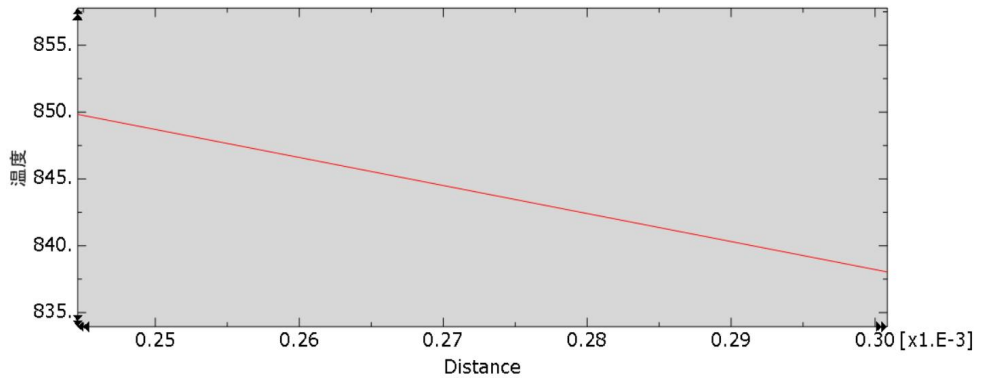
试样编号	离焦量 /mm	功率 /W	扫描速度 /mm/s	吸收率 /%	光斑半径 /mm	相变硬化区深度 /mm
20	15	450	12	0.630	3.28	0.283
21	15	500	14	0.618	3.28	0.293
22	25	500	14	0.618	3.52	0.237
23	25	550	16	0.590	3.52	0.172



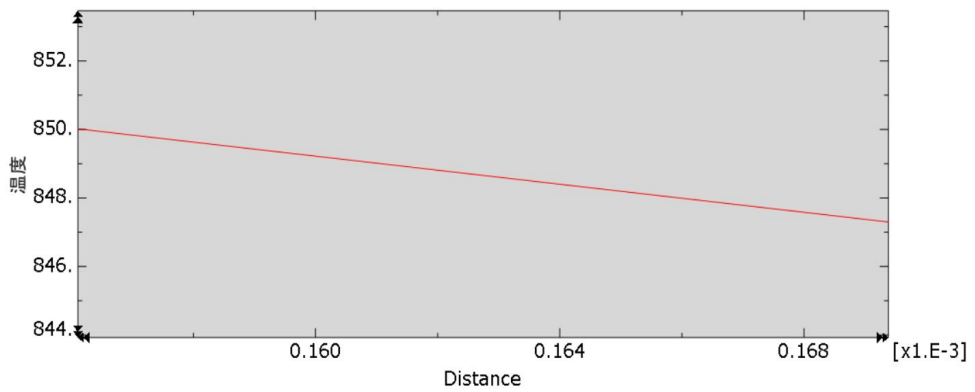
(a) 试样20模拟结果



(b) 试样21模拟结果



(c) 试样22模拟结果



(d) 试样23模拟结果

图4-13 验证组模拟结果

由以上四组模拟结果图片可以得到四组试样的模拟相变硬化区深度分别为0.283mm、0.293mm、0.237mm和0.172mm，实验所得相变硬化区深度为0.298mm、0.303mm、0.245mm和0.156mm，误差率分别为5.30%、3.41%、3.38%和9.3%都在允许误差10%之内，说明经过修正后的Gauss热源可以较好适配于实验室激光器，可以作为本实验室Abaqus有限元模拟的热源模型。

4.4.2 修正热源模型分析

使用修正后的Gauss热源对45钢激光淬火进行模拟，模拟所得相变硬化层深度与实验所得相变硬化层深度仍然存在小于10%的误差，经过分析可能是由以下原因导致的：

(1)由于数据样本过少，大量数据是通过插值法生成的，经过拟合之后的曲面虽然能在一定程度上反映 η 随 p - v 组合、 r_0 随离焦量改变的规律性，但很难准确无误的反映其变化的真实情况。

(2)本文只考虑了 η 与 p - v 组合、 r_0 与离焦量之间的关系。而相关文献^[30]表明激光淬火过程中各参数之间会发生交互作用，如激光功率、扫描速度和光斑半径彼此之间会相互影响，从而影响硬化层深度。

(3)Abaqus模拟激光淬火得到的温度场分布是理想情况下的结果，而实际实验并不能完全符合理想情况，往往受到各种因素的影响。如激光功率波动、热对流、热辐射实际影响不符合理想情况等，都会导致模拟结果偏离实际情况。

(4)实验室Laserline-Ldm3000半导体激光器的热源模型是未知的，Gauss热源只是近似于Laserline-Ldm3000半导体激光器的热源，并不能真正反映实际激光淬火过程中的温度场分布情况，即使是修正后的Gauss热源也无法完全适用于实验室中的半导体激光器。

(5)在金相显微镜下无法准确测得相变硬化区深度，所测得硬化层深度可能包含部分热影响区，或是没有达到相变硬化区边界，导致误差增大。

(6)由于本课题激光淬火实验所得相变硬化层深度较浅，仅在0.15~0.32mm之间，相变层深度对于温度的变化显得十分敏感，很难精准的控制每组试样所对应的 η 和 r_0 。修正Gauss热源的所用数据样本仍与实际情况存在误差。

4.5 本章小结

本章主要是对Abaqus模拟计算和实验所得相变硬化区深度不吻合的现象，进行合理分析、作出假设，决定基于Matlab中的数学模型对Abaqus热源模型进行两次修正。并通过实验再次校验，证明修正后的热源模型具有极高的适用性。

激光淬火过程是一个十分复杂的过程，精准预测其相变硬化区深度基本上是一种设想。本章通过反复实验和模拟验证，对Gauss热源模型进行两次修正，将二者误差控制在10%之内，由此得到的“吸收率 η 检索表”可以作为之后模拟计算的参考。

但是，由于本文是基于Abaqus对仅除锈、打磨的45钢激光淬火温度场进行模拟，修正热源模型也是在此基础之上的进行的，并且只针对Laserline-Ldm3000半导体激光器。因此，对于不同材料和不同表面预处理或是不同的激光器等情况，本章结论并没有通用

性。此外，由于前期有效实验数据准备不足，模拟和实验试错时间成本过高，限于实验成本和精力，本章结论具有局限性，仅适用于 p 在400~600W， v 在10~20mm/s，离焦量在0~30mm内，不使45钢表面产生熔化的参数组合下。

本章旨在提供一种提高模拟精度的研究思路和实验方法，通过先进的计算机技术，将材料模拟软件Abaqus和数学软件Matlab相结合，为精确控制工艺参数和相变硬化区深度提供理论依据。

第五章 总结及展望

5.1 全文总结

激光淬火是一个复杂的三维瞬态非稳态热传导过程，激光淬火加热的体积小，表面温度变化十分迅速，仅仅依靠实验很难直接测定其温度场变化。制定优化工艺参数组合只能不断通过大量实验进行试错，不仅耗费大量实验、人力成本，最后甚至无法得到最优参数组合。随着计算机科学技术的普及和发展，可以借助相关先进技术，对影响相变硬化区深度的三大因素：离焦量（光斑半径 r_0 ），功率 p 和扫描速度 v 做出定量分析。本课题结合材料性能模拟软件Jmatpro和有限元模拟软件Abaqus，对45钢激光淬火过程进行有限元模拟分析，并在此基础上，基于Matlab中的数学模型对Abaqus热源进行两次修正，提高模拟的精确度和可靠性。

