

DOI: 10.7652/xjtub201708021

靶材背面辅助材料影响激光打孔 重铸层分布的实验研究

杜晓婷^{1,2,3}, 段文强^{1,2,3}, 王恪典^{1,2,3}, 董霞^{1,2,3}, 梅雪松^{1,2,3}, 王文君^{1,2,3}

(1. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造
系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对激光直冲加工微小孔时, 孔出口重铸层较厚、毛刺较多的问题, 提出了在靶材背面增加辅助材料的方法, 探究不同吸光能力的材料对激光打孔重铸层分布的影响。辅助材料按照吸光能力分为透射光材料、吸收光材料和散射光材料, 选择的3种典型代表材料为石英玻璃、石蜡和NaCl, 分别对3种材料激光打孔孔口形貌和重铸层厚度的影响进行实验研究, 并对其作用机理进行了深入分析。实验结果显示: 背面增加辅助材料可以有效地减小出口的重铸层厚度和出口毛刺, 但入口重铸层厚度有不同程度的增加, 且脉宽对打孔结果有明显影响; 相比之下, NaCl的作用效果最佳, 其入口重铸层增量较小, 出口干净圆整, 重铸层厚度减小了60%以上, 减至10~15 μm 。

关键词: 激光打孔; 微小孔; 重铸层; 辅助材料

中图分类号: TG665 文献标志码: A 文章编号: 0253-987X(2017)08-0128-08

Experimental Investigation of Recast Layer Distribution Affected by Auxiliary Target Back Materials During Laser Drilling

DU Xiaoting^{1,2,3}, DUAN Wenqiang^{1,2,3}, WANG Kedian^{1,2,3}, DONG Xia^{1,2,3},
MEI Xuesong^{1,2,3}, WANG Wenjun^{1,2,3}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reduce thickness of recast layer and burr around the hole exiting in laser percussion drilling, adding auxiliary materials on target back is considered to explore the effect of auxiliary materials with different absorption ability on the distribution of recast layer. High-transparency material (quartz glass), high-absorptivity material (paraffin) and light-scattering material (NaCl) are selected to investigate their corresponding impacts on the morphology of holes and thickness of recast layer. It is revealed that the strategy including these three different materials is able to effectively reduce the thickness of recast layer and the burr around hole exit, while the thickness of recast layer around the hole entrance increases to different extents for various auxiliary materials, and the pulse duration obviously affects the drilling result. Compared with the other two materials, NaCl gains advantage of smaller increase in recast thickness around the hole entrance, and reduces the recast layer thickness around the hole exit to 10-15 μm , namely, reduces the thickness by more than 60%.

Keywords: laser drilling; micro-hole; recast layer; auxiliary material

收稿日期: 2017-03-08。 作者简介: 杜晓婷(1992—),女,硕士生;王恪典(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375374,51575432);教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT_15R54)。

网络出版时间: 2017-05-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170502.1039.002.html>

微小孔在制造业中有很大的需求,如汽车喷嘴、航空发动机热端部件的气膜冷却孔和喷墨打印机喷嘴等,现有的微小孔加工技术,如电解加工和电火花加工,在加工质量和加工效率上已经无法满足工业要求,而激光能够更加高效地加工出小孔径、高质量的微小孔。一般而言,工业用激光器均为高功率、大能量的毫秒激光器。毫秒激光打孔属于热加工,材料吸收激光能量,产生一系列复杂的物理和化学变化,如热传导、熔化、气化、等离子体等,熔化和气化是材料的主要去除方式^[1]。毫秒激光因为是热去除,所以会产生重铸层和热影响区,这是毫秒激光加工的致命弱点^[2]。重铸层是材料在熔化过程中产生的熔化物未被完全排除,残留在孔壁和孔口处重新凝固形成的。重铸层在常规激光加工中难以被去除,尤其是出口重铸层较厚。重铸层中含有微裂纹,可能会扩展到基体,造成部件的断裂失效,影响零件的使用寿命^[3]。

激光与材料之间相互作用的研究以及激光在材料加工领域的应用研究是从 1963 年开始的^[4]。到目前为止,已经有很多关于毫秒激光打孔的研究,通过理论研究、建模仿真和参数化实验,得出了影响激光打孔结果的参数及影响规律,并对参数进行优化得到较好的打孔结果^[5-7]。对于重铸层的去除也进行了大量实验研究,通过调整参数、二次法激光加工、变脉冲打孔等方式,获得了较小厚度的重铸层^[8-12]。但是,重铸层还是不能被完全去除,尤其是出口的重铸层厚度较厚,且出口毛刺较多。

