



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

本科生毕业设计

GH3039 航空高温镍基合金材料激光制孔工艺研究
Study on laser drilling technology of GH3039 aviation high
temperature nickel base alloy

姓 名 陈润泽

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 荆 楠

职 称 讲 师

完成时间 2022年6月3日



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

本科生毕业设计

GH3039 航空高温镍基合金材料激光制孔工艺研究
Study on laser drilling technology of GH3039 aviation high
temperature nickel base alloy

姓 名 陈润泽

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 荆楠

职 称 讲 师

完成时间 2022年6月3日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院	申 报 人	姓 名	陈润泽
专 业	飞行器制造工程		技术职务	中级
题目名称	GH3039 航空高温镍基合金材料激光制孔工艺研究			
题目类型	自拟	题目来源	其他项目	
课题来源、背景及意义	<p>随着科技的发展，激光加工在孔类加工手段中展现出其独特的优势，相较于传统机加工制孔工艺，激光加工具有较好的研究性与发展空间。由于硬度大、熔点高的材料的使用越来越多，为降低部分材料的打孔加工难度与成本，保证其精准度与光洁度，传统的加工方法已不能满足工艺要求，所以具备优异性能的激光打孔工艺也成为适应时代需要的一种技术。通过激光加工得到的孔在实验中体现出了寿命更好，性能更优的特点，所以本课题基于满足激光打孔的质量要求，使用高精密激光加工设备，设计并完成高效精密的斜孔加工。</p>			
任务及要求	<p>(1) 确定激光加工的设备，掌握设备的控制语言。 (2) 掌握材料自身特性，设计并亲自打孔。 (3) 通过控制打孔的功率、频率、保护气源种类与气压、占空比的数值打孔。 (4) 通过所得孔，分析不同参数对打孔的影响。 (5) 对所得孔进行圆度、锥度、孔端粗糙度、孔壁粗糙度、重熔层厚度、孔的允许加工误差来评价孔，进行工艺的整理与论证。</p>			
工作条件	激光加工设备，G6062H 加工机床，显微镜，APDL 数字化控制，GH3039 合金。			
知识与能力要求	掌握激光加工设备安全合理的使用方法，对所得孔进行圆度、锥度、孔端粗糙度、孔壁粗糙度、重熔层厚度、孔的允许加工误差来评价孔，进行工艺的整理与论证。			
系（教研室）审查意见：				
同 意				
负责人(签名)：张健 2022 年 12 月 1 日				



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

毕业设计（论文）任务书

题 目：GH3039 航空高温镍基合金材料激光
制孔工艺研究

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 陈润泽

学 号： 18414020116

起止日期：2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师： 荆 楠

任务书下达日期：2021年12月3日

毕业设计（论文）任务书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

随着科技的发展，激光加工在孔类加工手段中展现出其独特的优势，相较于传统机加工制孔工艺，激光加工具有较好的研究性与发展空间。由于硬度大、熔点高的材料的使用越来越多，为降低部分材料的打孔加工难度与成本，保证其精准度与光洁度，传统的加工方法已不能满足工艺要求，所以具备优异性能的激光打孔工艺也成为适应时代需要的一种技术。通过激光加工得到的孔在实验中体现出了寿命更好，性能更优的特点，所以本课题基于满足激光打孔的质量要求，使用高精密激光加工设备，设计并完成高效精密的斜孔加工。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

- (1) 确定激光加工的设备，掌握设备的控制语言。
- (2) 掌握材料自身特性，设计并亲自打孔。
- (3) 通过控制打孔的功率、频率、保护气源种类与气压、占空比的数值打孔。
- (4) 通过所得孔，分析不同参数对打孔的影响。
- (5) 对所得孔进行圆度、锥度、孔端粗糙度、孔壁粗糙度、重熔层厚度、孔的允许加工误差来评价孔，进行工艺的整理与论证。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

毕业设计论文

4. 推荐参考资料：

- [1] 张文. 镍基高温合金脉冲激光打孔数值模拟及实验研究[D], 江苏大学. 2016.
- [2] 张静. 温合金激光环切打孔数值模拟及实验研究[D], 江苏大学. 2018.
- [3] 董远浩. 激光技术在不同领域的应用, 哈尔滨工业大学[D]. 2018.
- [4] 杨继宏. 激光打微孔作用机理及工艺研究[D], 天津大学. 2008
- [5] 叶海彬. 大尺度不锈钢板密集微群孔激光加工仿真与实验研究[D], 哈尔滨工业大学. 2019.
- [6] 张明文. 工业机器人离线编程[M]. 华中科技大学出版社, 2017.
- [7] 范钦珊. 工程力学[J]. 高等教育出版社, 2010.

所在专业审查意见：

同 意

负责人：张健

2021 年 12 月 3 日



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

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目：GH3039 航空高温镍基合金材料
激光制孔工艺研究

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 陈润泽

学 号： 18414020116

起止日期：2021 年 12 月 3 日~2022 年 6 月 3 日

指导教师： 荆 楠

开题日期： 2021 年 12 月 3 日

一、 开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

（一）选题目的和意义

1、选题意义：

随着科技的发展，激光加工在孔类加工手段中展现出不可替代的优势，相较于传统机加工制孔工艺，激光加工具有较好的研究性与发展空间。通过激光加工所得到的斜孔在实验中体现出了寿命更好，性能更优的特点，所以本课题基于满足斜孔的质量要求，使用高精密激光加工设备，G 语言数控编程控制语言，设计并完成高效精密的激光打孔工艺。

2、选题目的：

由于硬度大、熔点高的材料的使用越来越多，为降低部分材料的斜孔加工难度与成本，保证其精准度与光洁度，传统的加工方法已不能满足工艺要求，因为激光加工可以加工硬度大，熔点高的材料，省时省力，精度高，而且可以加工形状复杂，难度大，数量多，尺寸小的孔，并且激光具有独特的高亮度，高方向性，高相干性和高单色性，可以加工斜孔、异形孔和复杂孔，所以具备优异性能的激光打孔工艺也成为适应时代需要的一种技术。

（二）国内外研究现状及发展趋势

激光打孔技术具有精度高、通用性强、效率高、成本低及综合技术经济效益显著，已成为现代制造领域的关键技术之一。目前，国内外激光打孔主要应用在航空航天、汽车制造、电子仪表、化工等行业。

1、国外研究现状：

上世纪 80 年代的中、后期，以美国、德国为代表的工业发达的国家已将激光加工深微孔技术大规模的应用到飞机制造业等行业。

1984 年美国一家发动机制造厂利用激光打孔设备对涡轮发动机零件进行数万个冷却孔加工；1982 年国外的某公司在航空发动机燃料室中加工的直径为 1.17~12.5mm 的小孔 9000 多个，且大多数孔与工件表面成 25° 角，燃料室是由 2.36mm 厚的长方形耐高温的镍基合金块组成，加工难度大。1985 年英国的一家公司用高功率的激光束精确可控的加工小孔，在 0.05 英寸厚的不锈钢和钛板上加工出孔径为 0.025 英寸的小孔 35 万个。近年，丹麦一家公司研究出高速打孔技术，在 3mm 厚的不锈钢材料上以 65 孔/秒的速度打孔，而在 1mm 厚的不锈钢上以 100 孔/秒的速度打出高质量的孔，以这样超级打孔的速度在 1 小时内可加工出以往需要 5 天才能打出的同样数量的孔。日本在厚 1mm 的氮化硅板上打出孔径 0.2mm 的孔，在 0.05mm 的陶瓷薄膜上加工出孔径 0.02mm 的孔；而在钛、白金、钨、钼等难加工的材料上也进行了有效的激光加工。