首先根据激光淬火过程的三维热传导方程，针对物理模型，基于Abaqus的环境下，建立三维有限元分析模型，以Jmatpro软件作为辅助，对45钢相关热物性进行模拟，考虑接近实际的加载条件，并对整个激光淬火的瞬态温度场进行模拟。通过对后处理结果进行分析，探究激光淬火过程中的规律性。

激光淬火后的相变硬化区深度是判定激光淬火效果最重要的指标。相变硬化区深度与激光功率 p ，扫描速度 v ，离焦量（光斑半径 r_0 ）等工艺参数有关。此外还有45钢表面对激光的吸收率 η 有关。 η 的影响因素有很多包括但不限于：激光到达试样表面时路程中的损失、试样与周围环境的热对流和热辐射引起的能量损失、或是通过预处理提高吸收率等。通过Abaqus模拟计算得到的相变硬化区深度与实际实验所得相变硬化区深度相校验，在发现误差基础之上，考虑其原因，发现热源是关键。参考相关文献，针对吸收率 η 和光斑半径 r_0 基于Matlab数学模型完成对传统Gauss热源的两次修正工作。第一次修正结果见式（4-5），第二次修正结果见式（4-6）最终确定了热源相关参数的合理取值。

将模拟计算数据和实验数据相结合，基于Matlab软件深入探究能量转换系数 η 和工艺参数 p ， v 之间的变化规律和离焦量与光斑半径 r_0 之间的关系。并且再次通过4组验证实验来证明，使用修正后的Gauss热源进行模拟，具有很高的精确性，误差不超过10%，说明在 p 为400~600W、 v 为10~20mm/s、离焦量为0~30mm不使45钢表面产生熔化的参数组合范围内，修正后的热源具有较高的适用性。

本文第四章针对Gauss热源的两次修正，是基于Abaqus对45钢激光淬火的有限元模拟，并且只针对除锈、打磨预处理的45钢和Laserline-Ldm3000半导体激光器。本文所得结论并没有通用性，并且仅适用于上述范围内的参数组合下。目前为止，尚未有现成的数学模型能够完整的反映激光淬火过程，使模拟与实验所得结果数据完全匹配。对于精确无误预测激光淬火相变硬化区深度也只是一种设想，本文从该角度出发，力求提供一种能精准预测相变硬化区深度的研究思路和实验方法，尽量缩小二者误差，这也是本文研究的意义所在。

5.2 展望

由于课题组此前并无有限元模拟先例，缺少相关经验和数据支撑。本课题实验和模拟试错时间成本极大，本人水平不够并且精力有限，许多想法未能实现，在此提出一些建议，以供后人参考。

(1) 增加数据样本并增加实验参数的区间跨度

为了不使45钢表面产生熔化，本课题在激光淬火过程中做了大量预实验挑选出23组有效数据作为修正Gauss热源的数据样本。各试样参数组合之间没有明显的规律性，无法分别探究 η 与 p ， η 与 v 之间的定量关系，只能通过插值法先对离散数据点进行拟合，得到拟合曲面，再通过多元线性回归拟合的方法求出拟合曲面的函数表达式，确定 p - v 组合下的 η 。可以根据以下公式制定更合理的实验数据， T_1 和 T_2 为金属表面不熔化的最长加热时间，和金属表面能够得到淬火的最低加热时间。

$$T_1 = \frac{0.785 * T_m^2 * \lambda^2}{q_0^2 * \alpha} \quad (5-1)$$

$$T_2 = \frac{0.785 * A_C^2 * \lambda^2}{q_0^2 * \alpha} \quad (5-2)$$

(2) 在Abaqus中模拟热应力

本文仅考虑45钢在激光淬火过程中的温度场变化，根据温度场探究激光淬火的相关规律。而激光淬火中产生的热应力和残余应力也是优化激光淬火工艺参数的重要因素，后者可以采用Abaqus中的间接耦合场，对激光淬火过程中产生的热应力场进行分析，分析45钢在淬火后的应力变化规律，完善该实验。

文中难免存在不妥之处，希望得到各位专家的批评指正。

参考文献

- [1] 郝玉成, 张全争, 林文海, 秦广超. 计算机在材料科学中的应用课程改革与应用型人才教学实践研究[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(07): 153-155.
- [2] 郑建秋. 计算机模拟技术在材料科学研究中的应用浅析[J]. 厦门城市职业学院学报, 2020, 22(02): 91-96.
- [3] 刘其斌. 激光材料加工及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- [4] 范文. 45钢激光淬火的模拟研究[D]. 东北大学, 2014(08).
- [5] 马琨, 伏云昌, 李俊昌. 激光热处理温度场的实验和理论研究[J]. 激光杂志, 2003, (03): 9-11.
- [6] 宁连旺. ANSYS有限元分析理论与发展[J]. 山西科技, 2008, 128(04): 65-66+68.
- [7] 周腾, 吴之豪, 史留勇. 有限元分析及混合教学法在材料力学课程中的教学研究[J]. 高教学刊, 2021(35): 82-86+90.
- [8] 雷声. 轴承表面的激光相变硬化关键技术研究[D]. 合肥工业大学, 2010(12).
- [9] 吴钢. 激光相变硬化工艺及参数优化研究[D]. 同济大学, 2006(02).
- [10] 石娟. 齿轮激光表面处理的若干关键技术研究[D]. 同济大学, 2006(08).
- [11] 管一弘, 陈铁力, 陈君若, 王洪纲. 激光淬火温度场及材料性能的数值模拟[J]. 中国激光, 1999, (03).
- [12] H. E. Cline, T. R. Anthony. Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam[J]. Journal of Applied Physics. 1977, 48: 3895.
- [13] T. Chande, J. Mazumder. Lasers in Metallurgy[M]. 1981: 165.
- [14] Evy De Bruycker. Corrosion Testing of a Heat Treated 316L Functional Part Produced by Selective Laser Melting Materials[J]. Sciences and Applications. 2017, 8, 223-233.
- [15] 晁明举. 金属材料表面激光淬火和激光熔覆若干关键技术研究[D]. 郑州大学, 2003(01).
- [16] A. Kar, J. Mazumder. Three-dimensional transient analysis for laser chemical vapour deposition on uniformity moving finite slabs. J. Appl. Phys[J]. 1989, 65(8): 2923.
- [17] Chen. S. Y, Chen. Y. X, Jiao. S. F, Zhong. L, Gao. L, Miao. L. Study on laser surface quenching structure and hardness of C45 steel[J]. Metalurgija. 1992, 70(4): 23-25.
- [18] 范文. 45钢激光淬火的模拟研究[D]. 东北大学, 2014(08).
- [19] 夏子凡. 高磷铸铁激光淬火技术研究[D]. 江苏科技大学, 2019(03).
- [20] 余东, 王昆林. 不同金属材料在不同热源加热下的热传导研究[J]. 大学物理实验, 2016, 29(02): 21-25.
- [21] 徐小刚. 激光相变硬化数值模拟与温度控制技术研究[D]. 山东大学, 2022(02).
- [22] 杨永强, 吴世彪, 张越, 朱勇强. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. 中国激光.
- [23] 郭怡晖, 刘金水, 刘继常, 鄢铨, 颜丙功. 球墨铸铁QT600-3激光相变硬化试验研究[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(05): 118-122.
- [24] 闫钧. 模具钢激光表面热处理的实验研究[D]. 华侨大学, 2003(03).
- [25] 朱习栋. 激光淬火对45钢表面性能影响的工艺基础研究[D]. 新疆大学, 2021(03).
- [26] 范雪燕. 激光表面淬火瞬态温度场的有限元模拟及硬化层深预测[D]. 上海海事大学, 2004(04).
- [27] 吴守亮. 基于Matlab的三维数字地形模拟及空间分析[J]. 测绘工程, 2011, 20(03): 54-57.
- [28] 王盘兴. 论变量线性相关系数的相互制约及其对多元线性回归方程拟合优度的影响[J]. 气象学报, 1986, (01): 70-81.
- [29] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002(01).
- [30] 崔永婷. 基于激光淬火的小麦磨粉机磨辊减磨技术研究[D]. 甘肃农业大学, 2020(12).