目前主要采用电解加工的方法,对激光加工产生的重铸层进行后处理,进而去除重铸层。在对微小孔进行电解时,由于孔径较小,孔壁和电极丝之间的间隙较小,尤其孔口有毛刺时,很容易造成电极丝的短路,使电解加工难以进行^[13]。入口的毛刺可以在电极丝伸入孔径前,先通过浅层电解去除掉;出口的毛刺由于在样件的背面,不易被观察到,更容易引起电极丝的短路,所以减小激光打孔中的出口毛刺和重铸层尤其重要。

本文通过在靶材背面增加辅助材料的方法,选择石英玻璃、NaCl 和石蜡 3 种材料,通过不同的作用原理,来减小出口处的毛刺和重铸层。

1 实验装置与实验原理

1.1 实验装置

本文采用英国 GSI 公司的 JK300D 型 Nd:YAG 灯泵浦固体激光器,此激光器是一款专用于打

孔的激光器,该激光器加工效率高,稳定性好,不需要苛刻的工作环境,非常适合工业应用,其具体参数如表 1 所示。激光器的参数调整、模式设定、状态监测都由计算机控制,激光器自带 LED 红光以完成对刀、调焦、准直等工作。实验样件材料为高温镍基合金 Inconel718,样件被固定在一台 3 轴精密运动机床上,其单轴直线定位精度为 $5\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $3\ \mu\text{m}$ 。加工时激光能量通过光纤传至激光头,并且从激光头腔体内吹出与光束平行的高压辅助气体(本文采用的辅助气体为压缩空气)。图 1 为实验用激光加工系统示意图。

表 1 激光器的主要参数

参数	取值
最大平均功率/W	300
峰值功率/kW	16
脉冲宽度/ms	0.2~5
重复频率/Hz	1~1 000
光束质量 M^2 因子	16
波长/nm	1 064

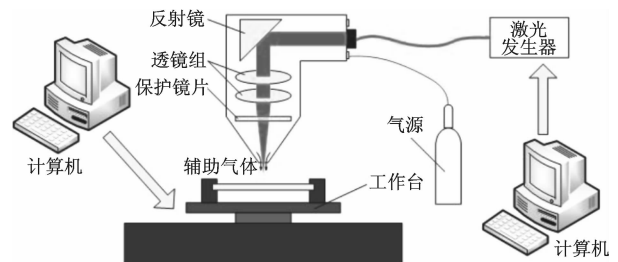


图 1 激光加工系统示意图

1.2 实验原理

本文采用的打孔方式是多脉冲叩击打孔,材料表面吸收激光能量,引起表面温度的上升,继而材料表面发生熔化,随着作用时间的增加,发生气化和熔融物的剧烈喷溅,从而形成孔型。在材料表面温度超过气化温度之后,材料开始急剧气化,并在熔池上方形成一个远高于环境压力的高压蒸气区,高压蒸气对熔融物表面产生沿其表面法向指向材料内部的反冲压力,在反冲压力的作用下熔融物发生剧烈的喷溅。当孔深超过样件厚度,孔被穿透,在孔内高压蒸气和重力的作用下,底部的熔融物迅速从出口处排出,造成熔融物在出口处的堆积,形成重铸层和毛刺,如图 2 所示。在靶材背面增加材料可以有效地改变这一情况,减小出口的毛刺和重铸层厚度。



图2 常规打孔时的出口形貌

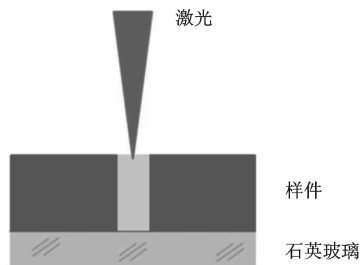


图3 有石英玻璃时的加工示意图

2 实验方法与实验结果

在靶材背面增加不同吸光能力的材料有不同的作用机理,对实验结果的影响也不同。本文选用3种具有代表性的材料——石英玻璃、石蜡和NaCl,分别研究其对激光打孔孔口毛刺和重铸层的影响规律。