2、国内研究现状：

自二十世纪七十年代国内手表厂家使用红宝石激光器对手表的宝石轴承进行激光打孔以来,国内激光打孔技术发展了四十多年。由于国内激光器制造技术落后,在激光器以及工艺技术的引进方面受到了很多国外限制,国内激光打孔技术在开始的几十年内研究缓慢,主要研究方向都集中在毫秒等长脉宽激光器打孔,近几年才开始对激光打孔进行实验研究。从激光器产生到激光打孔成为新型的特种加工打孔方法,激光打孔技术日益成熟,国外对激光打孔做了大量的工艺和理论研究。虽然国内技术起步晚,但国内激光打孔研究势头日益增长。

1974年,容烈润对激光打孔过程进行热分析,指出较短的脉冲宽度打孔应力较小。1980年,国内四一零厂研制了固体激光器,并在叶片上进行激光打孔,加工出的孔径尺寸为 $0.5\pm 0.1\text{mm}$,精度高于当时的电火花孔加工。2007年,天津大学禹东赫研究了激光打孔过程的声波变化,利用声波信号的变化对孔加工过程实施监测,监测激光完成穿透材料形成微孔后的信号以此关停激光设备。2013年,北京航空制造工程研究所想出在不同厚度材料打孔,采用旋切打孔方式加工气膜冷却孔;2015年,江苏大学任乃飞等人研究了毫秒激光单脉冲孔加工5020铝合金材料时激光参数对孔形的影响。2021年,天津大学杨继宏利用有限元分析法,分析、建立并解决了碳钢激光打微孔中热源模型的难题。

(三) 研究的主要内容

本课题主旨研究激光制孔通过使用控制变量的方法,对不同工艺参数制孔后所得孔的性能对比分析。查阅文献归纳总结并分析,从而为进一步的研究设计和性能分析提供依据。

本课题主要研究的内容如下:



- (1) 确定激光加工的设备,掌握设备的控制语言。
- (2) 掌握材料自身特性,设计并亲自打孔。
- (3) 通过控制打孔的功率、频率、保护气源种类与气压、占空比的数值打孔。
- (4) 通过所得孔,分析不同参数对打孔的影响。
- (5) 对所得孔进行圆度、锥度、孔端粗糙度、孔壁粗糙度、重熔层厚度、孔的允许加工误差来评价孔,进行工艺的整理与论证。

参考文献

- [1] 张文. 镍基高温合金脉冲激光打孔数值模拟及实验研究[D], 江苏大学. 2016.
- [2] 张静. 温合金激光环切打孔数值模拟及实验研究[D], 江苏大学. 2018.
- [3] 董远浩. 激光技术在不同领域的应用, 哈尔滨工业大学[D]. 2018.
- [4] 杨继宏. 激光打微孔作用机理及工艺研究[D], 天津大学. 2008
- [5] 叶海彬. 大尺度不锈钢板密集微群孔激光加工仿真与实验研究[D], 哈尔滨工业大学. 2019.
- [6] 张明文. 工业机器人离线编程[M]. 华中科技大学出版社, 2017.

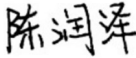
[7]范钦珊. 工程力学[J]. 高等教育出版社, 2010.

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.3- 2021.12.15	查阅文献, 收集文献, 学习相关知识	查阅到相关资料, 并且掌握了部分知识
2021.12.16- 2022.1.29	对查阅的知识进行分析整理, 详细的了解其内容并根据论文题目, 完成开题报告与任务书	完成开题报告与任务书
2022.1.30- 2022.3.16	学习掌握 G 语言, GH3039 力学性能, 起草论文主题框架	学会使用 G 语言控制激光加工设备加工 GH3039
2022.3.16- 2022.3.30	使用激光加工设备打孔	得到力学与运动学分析情况
2022.3.30- 2022.4.20	使用控制变量法对激光设备的功率、频率、保护气源、占空比的数值进行记录与分析	记录加工工艺
2022.4.20- 2022.5.18	撰写论文	完成论文
2022.5.19- 2022.6.19	优化论文	完成论文的优化
完成课题的 现有条件	1.学习学校现有的激光加工设备。 2.具有较好的数学、物理、力学的知识基础。 3.自主学习能力强, 自学力学知识及分析软件。 4.熟练运用材料性能分析软件。 5.拥有自我检查的能力。	
指导教师 意见	同意开题 指导教师:  2022年3月5日	
开题答辩 小组意见	同意开题 组长:  2022年3月5日	

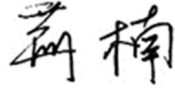
天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所提交的毕业设计（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： 

2022年 6月 3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： 

2022年 6月 3日

摘 要

激光加工是一种新兴的加工手段,相较于其他制孔工艺,激光加工省时省力,精度高,并且可以加工复杂孔和微孔,以其独特的优势得到了广泛的应用,由于激光加工具有广阔的前景和较高的研究价值,有不少学者都对其投入了大量研究。所以激光加工技术也成为了科学技术发展所需要的一种技术。

本文以 GH3039 航空高温镍基合金材料为对象,系统的进行了激光打孔工艺的研究。首先介绍了激光打孔工艺的国内外发展趋势、原理、优势、方法和过程。然后介绍了 GH3039 镍基合金,其次采用了控制变量的方法,使用激光加工设备与工业 G6020H 加工机床,研究激光束不同的功率、频率、保护气源、占空比的数值对获得的孔质量的影响。

其次通过显微镜对所得孔的结构作以评价。记录孔的加工工艺参数,对形成孔内毛刺,熔渣,挂壁的数据进行了反思与原因阐述。分析了造成孔内有毛刺,熔渣,挂壁的原因,与如何避免这些问题的方法。通过整理实验心得与打孔数据,整理获得激光加工 GH3039 镍基合金的工艺参数。

关键词: 激光打孔; 高温合金; 控制变量法; 微观组织; 毛刺; 熔渣; 挂壁

ABSTRACT

Laser processing is a new processing method. Compared with other hole making processes, laser processing saves time and labor, has high precision, and can process complex holes and micropores. It has been widely used with its unique advantages. Because laser processing has broad prospects and high research value, many scholars have invested a lot of research on it. Therefore, laser processing technology has also become a technology needed by the development of science and technology.

In this paper, the laser drilling process of GH3039 aviation high temperature nickel base alloy is systematically studied. Firstly, the development trend, principle, advantages, methods and process of laser drilling technology at home and abroad are introduced. Then GH3039 nickel base alloy is introduced. Secondly, the method of controlling variables is adopted. Using laser processing equipment and industrial G6020H processing machine tool, the effects of different power, frequency, protective gas source and duty cycle of laser beam on the obtained hole quality are studied.

Secondly, the structure of the obtained holes was evaluated by microscope. The processing parameters of the hole are recorded, and the data of burr, slag and hanging wall in the hole are reflected and explained. The causes of burr, slag and wall hanging in the hole and the methods to avoid these problems are analyzed. By sorting out the experimental experience and drilling data, the process parameters of laser processing GH3039 nickel base alloy are obtained.