致 谢

日月相替，而岁终焉；匆匆四载，逝者如斯。在天津中德应用技术大学的学习生涯即将告一段落，怀揣着感激之情，向各位致以最真挚的谢意：

亦师亦友，诲人似春风。首先感谢我的导师耿可屏老师。学习上，耿老师给了我热情的帮助答疑解惑。每次询问问题总能得到及时的回复和反馈。并教会我实验中淬火设备的使用方法。并且辛苦的帮我修改论文，提出建议。生活中，经常像朋友一样鼓励着我，给予我开导，让我能够乐观生活下去。特别感谢耿老师在考研前几天，每天给予的鼓励给了我更大的信心支撑下去，所幸不负所托，成功上岸中南大学。也感谢金属材料系其他老师对我们的高度期待和激励，如酷暑之凉风，寒冬之暖阳，每次困倦消极之时，想到各位老师的鼓励便会精神焕发。

所遇皆益友，志同亦道和。研途漫漫，感谢同班万一阳，张康康，张印权，许振基四位同学在考研路上的相伴，祝升学的万一阳，张印权两位学业有成，不忘初心；工作的张康康，许振基两位工作顺利，早日飞黄腾达。感谢我的五位室友有着良好的生活作息，不抽烟，晚上不喧哗吵闹，给了我良好的睡眠环境。并且感谢毕设同组19金属1班的十位小伙伴们，都十分可爱、友善、热情，帮助我熟悉327实验室，并教会我一些关键设备的使用。此外，特别感谢天津大学研究生张帆学长在模拟过程中教我Abaqus软件的使用，无私推荐相关视频，耐心回答我的问题，帮助我顺利完成毕设。再次祝以上各位工作顺利亦或学有所成。

知遇之恩，相识之幸，岂能言语之所喻？感谢我最亲爱的母校，雅深路2号，天津中德应用技术大学。学校治学严谨，学风浓厚；大国工匠，产教融合尽显北洋名校之风范。感谢学校浓厚的学术氛围深深熏陶着我。热处理炉、砂轮机、金相砂纸、淬火设备.....是大多数“金属人”枯燥大学时光最美好的慰藉，未能感受过这份美好，是我四年中最大的遗憾；感谢学校良好、清新、积极的学习环境让我感受到了学术研究的魅力。学校清幽、安静、寥寥几人的自习室，让我在喧闹的尘世中找到一隅之地，韬光养晦，才能有今日之所得；感谢学校的素质教育和大国工匠精神使我德智体美劳全面发展。劳动教育，身体力行，在学习之余加强身体素质锻炼，思想也随之提升在劳动中收获成长，收获快乐，深刻贯彻落实“身体是革命的本钱”；感谢学校严格公正客观的管理和评选标准，让我知道了所谓“优秀”的标准并无硬性而有很多要求，使我常常反思自己的不足。中德带给我人生中最美好的回忆之一，那抹绚烂的中德蓝永远在我心中盛开绽放。

虽悔相道之不察兮，然知来者之可追也。这一路走来虽然有很多失望和遗憾，但人生处处都是遗憾，所幸结果是好的，那便也足够了。最后感谢身处井隅仍仰望璀璨星辰的自己，在遭受质疑和困顿之际仍不忘初心、砥砺前行的自己，并且感谢自己四年来所做的任何决定。希望能带着这份坚持和初心，在未来找到所希望的光景。

今当远离，临文涕零，不知所言。

附录1: 英文文献及翻译

选择性激光熔化生产的 316 L 功能部件的腐蚀测试

摘要

选择性激光熔化 (SLM) 在金属增材制造 (AM) 技术中显示出巨大的潜力。然而, SLM的大热梯度和局部熔融和凝固过程导致在竣工部件中存在大量的残余应力。这些内应力不仅会影响机械性能, 还会增加应力腐蚀开裂 (SCC) 的风险。SLM选择在冷凝器的抽气泵中使用用于在水中产生漩涡的捻线机作为SLM在316 L不锈钢中生产的候选部件。由于该部件在使用中的主要预期损坏机制是腐蚀, 因此对竣工捻线机和热处理部件进行了腐蚀测试。结果表明, 450°C低温热处理对残余应力降低和伴随腐蚀性能的影响有限, 而950°C高温热处理的内应力显著降低。此外, 特定的应力腐蚀敏感性测试被证明是评估特定组件内部应力分布的有用工具。

关键词: 316L; 选择性激光熔化; 应力腐蚀开裂; 残余应力; 热处理

1引言

选择性激光熔化 (SLM) 是一种增材制造 (AM) 工艺。它使用高度集中的激光束对金属粉末床进行局部熔化。具有复杂机械性能的金属部件可以通过逐层的方式制造。设计上的高度灵活性、低材料浪费和快速生产接近净成型的零件是其主要优势。与传统的加工途径相比, 其主要优点是设计灵活性高, 材料浪费少, 能快速生产出接近净成型的零件。SLM工艺已被广泛用于316L零件的生产, 并且其激光扫描参数的优化已被广泛报道。参照SLM后的微观结构, 在微米级观察到细胞-树枝状微观结构。在微米级观察到细胞-树枝状的微观结构, 在宏观上观察到横跨几层的拉长晶粒。

宏观层面上, SLM加工的零件的机械性能显示与锻造的316L相比, 屈服强度有所提高。热处理的影响 Riemer等人 and Montero Sistiaga等人已经报告了热处理的效果。这两项工作都表明, 消除应力的处理在晶粒大小和机械性能方面没有明显的变化。

对于晶粒大小和力学性能, 热等静压 (HIP) 和退火处理显示了屈服强度的下降, 同时由于细胞枝晶的完全溶解和保持了极限拉伸强度晶粒大小。由于铬、镍和钼的结合, 316L不锈钢的特点是具有较高的耐腐蚀性。

然而, 在SLM部件中, 由于局部熔化和快速凝固, 部件获得了高的热梯度。这可能是由于凝固过程导致成型后具有的残余应力。这些内应力不仅会影响机械性能、而且还会增加应力腐蚀开裂 (SCC) 的风险。因此, 通常在SLM工艺之后进行热处理以消除这些应力。扭曲部件常用于联合循环燃气轮机厂冷凝器的抽气泵中, 以减轻其压力。循环燃气轮机厂冷凝器的空气提取泵中使用的一个扭转器部件, 以在水中产生一个漩涡。用