2.1 靶材背面增加石英玻璃

在靶材背面增加透光材料,透光材料不吸收光能,在激光打穿靶材之后,不会对其进行任何加工,透光材料只起到阻挡熔融物从出口处排出和在打穿靶材后仍保持反冲压力的作用。

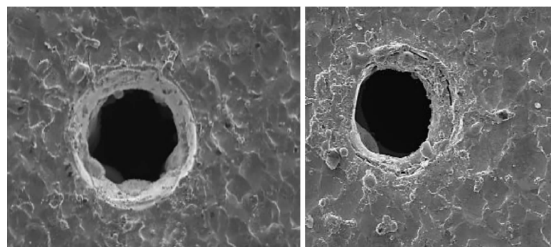
石英玻璃是一种只含二氧化硅单一成分的特殊玻璃,具有最佳的透紫外光、可见光、红外光谱的性能,对实验所用波长为1 064 nm的激光的透射率高达99%。在实验时将实验样件的下平面和石英玻璃的上平面进行打磨,保证其具有较高的平面度和表面粗糙度,使其能够紧密贴合,如图3所示。实验中变换脉冲宽度探究背面有石英玻璃对重铸层和出口毛刺的影响规律,采用多脉冲叩击打孔的方式进行加工,实验参数如表2所示,辅助气体采用压缩空气。实验中在每个参数下加工3个孔,加工完成后将样件进行清洗,用扫描电子显微镜观察其出入口处的表面形貌,然后将样件进行抛光和金相腐蚀,用光学显微镜观察并测量其孔壁重铸层的厚度,最终结果取相同参数下3个孔重铸层厚度的平均值。

表2 激光打孔实验参数

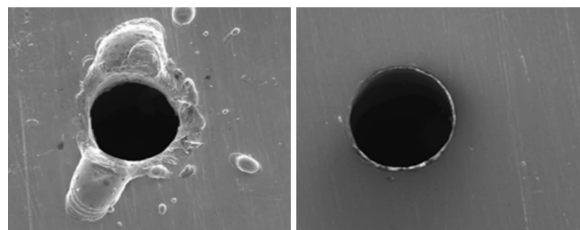
参数	数值
脉宽/ms	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7
频率/Hz	10
峰值功率/kW	16
脉冲数	20

2.1.1 孔口形貌和重铸层分析 图4a和图4b分别为常规打孔和增加石英玻璃后打孔的孔入口形貌,可见增加石英玻璃后孔入口处有大量熔融物堆积,重铸层厚度有所增加。图4c和图4d为孔出口

的形貌,可见增加石英玻璃后,出口处的毛刺明显减小,基本上没有毛刺粘结在孔的下表面,出口处孔边缘光滑整齐,无明显的熔融物的堆积。增加石英玻璃有效地提高了孔出口的质量,但使入口熔融物的堆积有所增加。



(a)常规打孔的入口 (b)有石英玻璃打孔的入口



(c)常规打孔的出口 (d)有石英玻璃打孔的出口

图4 有、无石英玻璃打孔时的孔口形貌(脉宽为0.3 ms)

对样件进行抛光和金相处理后,用光学显微镜观察孔口重铸层如图5所示;测得不同脉宽下的重铸层厚度,并对数据进行分析,获得如图6所示的曲线。从图中可以看出,当脉冲宽度为0.2 ms时,入口重铸层明显增加,出口重铸层明显减小,随着脉冲宽度的增加,其影响减弱。入口重铸层增加量和出口重铸层减小量都控制在5 μm内。

2.1.2 原因分析 在孔未被打穿时,金属高温熔融物受到高温蒸气产生的反冲压力(F_1)、与运动方向相反的黏滞力(F_2)、壁面的支撑力(F_3)、辅助气体的吹除力(F_4)和自身重力(F_5)的作用,如图7a所示。此时,熔融物受到激光辐照产生大量的气化物,形成较大的反冲压力,克服了黏滞力和辅助气体吹除力以及熔融物自身重力的作用,使熔融物从孔入

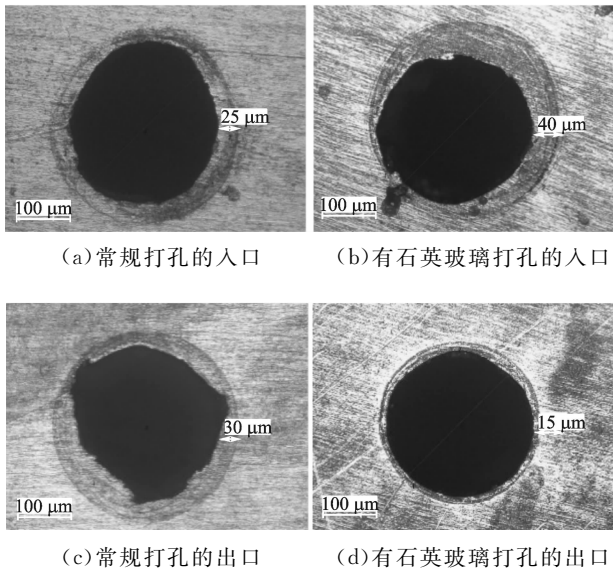


图 5 有、无石英玻璃打孔时的孔口金相图(脉宽为 0.3 ms)