Key words: Laser drilling; Superalloy; Control variable method; Microstructure; skin needling; Slag; Hanging wall

目 录

摘 要.....	12
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 国外研究现状.....	1
1.2.2 国内研究现状.....	3
1.3 本文研究目标.....	4
1.4 目标的实现方法.....	4
第二章 激光加工介绍.....	5
2.1 引言.....	5
2.2 激光制孔介绍.....	5
2.2.1 激光打孔原理.....	5
2.2.2 激光打孔优点.....	6
2.2.3 激光打孔过程.....	6
2.3 激光打孔的分类.....	7
2.4 本章小结.....	8
第三章 激光打孔实验.....	9
3.1 实验前准备.....	9
3.1.1 实验设备.....	9
3.1.2 材料介绍.....	9
3.2 数据选择过程.....	10
3.2.1 孔径的选择.....	10
3.2.2 功率与频率的选择.....	10
3.2.3 保护气、气压的选择.....	10
3.2.4 占空比的选择.....	11
3.3 打孔过程.....	11
3.4 本章小结.....	12

第四章 打孔实验现象分析	13
4.1 熔渣的分析.....	13
4.2 毛刺的分析	13
4.3 实验所得工艺的分析	14
4.4 本章小结.....	15
第五章 总结与展望	16
5.1 本文主要工作与贡献	16
5.2 未来工作的展望	16
参考文献.....	18
致谢.....	19

第一章 绪论

1.1 引言

随着我国机械制造水平与航空科学技术的发展，航空业表现出了明朗的发展前景与较好的发展空间。传统孔类加工工艺在我国已经趋向于成熟与饱和，但航空业的制造与研发对制孔工艺的需求，传统制孔工艺却不能满足。相较于全世界各国目前都在如火如荼研究的激光制孔工艺，我国的激光研究虽然起步不晚，但是技术相对落后^[1]，现阶段发展前景显著。激光加工工艺在孔类加工手段中展露出传统制孔不可替代的优势，与其他制孔工艺不同，激光加工配合现有的计算机模拟手段，具有更好的研究性与发展空间。其中激光加工所得到的斜孔与异性孔在实验与实际应用领域中体现出了寿命更长，基体材料性能更优的特点，可以解决航空发动机涡轮叶片上的气膜冷却孔，打印机喷头上用来喷墨的微小孔等^[1]。

在航空机械领域中，尤其是发动机燃烧室中，硬度大、熔点高的材料的使用占比率居高不下，由于其材料耐高温、耐腐蚀并且硬度高，抗氧化和熔融，传统机加工方法往往会造成材料的表面开裂，冷作硬化，材料熔渣明显，飞边毛刺等缺陷，这些常见的问题成为我国现阶段新兴发展航空的一大难点。为降低这些有特殊须求材料的加工难度与经济技术成本，保证每一道工序加工的精准度与可靠性，激光加工制孔工艺恰好可以解决了这一技术难题。因为激光加工工艺只需要掌握特定激光热源参数，可以尽最大程度避免在加工中引发的人为因素的影响。激光加工技术可以加工硬度大，熔点高的材料，同时可以做到省时省力，打孔精度高，并且可以加工形状复杂，难度大，数量多，尺寸小的孔。激光打孔的原理主要是利用聚焦镜将高功率激光聚焦到极小尺寸范围内，形成具有极高时间、空间集中性的激光束^[2]，由于激光具有独特的高亮度，高方向性，高相干性和高单色性，该高能激光束作用于任何材料后，几乎都可以使其瞬间发生熔化和气化^[3]，可以加工斜孔、异形孔和复杂孔，所以大力发展激光工艺也成为了当下应景、与国际水平接轨的技术需求。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

第一台激光器于 1960 年 7 月 8 日被制造出来，制造者为美国的科学家希尔多·梅曼^[4]。在上世纪的 80 年代的中、后期，在世界范围内激光加工工艺应用在制造业中的国家以美国、德国为代表，这两个工业发达的国家已经研发并实践激光制深微孔工艺应用在大规模飞机制造业中。

上世纪 70 到 80 年代，美国的一家公司在厚度为 76.2 μm 的金属材料上使

用激光打孔获得了 $50.8\mu\text{m}$ 的群孔^[5], 1984 年美国一家发动机加工制造厂已经成功完成利用激光打孔的设备, 对航空发动机中部分涡轮零件进行群孔的加工; 1982 年国外的一家公司在航空发动机的燃料室中成功加工直径为 $1.17\sim 12.5\text{mm}$ 的群斜孔 9000 多个, 并且大多数斜孔可以做到与工件表面呈 25° 角, 其中燃料室由 2.36mm 厚的方形耐高温镍基合金板组成, 加工难度大^[6]。1985 年英国的一家机械加工公司, 用高功率的激光光源精确可控的加工微小孔, 在 0.05in 厚的不锈钢与钛合金板上, 加工出孔径为 0.025in 的微小孔 35 万个。丹麦一家研发公司研究出高速打孔技术, 在 3mm 厚的不锈钢金属材料上完成以 65 孔/秒的高速打孔, 甚至在 1mm 厚的不锈钢金属材料上实现了以 100 孔/秒的速度打出高质量的孔。以这样的打孔速度在 1 小时中可加工出相较于传统制孔工艺需要 5 天才能够打出同样数量的孔。

1993 年, 瑞士 Richer zhagen 实现了使用水导激光的加工。此后, 其他各国也都进行了对水导激光加工的深入研究。2014 年, Rupesh Goyal^[7]等人在对 Ti-6Al-4V 合金材料进行了激光制孔环切激光打孔的研究, 验证了以神经网络为基础的打孔模型, 进一步荣国分析与利用该模型, 从不同方面进行参数的优化, 加工出了极小锥度的孔。在 2016 年, 他们又将影响孔圆度的实验数据进行分析与优化, 得到了加工圆度误差很小的孔的工艺参数^[8]。

随着超短脉冲激光加工工艺的出现, 激光打孔的质量得到质的提升, 飞秒激光热源在固体金属材料微细孔的加工方面, 充分的展现出优越和无法替代的作用。这项研究有力地阐释了飞秒激光热源可以完好的加工出质量高、无熔渣、无热影响和机械损伤^[9], 如图 1-1 所示。随着科学技术的进步, 激光加工工艺现在已经出现了短脉宽的激光加工手段, 大力推动了激光加工工艺的发展。

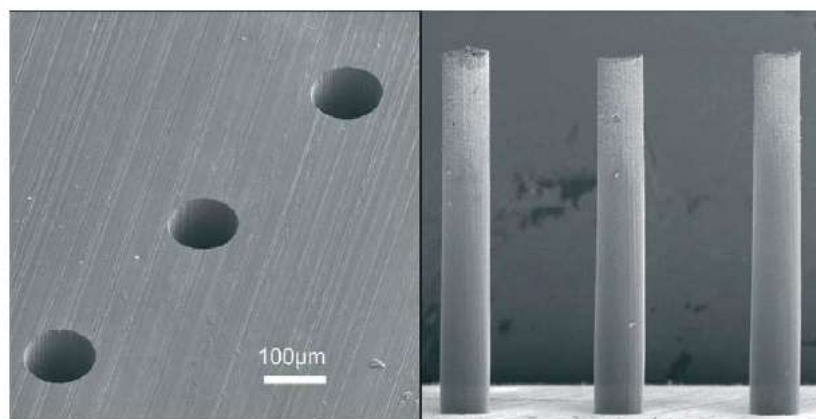


图 1-1 Kamlage 等人利用飞秒激光深孔加工 1mm 厚不锈钢薄片

目前, 在激光打孔的方面, 已经有多位学者进行了研究。英国曼彻斯特理工大学的 Low D K Y 等人, 基于激光加工实际材料去除的过程, 建立了一维稳态流体力学的物理模型, 将 O_2 作为辅助气体, 加入到模型中, 研究 O_2 对反冲压力产生的影响, 讲述了在 O_2 辅助下, 孔内熔池的流动速度^[10]。