传统的铸造方法生产一个备用旋流器需要制造一个铸模，而且事实证明，比起制造一个备用的扭转器，速度更慢，成本更高。比起用AM制造零件，速度更慢，成本更高。此外，由于原有的失效零件的表面有很多侵蚀和冲击损伤、表面粗糙度对这个零件来说不是一个问题。此外，部件故障产生的结果也不会那么严重。

由于捻线器是一个静态部件，而且提取泵是在室温下工作的。因此这个部件的主要使用中的损坏机制可能是腐蚀，也可能是SCC。由于SCC的风险可以通过减少内部应力来降低，所以对SLM制造的部件进行了不同的热处理。用SLM制造的部件进行不同的热处理。随后，浸泡腐蚀试验和SCC试验对建成后的部件和热处理后的部件进行了浸泡腐蚀试验和SCC试验。本文将细述描述了这些测试的结果。

2实验设计

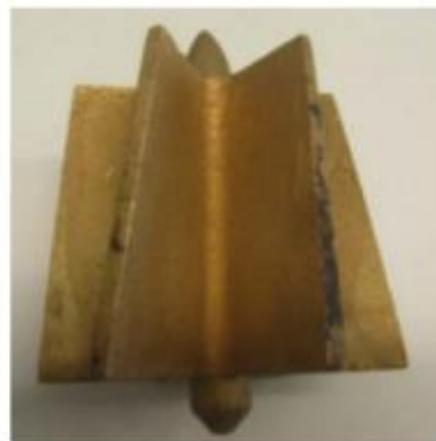
本研究中使用的材料是由SLM Solutions Group AG提供的316L不锈钢，粉末颗粒大小为10至45微米，呈球形。316L粉末的成分如表1所示，晶粒大小设定在ASTM B243。

表1 316L化学成分表

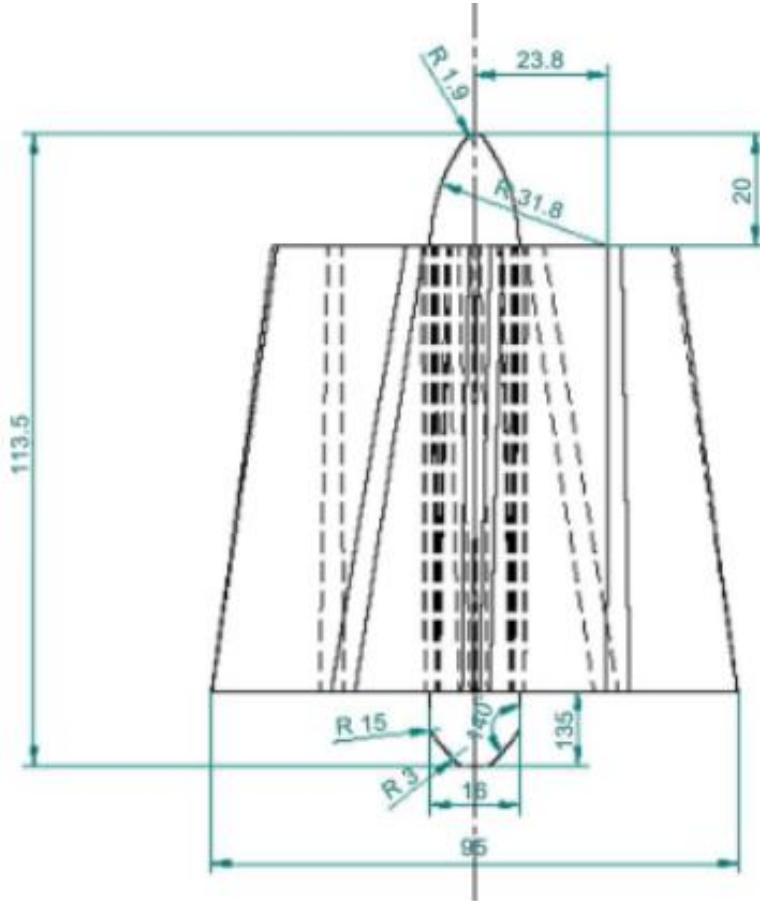
Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C
剩余	16.8	1.4	2.1	1.11	0.56	0.03	0.011	0.01



(a) 扭曲器



(b) 扭结器



(c) 扭结器部件示意图

图1 被选中用于AM的原始扭转其组件

Corrosion Testing of a Heat Treated 316 L Functional Part Produced by Selective Laser Melting

Evy De Bruycker¹, Maria L. Montero Sistiaga², Fabien Thielemans¹, Kim Vanmeensel²

¹ENGIE Lab.—Laborelec, Linkebeek, Belgium

²KU Leuven, Department of Materials Engineering, Heverlee, Belgium

Email: Evy.DeBruycker@engie.com

How to cite this paper: De Bruycker, E., Sistiaga, M.L.M., Thielemans, F. and Vanmeensel, K. (2017) Corrosion Testing of a Heat Treated 316 L Functional Part Produced by Selective Laser Melting. *Materials Sciences and Applications*, 8, 223-233. <https://doi.org/10.4236/msa.2017.83015>

Received: January 18, 2017

Accepted: March 5, 2017

Published: March 8, 2017

Copyright © 2017 by authors and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Selective Laser Melting (SLM) shows a big potential among metal additive manufacturing (AM) technologies. However, the large thermal gradients and the local melting and solidification processes of SLM result in the presence of a significant amount of residual stresses in the as built parts. These internal stresses will not only affect mechanical properties, but also increase the risk of Stress Corrosion Cracking (SCC). A twister used in an air extraction pump of a condenser to create a swirl in the water, was chosen as a candidate component to be produced by SLM in 316 L stainless steel. Since the main expected damage mechanism of this component in service is corrosion, corrosion tests were carried out on an as-built twister as well as on heat treated components. It was shown that a low temperature heat treatment at 450°C had only a limited effect on the residual stress reduction and concomitant corrosion properties, while the internal stresses were significantly reduced when a high temperature heat treatment at 950°C was applied. Furthermore, a specific stress corrosion sensitivity test proved to be a useful tool to evaluate the internal stress distribution in a specific component.

Keywords

316 L, Selective Laser Melting, Stress Corrosion Cracking, Residual Stresses, Heat Treatments

1. Introduction

Selective Laser Melting (SLM) is an Additive Manufacturing (AM) process which locally melts a metallic powder bed using a highly focussed laser beam. Complex functional metallic parts with competitive mechanical properties can

be built using a layer by layer manner. The high flexibility in design, low material waste and fast production of near-net-shape parts are the main advantages compared to conventional processing routes.

The SLM process has been widely used for the production of 316 L parts and the optimization of its laser scan parameters has been widely reported [1] [2]. Referring to the microstructure after SLM, a cellular-dendritic microstructure is observed at the micrometer level and elongated grains across several layers at the macro level [3]. The mechanical properties of the SLM processed parts show an increased yield strength compared to wrought 316 L [4] [5]. The effect of heat treatments has been reported by Riemer *et al* [6] and Montero Sistiaga *et al* [7]. Both works show that stress relieving treatments show no significant change in grain size and mechanical properties. Hot Isostatic Pressing (HIP) and annealing treatments show a decrease in yield strength while maintaining the ultimate tensile strength due to complete dissolution of cellular dendrites and maintained grain size [3] [7].

316 L stainless steel is characterized by a high corrosion resistance thanks to the combination of chromium, nickel and molybdenum [8]. However, in SLM components high thermal gradients are obtained due to local melting and a fast solidification process, which can result in residual stresses in the as built condition [9] [10]. These internal stresses will not only affect mechanical properties, but also increase the risk of Stress Corrosion Cracking (SCC). Hence, heat treatments to relieve these stresses are normally applied after the SLM process.