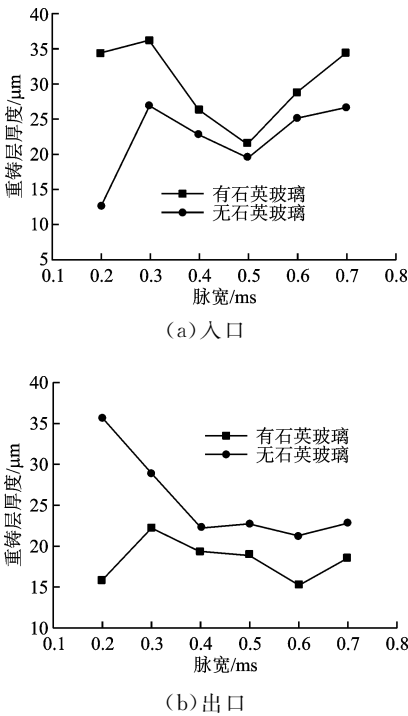


图 6 有、无石英玻璃打孔时的重铸层厚度

口处排出。在孔被打穿之后,反冲击力消失,金属熔融物在辅助气体的吹除力和自身重力的作用下从出口处排出,如图 7b 所示。但是,当脉冲宽度较小时,加工出的孔径较小,辅助气体很难进入小孔内,所以熔融物沿其孔壁向下流动的速度和加速度较小;金属熔融物迅速凝固,凝固时间不足以使熔融物完全从孔出口处排出,所以在出口处形成较厚的重铸层。

当靶材背面增加石英玻璃打孔时,在靶材被打穿之后,石英玻璃受到激光的辐照,对激光完全透射,不吸收光能。石英玻璃的存在使靶材被打穿后,

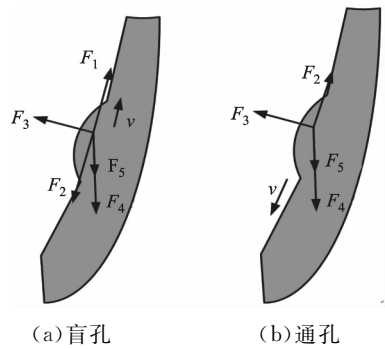


图 7 孔壁熔融物受力分析

仍相当于是对盲孔的加工,石英玻璃一方面阻碍了熔融物从出口处排出,另一方面在孔被打穿后仍然保持了反冲击力,使熔融物更多地从入口处喷出,熔融物喷溅示意图如图 8 所示,从而减小了出口处的毛刺和重铸层,但入口的重铸层略有增加。尤其在脉冲宽度较小时,加工出的孔径较小,辅助气体很难吹进孔内,此时反冲击力起到主要作用,但孔径较小时,材料的去除量较少,其产生的气化物较少,所以反冲击力较小,不足以使熔融物完全排出。因此,增加了石英玻璃后,入口处的重铸层增加,出口处重铸层减小。