英国焊接研究所的 Ng G K L 等人成功建立了一种数学模型，该模型是在 Low D K Y 等人的基础上，加入了激光脉宽的，从而变化带来的影响。其研究将反冲压力，作为用来推动孔内物体流动的主要动力，讲述了激光打孔中反冲压力的产生，及其对孔成型的影响^[11]。

1.2.2 国内研究现状

1970 年，国内手表厂家首次使用激光器对手表的轴承进行激光打孔。由于国内的激光加工设备研发和制造技术落后于发达国家，在激光加工以及打孔工艺的引进和应用方面受到了很多外国机构的限制，我国的激光打孔技术在起步的这些年内研究十分缓慢，其主要的研究方向均集中在等长脉宽激光热源的打孔，近些年才开始着手研究激光打孔的工艺技术。从激光设备的产生，到激光制孔工艺成为新兴的特种加工工艺选择，激光制孔技术也在向着一套成熟的体系渐渐推进。很多国外机构对激光打孔均做了大量的工艺实验和理论研究。虽然国内激光加工技术起步晚，但国内对激光加工工艺的研究势头正在日益增长。

1974 年，容烈润对激光打孔过程首次使用热分析，指出较短的脉冲宽度的激光打孔应力较小。1980 年，我国四一零厂研制出了固体激光器，并在涡轮叶片上进行激光打孔，得到的孔径尺寸是 $0.5\pm 0.1\text{mm}$ ，精度已经高于当时的电火花加工。2007 年，天津大学的禹东赫对激光加工过程的声波变化进行研究，通过利用声波信号的变化从而实现对孔加工工艺过程实施监测，监测到激光穿透材料后形成微孔的信号来关停激光设备。2007 年，哈尔滨工业大学的李灵首次对水导激光加工技术进行研究，对水导激光加工技术，从理论和工艺方面开展了深入的分析^[12]。

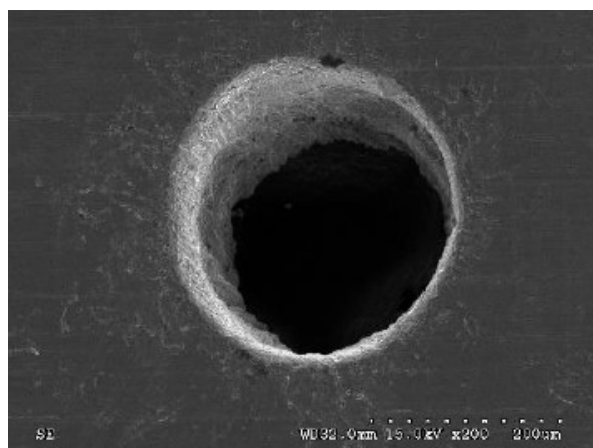


图 1.2 水导激光加工 K24 高温合金

2013 年，北京航空制造工程研究所研究出在不同厚度合金材料上打孔，采用旋切打孔的方式来制造气膜冷却孔；2015 年，江苏大学的任乃飞等人参与了单脉冲激光打孔参数对 5020 铝合金材料孔形的影响。2021 年，天津大学的杨继宏利用有限元分析法，创建分析 ANSYS 有限元分析，解决了碳钢材料激光打

微孔时热源模型的难题。

中国科学院的葛志福建立激光制孔的三维数值模型，并利用 level set 的方法连续追踪小孔加工熔化后的气液界面分析^[13]，该模型很好地模拟了激光制孔材料的变化过程，如图 1.3。

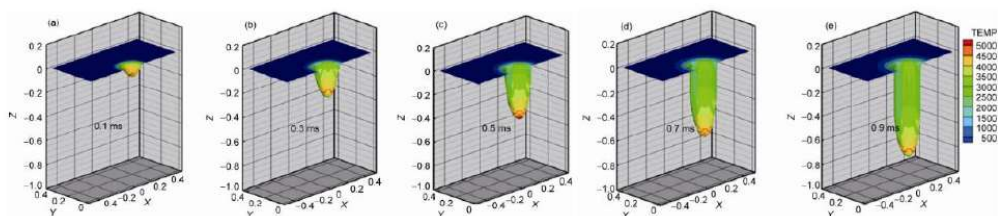


图 1.3 激光打孔中孔界面的演变过程

1.3 本文研究目标

本文将使用激光加工设备，在 GH3039 高温镍基合金表面制孔，通过使用控制变量法完成激光数据的实验与分析，包括数据的采集以及实验中产生的问题，产生问题的原因，以及解决的方案，使 GH3039 镍基合金存在一套可行，可靠的激光和打孔工艺流程。为我国航空发动机涡轮叶片冷却气膜孔与燃烧室内部耐高温合金的选取献上绵薄之力。

1.4 目标的实现方法

查阅相关文献，使用控制变量法，根据国内外已有的加工经验，对实验进行设计。具体步骤如下：

- 1、掌握使用激光加工的设备，掌握设备基于 G 语言和 CAD 图像控制的数字化控制语句的编写操作以供完成实验。
- 2、学习激光加工对应知识，初步掌握激光加工的各项参数指标的意义。
- 3、在相应材料上完成数个孔的加工后，通过显微镜观察与记录并分析评估。
- 4、确定激光加工 GH3039 航空高温镍基合金材料通过不同参数下，激光制孔的最优数据，整理其加工工艺，方法与数据。
- 5、降低成本并提高可靠性与安全性，整理其加工工艺，方法与数据编写激光加工工艺的方案。

第二章 激光加工介绍

2.1 引言

通过激光加工后的孔可以表现出较好的垂直度与圆度，合理的掌握各项工艺参数可以很大程度的避免加工孔上带有毛刺或者飞边，与传统加工相比较激光加工的优势体现在定位精度高，打孔时间快，不受材料限制，配合气源系统与冷却系统，材料受高温之后不会发生明显的形变与受损。所以激光加工的前景十分明亮，很适合加工群孔。被激光照射到的材料，表面温度会在极短的时间内，达到其材料的沸点，并且被去除，之后只有极少的热量可以沿横向传播，所以所得孔周围的热影响范围很小。

2.2 激光制孔介绍

2.2.1 激光打孔原理

激光加工指通过使用高能量的激光束照射材料表面，使材料表面需要加工的区域吸收激光束的能量，当材料表面物质接受热量达到熔点时，材料会由固态转变为熔融态。继续使用激光束照射在材料表面，材料中已融化的熔融态物质，会由于受到较高的热量，由液态转化为气态等离子体云^[1]，产生火花四溅的场景，如图 2.1，实现由固体转化为液体，再转化为气态的形式离开材料，在激光束不断作用在材料表面以及材料内部时，材料会经历产生盲孔到通孔这一过程。

在激光束照射区域，大部分材料均会气化，在其热辐射影响区域内，部分微量的材料已达到熔点时也会变成重铸体，留在孔壁上，形成材料挂壁现象。物态表现为：孔边界材料由固态传热达到熔点后液化，加工临界区域内部分材料随着制孔深度加大（激光在短时间内持续照射），待加工完成后孔壁临界区域冷却，后由液态再重铸为固体。由于激光加工时能量转化速度较快，时间较短，下面配合图片进行瞬时分析材料受激光作用温度升高时，详述温度升高、表面融化、气化蒸发、蒸发喷射这四个阶段，如图 2.1 所示