A so-called twister component, used in an air extraction pump of a combined cycle gas turbine plant condenser to create a swirl in the water (**Figure 1**), proved to be a good candidate to be produced by SLM. Producing a spare twister by conventional casting would require making a casting die and would prove to be slower and more expensive than creating the part by AM. Also, since the original ex-service part shows a lot of erosion and impact damage on the surface, surface roughness is not an issue for this part. In addition, the consequences of a component failure are only minor, since a second extractor is present to take over.

Since the twister is a static part and the extraction pump operates at room temperature, the main in-service damage mechanism for this component is corrosion and possibly SCC. Since the risk of SCC can be reduced by reducing the internal stresses, different heat treatments were carried out on the components manufactured by SLM. Subsequently, immersion corrosion tests and SCC tests were carried out on as-built and heat treated components. This paper describes the results of these tests.

2. Experimental Set-Up

The material used in this study was 316 L stainless steel provided by SLM Solutions Group AG with powder particle sizes ranging from 10 to 45 μm and spherical in shape. The 316 L powder composition is shown in **Table 1** as defined in ASTM B243.

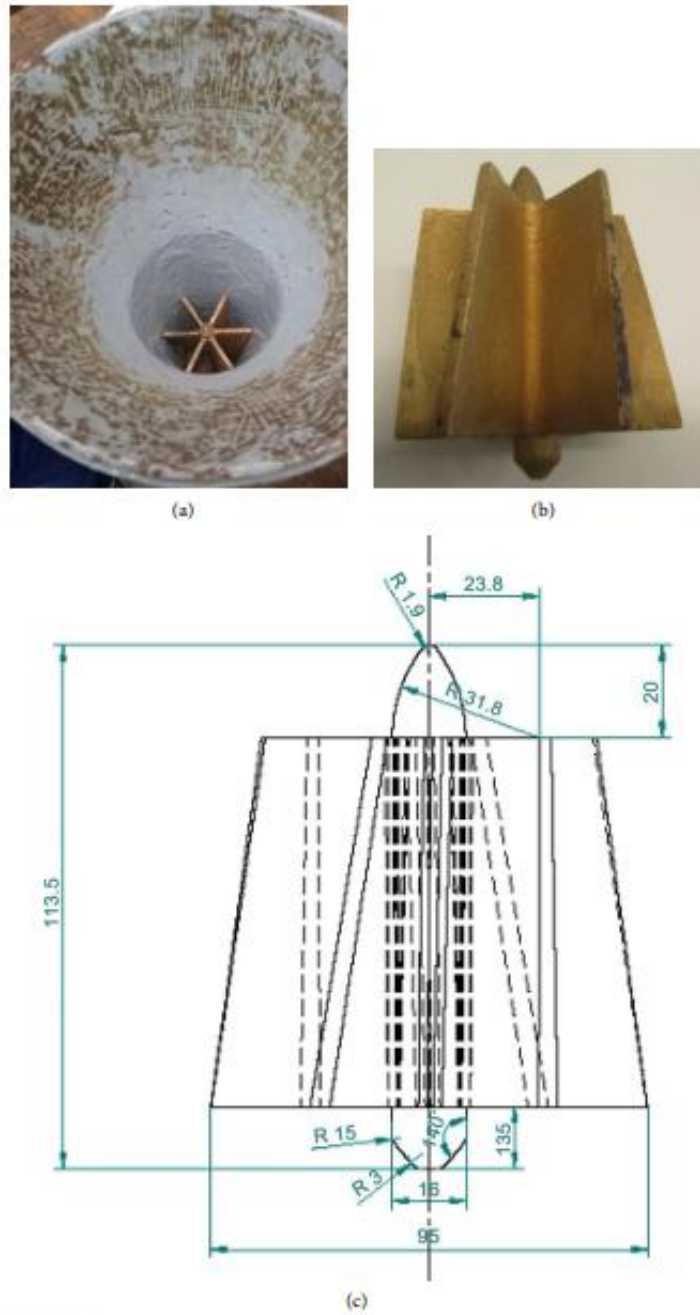
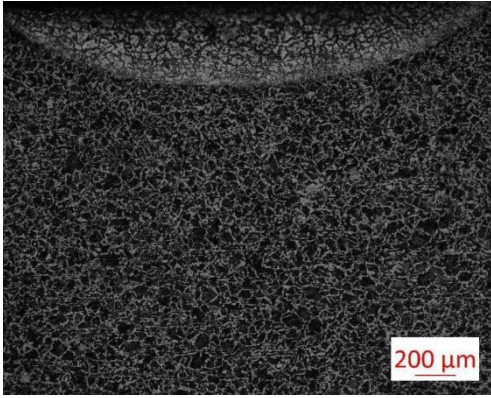


Figure 1. The original twister component which was selected for AM. (a) Twister inside the air extraction pump; (b) ex-service twister; (c) schematic drawing of the twister component.

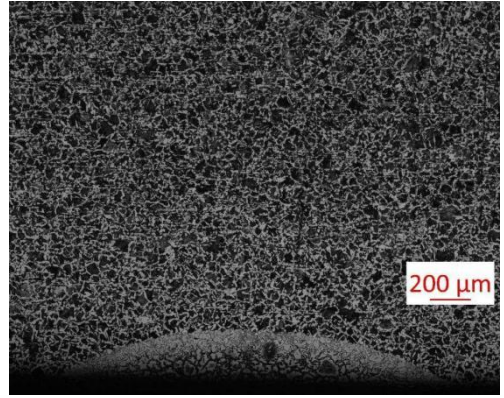
Table 1. Chemical composition in weight % of 316 L powder provided by SLM solutions AG.

wt%	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C
316 L powder	Bal.	16.8	10.4	2.1	1.11	0.56	0.03	0.011	0.01