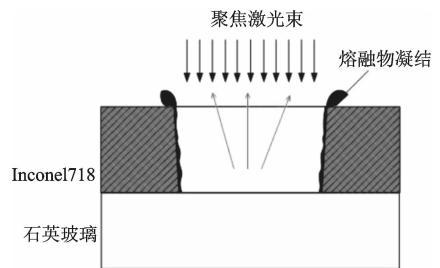


图 8 有石英玻璃时孔打穿瞬间熔融物喷溅示意图

2.2 靶材背面增加石蜡

靶材背面增加吸光材料,当靶材被打穿之后,吸光材料对激光进行少量散射和大量吸收,通过吸收激光能量引起自身温度的升高,从而发生相变,产生物质的迁移,如图 9 所示。

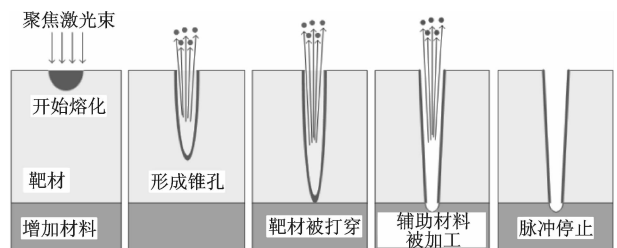


图 9 增加非透明材料时的打孔示意图

石蜡是固态高级烷烃的混合物,主要成分分子式为 C_nH_{2n+2} ($n=17\sim35$),没有固定的熔点和沸

点,极其容易熔化和气化,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右就能发生熔化,在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右会发生气化。在靶材背面增加石蜡,当靶材被打穿之后,石蜡通过吸收光能和受到高温金属熔融物的影响温度瞬间升高,发生大量气化和少量熔化。石蜡气化增加了反冲压力,使大量金属熔融物从入口处排出,少量金属熔融物从出口处排出,粘接在未被去除的石蜡上,如图 10 所示。

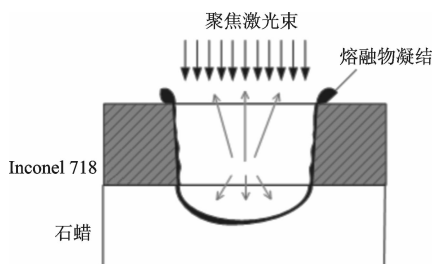
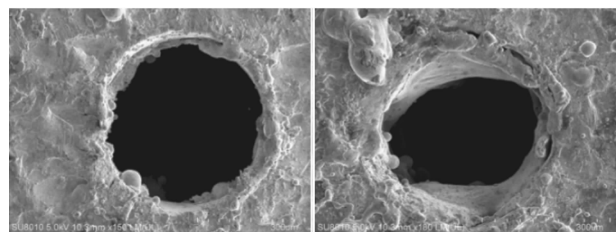


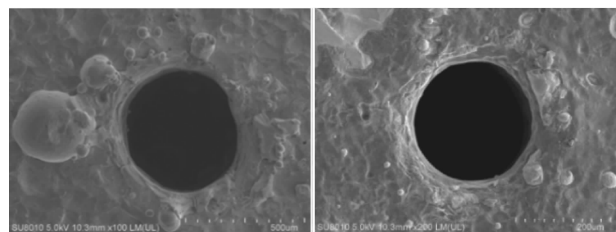
图 10 有石蜡时熔融物喷溅示意图

实验时,将实验样件的下平面进行打磨,保证其具有较高的平面度和表面粗糙度,将石蜡凝固粘接在样件下表面,保持两者的无缝隙粘接,石蜡层具有一定的厚度。实验方法及实验参数与 2.1 节完全相同,在每个参数下加工 3 个孔,加工完成后将样件进行清洗,用扫描电子显微镜观察其出入口处的表面形貌,然后将样件进行抛光和金相腐蚀,用光学显微镜观察并测量其孔壁重铸层的厚度,最终结果取相同参数下 3 个孔重铸层厚度的平均值。

2.2.1 孔口形貌和重铸层分析 图 11a 和图 11b 分别为常规打孔和增加石蜡打孔时的孔入口形貌,增加石蜡后,孔入口处有大量熔融物堆积,孔型不再圆整,其重铸层厚度增加。图 11c 和图 11d 为孔出口的形貌,增加石蜡后,孔出口处的毛刺减小,熔融



(a) 常规打孔的入口 (b) 有石蜡打孔的入口

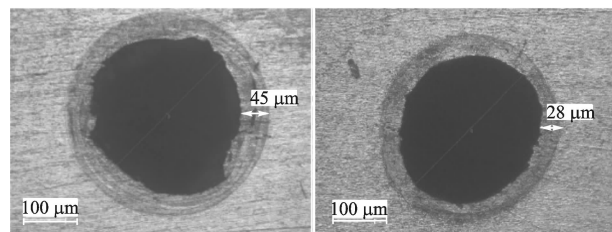


(c) 常规打孔的出口 (d) 有石蜡打孔的出口

图 11 有、无石蜡加工时的孔口形貌图(脉宽为 0.3 ms)

物的堆积减少,样件下表面有石蜡残留,孔出口处的石蜡已被完全去除。

对样件进行抛光和金相处理后,用光学显微镜对其重铸层厚度进行观察和测量,得到有石蜡打孔时的孔口重铸层如图 12 所示,将有石蜡打孔时与常规打孔时的重铸层厚度进行对比得到如图 13 的曲线。从图中可以看出,入口重铸层厚度在脉宽为 0.2 ms 时急剧增加,在脉宽为 0.4 ms 及以上时,略有减小,且脉宽越大其变化越不明显。出口重铸层厚度减小了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右,基本上不随脉宽变化。当脉宽增加到 0.7 ms 时,其入、出口的重铸层厚度基本上无变化。