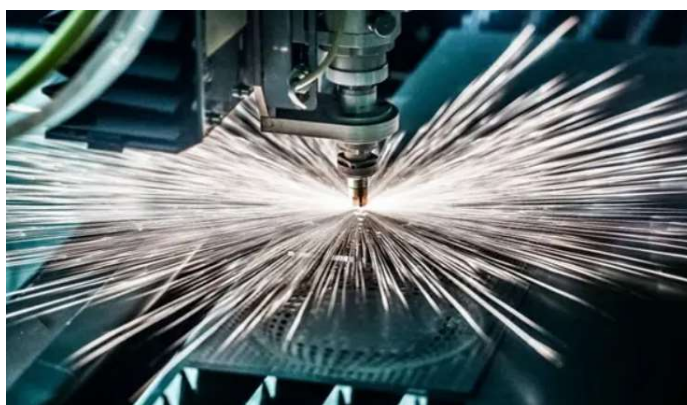


图 2.1 激光加工过程中的火花

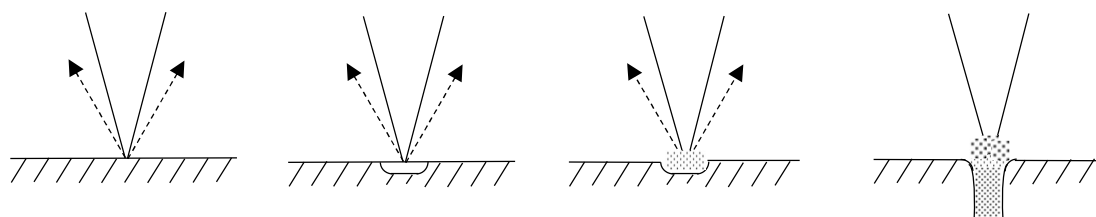


图 2.2 (a) 表面温度升高 (b) 表面融化 (c) 汽化蒸发 (d) 形成孔

激光加工是使用高亮度、高方向性、高单色性和高相干性的激光光束照射材料表面，加工变量分别有功率，波长，表面情况，材料性质。影响孔质量的变量在第三章进行详述。

2.2.2 激光打孔优点

激光加工技术之所以能够这样迅速的发展，因为激光有四大特点：高亮度、高方向性、高单色性和高相干性，激光所具有的优异特性是普通光源望尘莫及的^[17]。

激光打孔具有速度快，效率高，经济效益好，可在脆、硬、软等各类材料上进行打孔，无工具损耗，打孔可获得大的深径比，适合于数量多，高密度的群孔加工，可在难加工的斜面上打斜孔，异形孔。

激光加工的特点还在于激光是单色光，它因为自身具备很好的特性：强度高、方向性好。在激光设备加工处理时，激光束可以聚焦成几微米直径的光斑，能量密度可以达到 $1 \times 10^9 \text{W/cm}^2$ ，同时激光加工也可以产生 $1 \times 10^5 \text{°C}$ 以上的高温，并能在毫秒单位甚至更短的时间内，使几乎任何材料熔化、蒸发、汽化而达到加工目的^[17]。

表 2.1 不同种类制孔差异对比

打孔种类	速度	可加工材料	制孔厚度	孔深比
激光打孔	快	无材料限制	20mm	200
机械打孔	慢	质地较软材料	-	3-5
冲压打孔	快	非延展性材料	-	低
电化学打孔	0.012- 0.018mm/s	导电材料	-	高
电火花打孔	-	薄材	-	-
电子束打孔	快	要求真空	2mm	10

2.2.3 激光打孔过程

激光打孔时，材料温度达到融化温度（图 2.2 (a)），未达到蒸发温度（图 2.2 (b)），激光开始破坏材料，使材料发生相变（图 2.2 (c)），此时材料由固

相转化为液相。材料温度达到蒸发汽化温度时，材料开始发生剧烈相变，由液相变为气相（图 2.2（d））。不断积累增加的热量使材料蒸汽以较大压力喷出，配合激光加工设备的保护气系统，展现出火光四溅的过程（图 2.1）。

2.3 激光打孔的分类

激光加工制孔的方法随对孔的要求各有所异，通常适用于不同工况与不同需求，可以系统的分为下列四种加工方法：

（1）复制法

复制法打孔加工工艺，其也被称作为冲击打孔。冲压打孔包括单脉冲激光打孔和多脉冲激光打孔^[14]。单脉冲激光打孔指的是激光加工过程中，只使用其中一个脉冲数据进行打孔。多脉冲激光打孔指的是通过选用多个激光脉冲进行打孔。其中单脉冲打孔一般只适合在厚度很薄的材料上，用来制作通孔或者用于加工盲孔。相较于能量较高的单脉冲激光打孔，选择多个能量较低的脉冲组合，不仅能获得更大的孔深比，而且所得的孔更具有可靠性。

多脉冲激光打孔工艺中一般采用改变脉宽的方法，从而获得锥度较小的孔，而且打出的孔的圆度也比较好。这种方法还可以使工件上横向的热能传导降到最低，从而保证孔的光洁度，不过多脉冲激光打孔比较容易导致孔径变大，孔的圆度与锥度需求容易超差，多脉冲激光打孔所得的小孔周围也容易形成微裂纹^[15]，工业上大多数的孔都属于通孔，多脉冲激光打孔更容易加工出通孔和深度较大孔，多脉冲激光打孔在工业上应用更广泛。

（2）轮廓迂回法

轮廓迂回法又可以细分为环切激光打孔和螺旋激光打孔^[16]。通常环切激光打孔用来获得直径较大的孔。选择环切激光打孔，来加工直径较大的孔的原因是：加工较大孔径时，需要在加工材料上施加更多的能量。而且激光器输出的能量随着加工深度的变化，激光发射透镜的焦点却不会变化，导致激光加工时的能量在孔的轴向分布不够均匀，这时候激光作用在材料上，打出的孔的形状也会不规则。解决方法是在加工的时候让工件随着加工过程，运动起来，这样可以减小激光束的能量分布不均带来的影响。具体方法是让工件绕着距离激光束焦点 $D/2$ 作回转运动，这样只需要工件做回转运动，就能够得到直径为 D 的孔，所得到的孔的质量也会较好。

螺旋激光打孔质量很高，孔的圆柱度和粗糙度相，比较复制法可以得到很大的改善。采用螺旋激光打孔的方法，还可以抑制重铸层的产生。因此已经被应用到一些对孔的质量要求较高的领域。图 2.3 展示了不同的激光打孔方法。

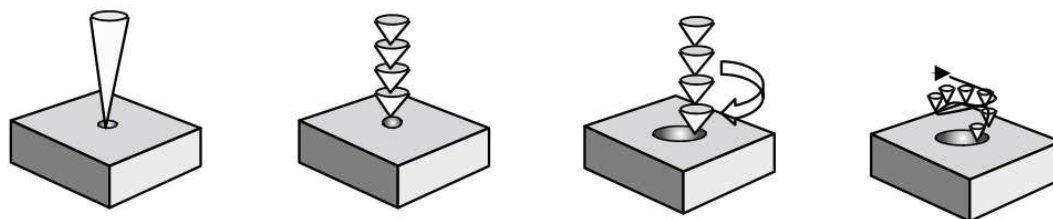


图 2.3(a)单脉冲激光打孔;(b)多脉冲激光打孔;(c)环切激光打孔;(d)螺旋激光打孔

2.4 本章小结

本章对激光打孔前的理论进行了说明，从激光加工打孔的知识理论，到激光加工的方法，以及对材料的理解进行了学习。为下一步实验奠定了一定的技术支持与工作基础。也为后续的研究奠定了思路与方向。