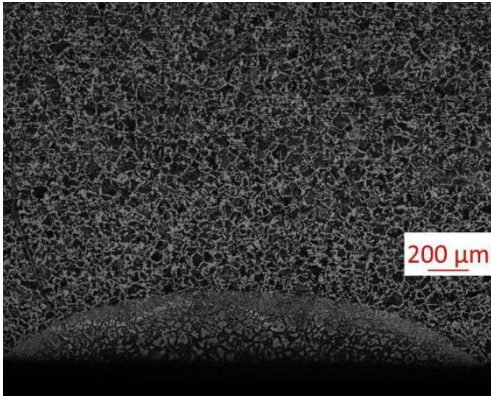
附录2:完整试样金相照片



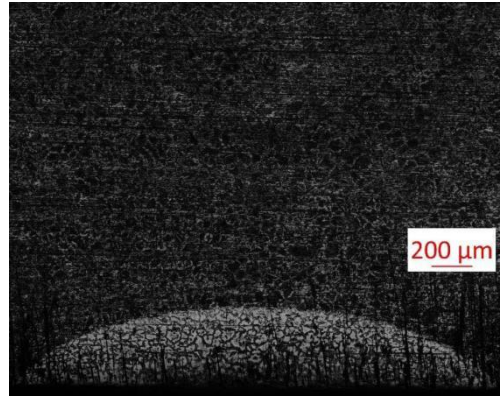
试样1



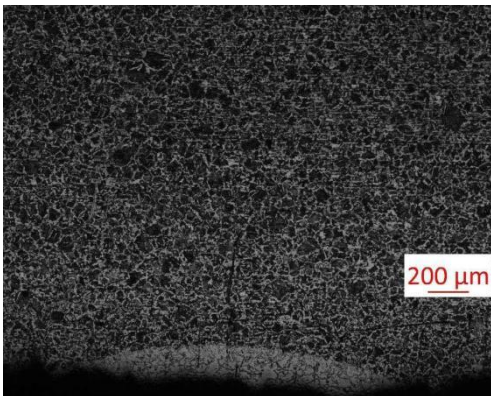
试样2



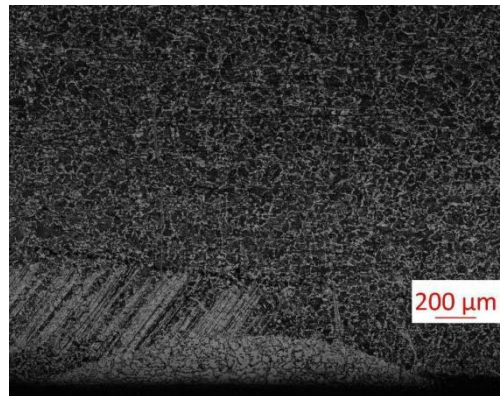
试样3



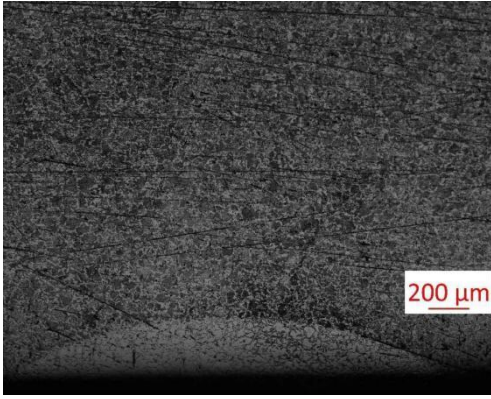
试样4



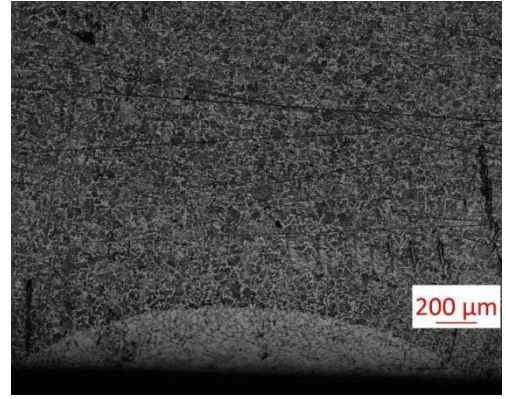
试样5



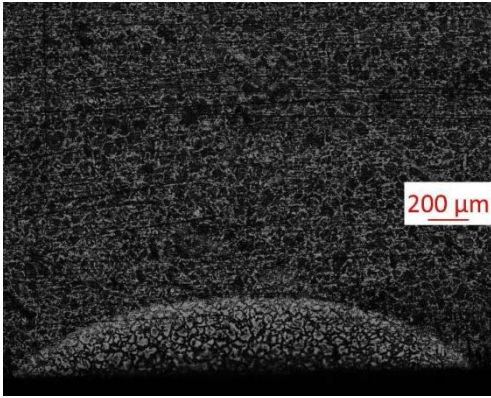
试样6



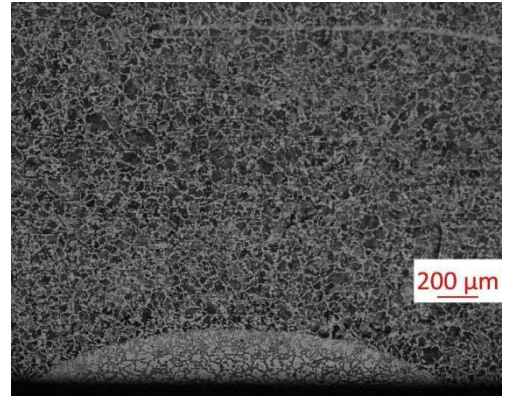
试样7



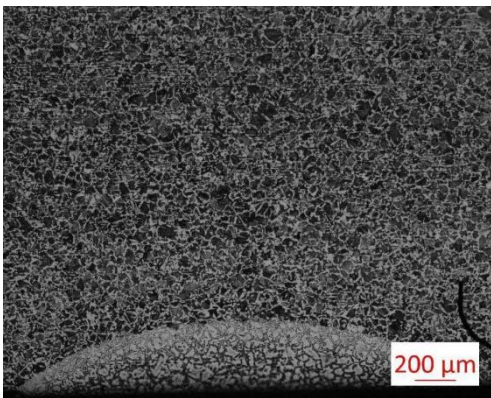
试样8



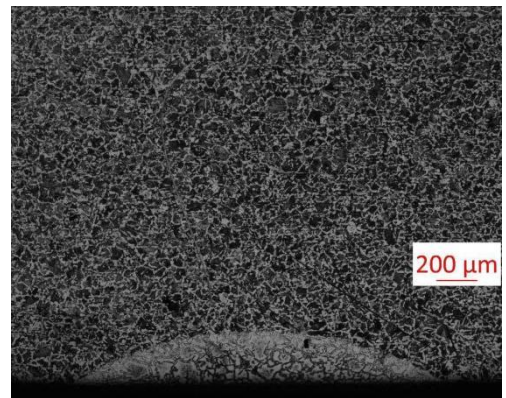
试样9



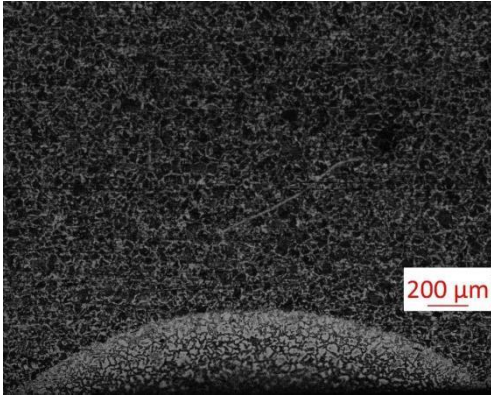
试样10



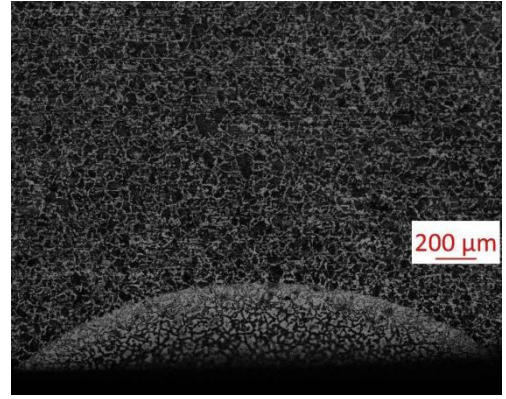
试样11



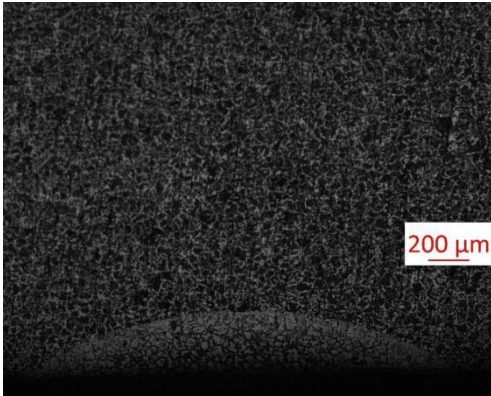
试样12



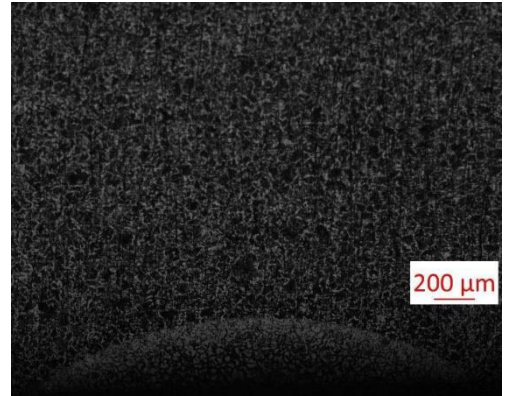
试样13



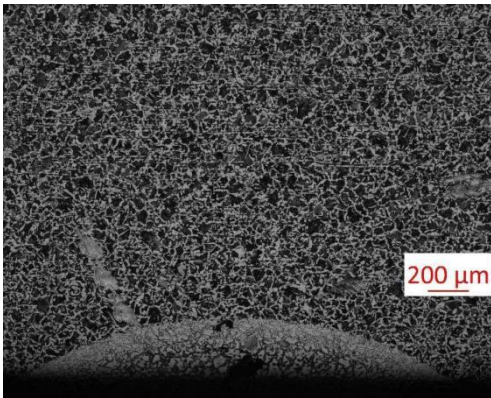
试样14



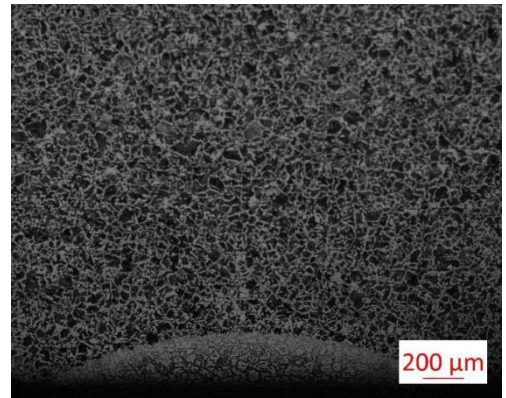
试样15



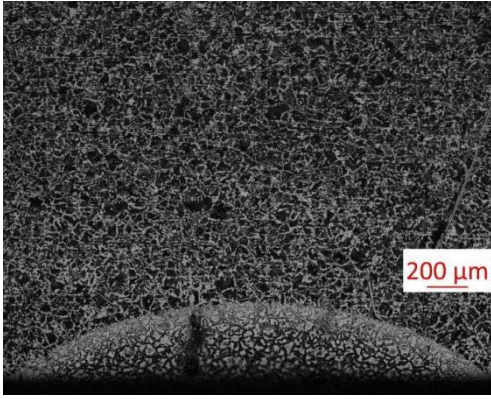