第三章 激光打孔实验

3.1 实验前准备

3.1.1 实验设备

本实验使用单脉冲连续环切激光加工设备进行数据探求，使用工业 G6020H 加工机床进行打孔实验，使用显微镜进行微观观察。G6062H 激光加工设备包括冷却系统，气源系统，电源系统以及其他安全保护设备。因生产材料供应商要求，本论文不附 G6020H 设备图片。

3.1.2 材料介绍

GH3039 航空高温镍基合金为固溶型强化合金，在 800℃ 下具有很好的强度和热疲劳性能，1000℃ 以下抗氧化性能相较于其他材料十分良好。长期使用的材料，其的组织稳定，不容易发生材料疲劳，850℃ 以下的航空发动机燃烧室使用 GH3039 满足其热力学要求。该合金可加工性也十分优秀。

表 3.1 GH3039 高温合金化学成分表

GH3039 高温合金化学成分表					
C	Cr	Ni	Al	Ti	Mo
≤0.08	19.0-22.0	余量	0.35-0.75	0.35-0.75	1.80-2.30
Nb	Fe	Si	S	Mn	P
0.90-1.30	≤3.00	≤0.80	≤0.012	≤0.40	≤0.02

(注：合金中允许有 Ce 存在。合金中 Cu=0.20%)

GH3039 航空高温镍基合金作为一种固溶型强化镍基合金，其优秀的耐高温、耐腐蚀和良好的成形性能，目前已经被不同研究所与高校研发测试，用于航空发动机的热端零件。应用于航空发动机的热端零部件，常工作在高温高压与交变载荷环境中，在发动机研发推重比、空燃比不断增大的情况下，GH3039 材料比普通锻造材料更能提高航空发动机关键器件的可靠性，并延长其 TBO 测试与性能试车，动态响应试车寿命，具有重要的经济意义和研发价值。本次实验选取 1mm 厚的板材为研究对象。

表 3.2 导热率

导热率									
θ/°C	100	200	300	400	500	600	700	800	900
λ (W/(m·C))	13.8	15.5	17.2	18.8	20.5	21.8	23.4	25.1	26.8

表 3.3 其他性能

密度	熔点	弹性模量	剪切模量	泊松比	线膨胀系数
8.3g/cm ³	1374- 1420°C	544GPa	19GPa	1.18	16.4/°C

3.2 数据选择过程

初始数据:

本实验设备额定功率为 6KW，默认脉冲为 5kHz，脉宽为 20ms，占空比为 100%，保护气为氮气，气压为 1MPa。

3.2.1 孔径的选择

通过使用 GH3039 航空高温镍基合金材料打孔后，观察 $\Phi 1\text{mm}$ 、 $\Phi 2.5\text{mm}$ 、 $\Phi 5\text{mm}$ 的三类孔，得到结果为 $\Phi 2.5\text{mm}$ 的孔最符合实验所需，可以清晰的表现出飞边、毛刺与孔壁光洁度

3.2.2 功率与频率的选择

通过打排孔的方式，通过控制变量法控制功率，升序打孔（10%~100%），实际功率为（600W~6000W）；与推求功率数值类似，通过控制变量法控制频率，升序打孔（10kHz~50kHz），如图 3.1

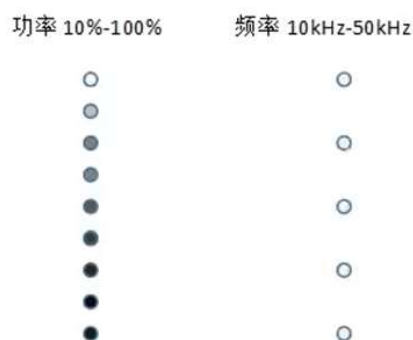


图 3.1 功率推定选择方案

通过大量实验，总结了一系列问题，确定了打孔功率为 50%（实际频率为 3KW）；打孔频率为 5kHz。频率影响孔径，对出口边缘的熔渣影响不大。

3.2.3 保护气、气压的选择

激光作用于不同的材料时，要用不同的辅助（保护）气体。激光设备作用的材料的厚度不同，其保护气体的压力也都要发生变化，保护气体的气压对结果具有直接影响。保护气体用于保护其精密，复杂的光学器件、驱动镜头保护气闸。

保护气体不但可以将加工过程中产生的等离子体云和加工结束容易产生挂壁的熔渣在加工结束后吹走，还可以通过风冷。冷却工件，清洁激光器透镜的作用，选用不同种类的保护气体，更能够改变激光加工的速度及孔表面质量，对特殊金属的加工具有重大意义。保护气体类型有压缩空气、氦气、氧气、氮气、氩气等。压缩空气与氮气作为切割时的保护气体，可有效的防氧化膜发生^[17]。压缩空气适合于铝板、非金属及镀锌钢板的激光加工处理，在一定程度上，它可以减少氧化膜的产生，并且可以节省成本。一般用于切割不是较厚的板材，以及对切割端面要求不是太高时使用。其在一些钣金产品行业应用较多。氮气属于惰性气体，在激光加工时可以抑制产品切割端面氧化，阻止燃烧。在板料较厚时容易发生。氧气适合于加工深度较厚或者加工行程较大的材料，以及较高速度的快速切割。如加工碳素，钢板等，增大气压，会使孔内反冲压力减小，在加工过程中会使已气化的熔融材料密度减小，同时因为气压的增大，导致加工材料加速冷却，孔内流体与气态材料粘滞力增加，减小孔尺寸，增大锥度。若气压不足，无法正常吹走已熔融的等离子云，导致材料温度过高而无法冷却，也会使重熔层厚度增加

这里实验所用的材料为 GH3039 航空高温镍基合金材料，由于材料本身的熔点较高，高能量激光照射容易产生表面与孔壁氧化，以及不能将高温熔融态金属残渣吹出导致由残渣挂壁的情况，选取高压氮气为保护气。

3.2.4 占空比的选择

激光脉冲占空比是指每一脉冲中，激光束照射工件的时间所占的比例，在平均功率一定时，激光脉冲的占空比减小，则加工的峰值功率会随之处于一个函数关系变大。每次脉冲照射时的能量也会以函数的形式增加。另外，由于占空比较小时，激光做功在连续时间内的空挡时间也会同时增加，可以变相的降低共建的温度，抑制材料过度加工飞溅，随着脉宽的增加，表面熔渣高度增加，由计算得出峰值功率降低，所以会导致打孔效率降低。平均功率(P_a)，占空比(D)，脉冲峰值功率 $P_p = \frac{P_a}{D}$ ，1脉冲时间 (T) = $\frac{1}{\text{频率}} = \frac{1}{5000\text{Hz}} = 0.0002\text{s}$ ，脉冲宽度 (t) =

1脉冲时间 (T) \times 占空比(D) = $0.0002\text{s} \times 100 = 20\text{ms}$ ，峰值功率 $P_p = \frac{P_a}{D} =$

$\frac{3000\text{W}}{100\%} = 3000\text{W}$ 。本实验因研究材料属于耐高温材料，需要高热量的激光束作用，

所以选取占空比为 100%。

3.3 打孔过程

将 GH3039 航空高温镍基合金材料水平放置在 G6020H 平台上，使用夹具夹紧，导入已经完成绘制的 CAD 模型（本实验设备支持 G 语言数字化编程控制与 CAD 绘图控制），机器识别完成后，先预运行打孔路线，确定设备光源系统，冷

却系统，气源系统均正常并且无任何机器故障代码，最后调整工件的平面位置，确保激光不伤害 G6020H 平台，均做功在 GH3039 航空高温镍基合金上。关闭激光加工设备安全门，待系统自动锁定安全门后开始实验，如图 3.2，一定要保证实验过程中人员的安全，同时确保自己规范操作，不损伤激光器的激光头与透镜。



图 3.2 试验现场与指导教师

3.4 本章小结

在实验过程中难免会遇到技术失误与对激光设备知识不足的情况，需要常查激光设备操作使用手册。在本次实验中，遇见的问题有：功率、频率、脉冲、气源的调节，以及会涉及因为操作生疏导致激光加工设备计算机系统无法识别与不可预知的故障代码。在对参数选择时听取了指导教师与技术专家的建议，避免了频率盲目调节导致激光加工透镜的损坏，避免了损伤设备关键部件的风险。在处理未知故障代码时，查阅使用操作手册，按照手册所描述的排故手段依旧无法使设备正常运行，经过与教师的沟通达成一致，选择关闭激光设备，后逐一重启各个设备系统。期间还遇到激光器调零时三坐标激光头卡滞的情况，需用手动摇臂代替电脑控制系统实现调零对焦。本次实验无大量的材料浪费，无设备与部件损坏，无人员安全事故产生，在对激光器的研究与调试阶段耗费了大量的时间与精力，最终十分顺利的达到了预期的实验效果。

第四章 打孔实验现象分析

4.1 熔渣的分析

GH3039 航空高温镍基合金有较好的耐高温性能，需用高能高频激光在其工件表面做功，如果能量过高就会损伤孔壁的光洁度与粗糙度，能量过低的话会导致工件加工背面产生毛刺和挂边。脉宽增大，熔渣的高度增加。

本次实验功率低于 3KW 的孔均体现出有熔渣

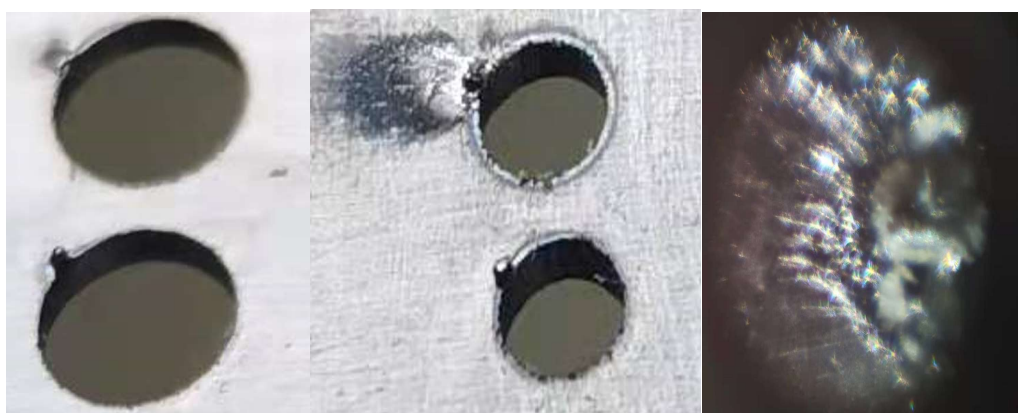


图 4.1 熔渣

4.2 毛刺的分析

功率不足也会产生毛刺

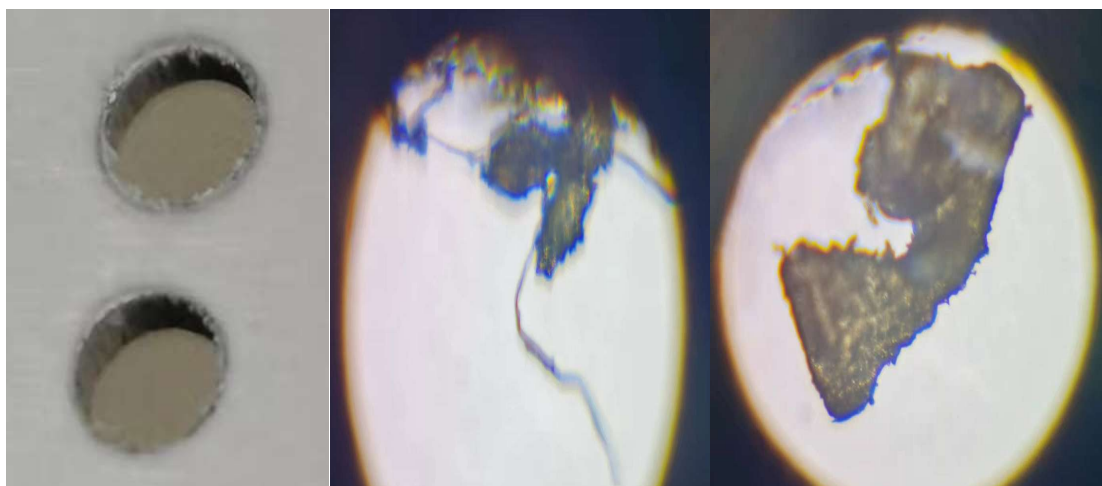


图 4.2 毛刺

产生毛刺的常见原因及解决方法如下：

激光切割机产生激光束焦点的上下位置出现偏差，导致能量没有恰好汇聚到工件上，工件没有被充分汽化，使熔渣产生量增多，不容易吹掉，从而更容易产

生毛刺。解决方法为对激光束焦点的位置进行调整，根据其产生的偏移位置，调整到最佳状态。

激光切割机的输出功率不够，没能有效的汽化金属，从而产生过多的熔渣和毛刺。解决方法为对激光切割机的工作是否正常情况进行检查，如果不正常的话，需要及时修理维护；如果正常的话，还要检查输出数值是否正确。

激光切割机的切割线速度过于缓慢，破坏了切割面的表面质量，产生毛刺。解决方法为及时调整并提高切割线速度，使其达到正常的值。

激光切割机的保护气体纯度达不到要求的标准，也会使工件产生毛刺。解决方法为更换纯度更高的保护气体。

激光切割机工作的时间过长，使设备出现了不稳定的工作状态，这样也会导致毛刺的产生。解决方法为关闭激光加工设备，过一段时间再重新启动，使其得到充分的休息。

当选择功率为 3KW，脉冲频率为 50kHz，1.0MPa 的氮气作为保护气，脉宽为 20ms，脉冲占空比为 100%的激光设备进行打孔，所得到的孔光洁度好

4.3 实验所得工艺的分析



图 4.3 实验数据制孔

首先选择打孔方式，为单脉冲连续环切打孔，可以保证激光在加工材料时让可以避免能量分配不均匀的问题，其次时选取材料厚度为 1mm，便于加工，也有利于分析。使用 ANSYS 也在模拟数据方面为打孔的可靠性奠定了现代化数据支持。在调试各项参数时一方面对照相关文献进行学习，一方面由技术专家带领，与我一起完成实验，很多实际激光加工经验都被运用到了本次实验中，例如激光器的频率人为的设定较大数值浮动，会导致光学透镜烧蚀失效；在激光器开始释放激光束前就要打开气阀，起到冷却激光头的作用；气源系统一定要保证其气密性与清洁性，若气源不够纯净，高压吹扫过激光头的瞬间会导致激光头附着空气杂质，激光头的损坏往往要比激光透镜损坏代价大太多，

须对激光加工类实验时刻保持警惕，给定参数时必须逐行排查，不能只依赖机器自身的自检程序。在对孔的分析时采用了显微镜，前期控制变量所制作的孔上的部分不佳组织结构可以很清晰的暴露在微镜下。