试样16



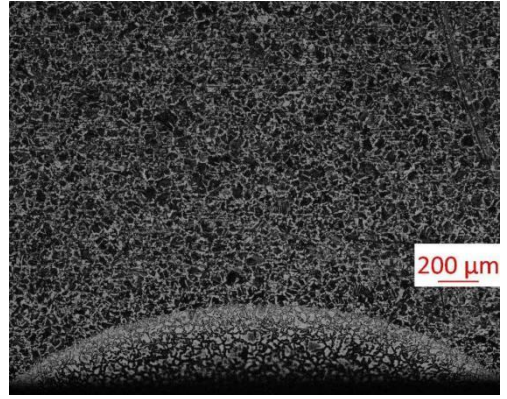
试样17



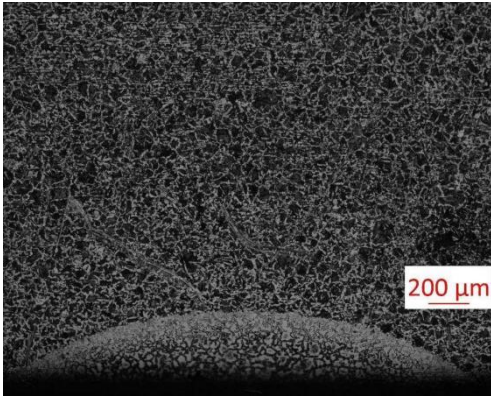
试样18



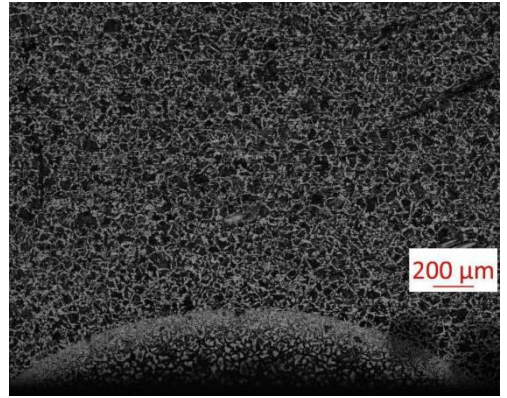
试样19



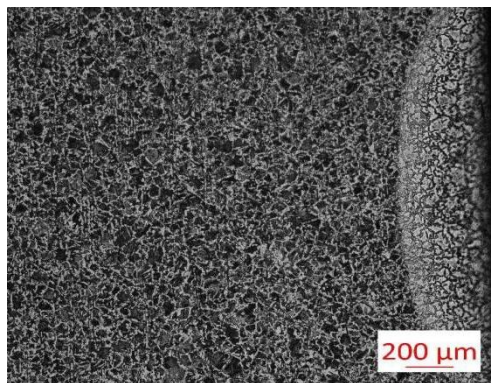
试样20



试样21



试样22



试样23

附录3: Fortran热源子程序代码

```

SUBROUTINE DFLUX (FLUX, SOL, KSTEP, KINC, TIME, NOEL, NPT, COORDS, JLTYP,
1 TEMP, PRESS, SNAME)
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
  DIMENSION COORDS (3), FLUX (2), TIME (2)
  CHARACTER*80 SNAME
C 固定格式不要动-----
  double precision ita, p, x, y, r0, t, v, x0, r1, pi
  t=time (1)
  pi=3.1416
  r0=0.0014
  ita=0.60
  p=400
  v=0.01
  x=coords (1)
  y=coords (2)
C 定义相关参数
  x0=v*t-0.04
C x0表示热源点的位置, t=0时, 表示热源点的边缘位于起点
  r1=((x-x0)**2+(y)**2)**0.5
C r1表示与热源点中心距离。x, y表示表面某一点的坐标
  flux (1)=((ita*p)/(pi*r0**2))*exp(-(r1/r0)**2)
  flux (2)=0
C -----
  return
  end