4.4 本章小结

本章通过对不同孔的分析与展示，详述了激光加工的工艺流程与遇到问题的解决方案，顺利的得到了实验初期所预期的现象，顺利的完成本文所研究的对激光加工工艺的探讨。

第五章 总结与展望

5.1 本文主要工作与贡献

本文重点采用了控制变量法,来进行实验与采集工艺所需的数据。实验最初在与教师和技术专家的沟通下,确定了加工设备在有效期内,批准我与激光加工设备的管理员完成此次实验。材料的确定也是由相关参考文献中,了解了 GH3039 镍基合金可以用于研发航空业中航空发动机的涡轮叶片冷却孔与发动机燃烧室内部零件。在经过一段时间的实操练习实验中,以激光打孔和激光切割交替来增进我对激光器工作原理的认知,以及对激光器的使用是否安全可行,是否可以保证自身与设备的安全。在获得管理员认可后,由我负责实验的操作,管理员负责实验设备的使用前清点工具,使用后确保设备无误,来正式开始本文的实验。

先后通过控制激光的频率、功率、保护气进行对照试验,科学的进行数据的修改与优化,在做到既能完成实验,又不损伤激光加工设备的前提下,与实验组成员先后确定了 GH3039 航空高温镍基合金材料激光加工制孔的最适宜的功率、频率、保护气源、冷却气压、激光脉冲与激光加工时激光束作用的占空比。

在实验结束后使用显微镜对孔进行细致的检查,选出较好的孔与较差的孔进行分析与记录,通过查阅相关资料,在技术专家和激光设备管理员的共同交流后,给出本次激光加工工艺的评价,对本次实验所遇到的问题与缺陷作以反思与总结,并对 GH3039 航空高温镍基合金材料的物理性能与加工难度评估。验证了本次实验的经济性,安全性与可靠性。

本文在一整套工艺探求的实验中,先后解决了打孔类型的选取,打孔质量的评估,激光加工功率、频率等重要变量进行详述与总结。为研究耐高温航空合金材料激光加工打孔的研发提供数据上与流程、工艺上的支持,实验具有真实性与可靠性,可以为其他实验提供思路与动力,也能为我以后的工作与研究增添支持储备。同时也为为航空发动机的燃烧室、涡轮叶片的材料选取,激光加工工艺规划与遇到的问题如何分析提供便捷。

5.2 未来工作的展望

本文在实验数据记录时,虽然数据均为真实数据,但是若能以折线图形式来描述我对数据的采集的过程,会使实验更具说服力。在实验完成后的问题分析中,试验件为薄板件,其孔的锥度理应进行数据上的处理,不能仅以显微镜的成像来判断孔是否具有较小的锥度与较高的圆柱度,应该用注重量化描述,以实际的数据来说明本次实验的完整性。以及在实验前因自身能力不足,未亲自添加 ANSYS 模拟仿真热传导模拟来进行温度场模拟,与使用单元生死技术去除温度超过 GH3039 镍基合金的沸点来获得打孔的轮廓,无法将激光加工对材料作用瞬间内完成的现象模拟出来。因实验器材所限,未使用扫描显微镜观察激光在 GH3039

航空高温镍基合金材料上制孔的内部结构，无法权衡熔融材料附着的厚度。

待日后有机会可以使用显微镜对孔径进行详细描述，可以用上下孔径差值与孔深得到孔的锥度，用标准样板对比得出加工的粗糙度。也希望有机会使用对孔影响较小的线切割设备将孔切开，使用镶嵌机，研磨机，浸蚀液（王水），配合无水乙醇来观察与评判得到孔的质量。

期望日后可以继续研究，用更多的精力来完成数据的量化记录，以及在相应的专业设备的支持下，可以进一步完善，将这套工艺研究成熟。

参考文献

- [1] 张静. 高温合金激光环切激光打孔数值模拟及实验研究[D]. 江苏大学, 2018.
- [2] Wang X D, Michalowski A, Walter D, et al. Laser drilling of stainless steel with nanosecond double-pulse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009,41 (2):148-153.
- [3] Majumdar J D, Manna I. Laser material processing[J]. *International Materials Reviews*, 2011,56 (5/6):341-388.
- [4] Maiman T H. Stimulated Optical Radiation in Ruby[J]. *Essentials of Lasers*, 1960,187(4736).
- [5] 左铁钊. 21 世纪的先进制造—激光技术工程[M]. 北京:北京科学出版社, 2007.
- [6] 关振中, 激光加工工艺手册, 北京:中国计量出版社出版, 1998, 6.
- [7] Goyal R, Dubey A K. Hybrid Approach for Modeling and Optimization of Hole Taper During Laser Trepan Drilling of Ti-6Al-4V Alloy Sheet[J]. *Procedia Materials Science*, 2014,5:1781-1790.
- [8] Goyal R, Dubey A K. Modeling and optimization of geometrical characteristics in laser trepan drilling of titanium alloy[J]. *Mechanical science and technology*, 2016,30(3):1281~1293.
- [9] Kamlage G, Bauer T, Ostendorf A, et al. Deep drilling of metals by fem to second laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2003,77 (2): 307-310.
- [10] Low D K Y, Li L, Byrd P J. Hydrodynamic Physical Modeling of Laser Drilling[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2002,124 (4):852-862.
- [11] Ng G K L, Crouse PL, Li L. An analytical model for laser drilling incorporating effects of exothermic reaction, pulse width and hole geometry[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006,49 (7-8):1358-1374.
- [12] Li L, Wang Y, Yang LJ, et al. Experimental research on water-jet guided laser processing[C]/ *Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III*. 2007:659525.1-659525.6.
- [13] 葛志福, 虞钢, 何秀丽. 激光打孔过程三维瞬态数值模拟 [J]. *中国科学*, 2012, 42(8) :869-876.
- [14] 王志军. 飞秒激光与金属材料相互作用研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [15] N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Applied Physics A (Materials Science & Processing)*, 1996,63(2):109~115.
- [16] 张磊. 激光打孔技术的研究[D]. 广州:华南师范大学, 2009.
- [17] 张文. 镍基高温合金脉冲激光打孔数值模拟及实验研究[D], 江苏大学. 2016.

致谢

时间过得很快，转眼间就要离开学校，进一步学习更加深入的知识。在大学四年期间学到了很多有航空的知识，培养了自己的职业素养。在论文完笔之际，我由衷的感谢每一位导师对我的帮助，特别是荆楠老师，无论是在学习还是在生活中都对我照顾有加，荆楠老师的教学态度，职业素养，为人处世的风格都值得我学习。正是荆楠老师严谨的态度与渊博的学识，以及实事求是的学术作风，培养了我对量化的重视，对学业的负责。在我遇到困难迷茫时，荆楠老师总能有求必应，为我出谋划策，在指出我不足之处的同时教会我直视困难解决问题，时刻关心我的毕业设计内容的知识储备，材料制备，与论证分析。

同时我也由衷感谢荆楠等所有的任课教师，在诸位老师的帮助下让我从 0 开始向 1 迈进，我也不会辜负所有老师的教诲，步入社会做一个因可靠而创造价值的人。同时还要感谢实习单位的刘金波先生，秦博先生对我毕业论文的关心与帮助。

最重要的是感谢我的父亲陈桓、母亲郑瑞，您二位培育我的知识我将终生受用，感谢您二位赐予我更高的天空。

最后，我也要感谢在百忙之中，为本文提出中肯意见的诸位评审老师！