```

附录4: Matlab相关代码

```

%%%%%%%%散点图
x=[400,400,450,450,500,500,550,550,600,600];
y=[ 10, 12, 12, 14, 14, 16, 16, 18, 18, 20];
z=[0.6,0.62,0.63,0.63,0.62,0.58,0.59,0.59,0.6,0.53];
scatter3(x,y,z,'b')
xlabel('p(W)');
ylabel('y(mm/s)');
zlabel('η');
set(gca,'XTICK',400:50:600);
set(gca,'YTICK',10:2:20);
set(gca,'ZTICK',0.52:0.02:0.64);
grid on;
title('η离散点')

%%%%%%%%Griddata插值拟合
a=[400,400,450,450,500,500,550,550,600,600];
b=[ 10, 12, 12, 14, 14, 16, 16, 18, 18, 20];
c=[0.6,0.62,0.63,0.63,0.62,0.58,0.59,0.59,0.6,0.53];
d=max(a);
e=min(a);
f=max(b);
g=min(b);
[X,Y]=meshgrid(e:0.1:d,g:0.1:f);%网格化
Z=griddata(a,b,c,X,Y,'v4');%v4为griddata其中一种插值方法。本来默认是linear
surf(X,Y,Z);
shading interp;%shading faceted可重新显示网格
set(gca,'XTICK',400:50:600);
set(gca,'YTICK',10:2:20);
colorbar
legend("吸收率")
xlabel('p(W)');
ylabel('y(mm/s)');
zlabel('η');
title('曲面拟合')

%%%%%%%%Fittype拟合
x=[400,400,450,450,500,500,550,550,600,600];
y=[ 10, 12, 12, 14, 14, 16, 16, 18, 18, 20];
z=[0.6,0.62,0.63,0.63,0.62,0.58,0.59,0.59,0.6,0.53];
[X,Y,Z]=griddata(x,y,z,linspace(min(x),max(x)),linspace(min(y),max(y)),v4');
X1=reshape(X,[],1);Y1=reshape(Y,[],1);Z1=reshape(Z,[],1);
ft=fittype('a*(X/Y)+b*(X)+c*(1/Y)+d','dependent',{'Z'},'independent',{'X','Y'}, ...
'coefficients',{'a','b','c','d'});
[myfit,gof1]=fit([X1,Y1],Z1,ft)
figure('Name','Case1')
plot(myfit,[X1,Y1],Z1)
shading interp;

```

```

xlabel('p(W)');
ylabel('y(mm/s)');
zlabel('z');
set(gca,'XTICK',400:50:600);
set(gca,'YTICK',10:2:20);
title('fitype拟合重叠云图');
plot(myfit);
shading interp;
xlabel('p(W)');
ylabel('y(mm/s)');
zlabel('z');
set(gca,'XTICK',400:50:600);
set(gca,'YTICK',10:2:20);
title('fitype拟合曲面');

%%%%%%多元线性回归拟合
%%poly51
x=[400,400,450,450,500,500,550,550,600,600];
y=[ 10, 12, 12, 14, 14, 16, 16, 18, 18, 20];
z=[0.6,0.62,0.63,0.63,0.62,0.58,0.59,0.59,0.6,0.53];
[X,Y,Z]=griddata(x,y,z,linspace(min(x),max(x)),linspace(min(y),max(y)),v4');
X1=reshape(X,[],1);Y1=reshape(Y,[],1);Z1=reshape(Z,[],1);
[myfit2,gof2]=fit([X1,Y1],Z1,['poly51' ...
"])
figure('Name','Case2平滑拟合')
plot(myfit2,[X1,Y1],Z1)
shading interp;
xlabel('p(W)');
ylabel('y(mm/s)');
zlabel('η');
set(gca,'XTICK',400:50:600);
set(gca,'YTICK',10:2:20);
title('poly51')
plot(myfit2)
shading interp;
xlabel('p(W)');
ylabel('y(mm/s)');
zlabel('η');
set(gca,'XTICK',400:50:600);
set(gca,'YTICK',10:2:20);
title('poly51')

%%%%%%二次多项式拟合
x=[0 10 20 30];
y=[2.8 3.1 3.45 3.60];
p = polyfit(x, y, 2) %%二次多项式拟合
xx = 0: 1 : 30;
yy = polyval(p, xx);%%根据系数向量p计算在xx点处的函数值
plot(xx, yy, '-b',x,y,'markersize',20)

```

附录5:部分吸收率 η 检索表 (100/1000)

1	功率	扫描速度	吸收率
2	400	10	0.600
3	400	10.1010101	0.601
4	400	10.2020202	0.602
5	400	10.3030303	0.603
6	400	10.4040404	0.604
7	400	10.50505051	0.605
8	400	10.60606061	0.606
9	400	10.70707071	0.607
10	400	10.80808081	0.608
11	400	10.90909091	0.609
12	400	11.01010101	0.610
13	400	11.11111111	0.611
14	400	11.21212121	0.612
15	400	11.31313131	0.613
16	400	11.41414141	0.614
17	400	11.51515152	0.616
18	400	11.61616162	0.617
19	400	11.71717172	0.618
20	400	11.81818182	0.618
21	400	11.91919192	0.619
22	400	12.02020202	0.620
23	400	12.12121212	0.621
24	400	12.22222222	0.622
25	400	12.32323232	0.622
26	400	12.42424242	0.623

27	400	12.52525253	0.623
28	400	12.62626263	0.624
29	400	12.72727273	0.624
30	400	12.82828283	0.625
31	400	12.92929293	0.625
32	400	13.03030303	0.625
33	400	13.13131313	0.626
34	400	13.23232323	0.626
35	400	13.33333333	0.626
36	400	13.43434343	0.626
37	400	13.53535354	0.627
38	400	13.63636364	0.627
39	400	13.73737374	0.627
40	400	13.83838384	0.627
41	400	13.93939394	0.628
42	400	14.04040404	0.628
43	400	14.14141414	0.628
44	400	14.24242424	0.628
45	400	14.34343434	0.628
46	400	14.44444444	0.628
47	400	14.54545455	0.628
48	400	14.64646465	0.628
49	400	14.74747475	0.628
50	400	14.84848485	0.628
51	400	14.94949495	0.628

52	400	15.05050505	0.628
53	400	15.15151515	0.628
54	400	15.25252525	0.628
55	400	15.35353535	0.628
56	400	15.45454545	0.628
57	400	15.55555556	0.628
58	400	15.65656566	0.628
59	400	15.75757576	0.628
60	400	15.85858586	0.628
61	400	15.95959596	0.628
62	400	16.06060606	0.628
63	400	16.16161616	0.628
64	400	16.26262626	0.628
65	400	16.36363636	0.628
66	400	16.46464646	0.628
67	400	16.56565657	0.628
68	400	16.66666667	0.627
69	400	16.76767677	0.627
70	400	16.86868687	0.627
71	400	16.96969697	0.627
72	400	17.07070707	0.627
73	400	17.17171717	0.627
74	400	17.27272727	0.626
75	400	17.37373737	0.626
76	400	17.47474747	0.626

77	400	17.57575758	0.626
78	400	17.67676768	0.625
79	400	17.77777778	0.625
80	400	17.87878788	0.625
81	400	17.97979798	0.625
82	400	18.08080808	0.625
83	400	18.18181818	0.624
84	400	18.28282828	0.624
85	400	18.38383838	0.624
86	400	18.48484848	0.623
87	400	18.58585859	0.623
88	400	18.68686869	0.623
89	400	18.78787879	0.623
90	400	18.88888889	0.622
91	400	18.98989899	0.622
92	400	19.09090909	0.622
93	400	19.19191919	0.621
94	400	19.29292929	0.621
95	400	19.39393939	0.621
96	400	19.49494949	0.620
97	400	19.5959596	0.620
98	400	19.6969697	0.620
99	400	19.7979798	0.619
100	400	19.8989899	0.619
101	400	20	0.618