(a) 有石蜡打孔的入口 (b) 有石蜡打孔的出口

图 12 有、无石蜡打孔时的孔口金相图(脉宽为 0.3 ms)

2.2.2 原因分析 在常规打孔时,盲孔和通孔加工时沿孔壁的熔融物的受力如图 7 所示。孔被打通的瞬间,反冲压力消失,熔融物主要在辅助气体吹除力的作用下从出口处排出,由于黏滞力的阻碍作用,其运动速度缓慢,来不及完全排出孔内,在出口处再凝固形成重铸层。当增加石蜡打孔时,靶材被打穿后,石蜡吸收激光能量,发生熔化和气化。石蜡未被打穿,所以在靶材被打穿后依然可以保持反冲压力,且石蜡的气化物大大增加了反冲压力,使熔融物更多地从入口处排出。石蜡被激光加工出一个凹坑,在反冲压力消失后,熔融物在辅助气体吹除力的作用下从出口喷出,粘接在被加工去除的石蜡上,从而避免了其在靶材出口处粘结形成毛刺,其金属熔融物的分布示意图如图 10 所示。

当脉冲宽度较小时,加工出的孔径较小,靶材和石蜡的被去除量都较小,气化物产生的反冲压力不足以使熔融物从入口处完全排出,造成了熔融物在入口处的堆积,形成较厚的重铸层。当脉冲宽度较大时,加工出的孔径较大,大量的金属材料发生气化,形成较大的气化压力使熔融物从入口处排出,石蜡气化所增加的反冲压力对其影响减小。当孔径较大时,辅助气体容易吹进孔内,足以将熔融物从出口处吹除。所以当脉宽为 0.7 ms 时,石蜡对孔入、出

口处的重铸层厚度影响微弱。

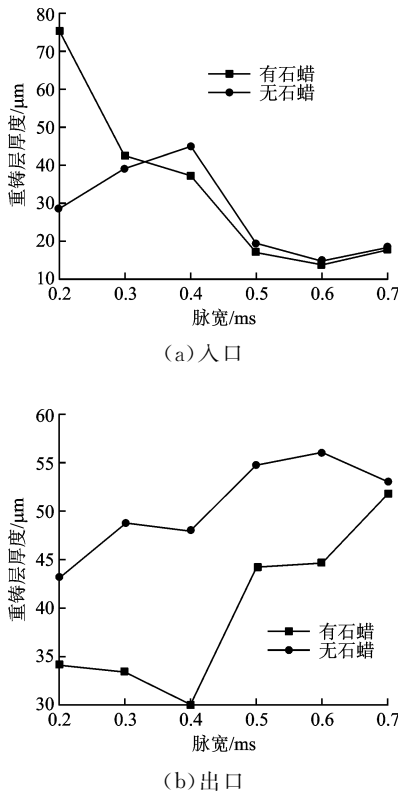


图 13 有、无石蜡打孔时的重铸层厚度

2.3 靶材背面增加 NaCl

靶材背面增加散射光材料,当靶材被打穿后,材料将光进行大量散射和少量吸收,在加工航空发动机叶片气膜冷却孔时可以有效地保护叶片后壁。由于高温金属熔融物的热传导作用和自身吸收激光能量少,材料会自身熔化并与金属熔融物结合。

NaCl 经济易得,对材料无腐蚀性,其熔点为 801 °C,对光具有明显的散射作用,便于填充和去除。实验中选用 150 目的分析纯 NaCl,φ(NaCl)高于 99.5%。实验时,对实验样件的下平面进行打磨,保证具有较高的平面度和较低的表面粗糙度,使其与 NaCl 颗粒紧密接触,选用颗粒较小的 NaCl 以减小其接触空隙。实验方法及实验参数与 2.1 小节中完全相同。

2.3.1 孔口形貌和重铸层分析 图 14a 和图 14b 分别为常规打孔和增加 NaCl 打孔时的孔入口形貌,增加 NaCl 后,孔入口处的残留熔融物增加,孔型不再圆整,其重铸层厚度增加。图 14c 和图 14d 为孔出口的形貌,增加 NaCl 后,孔出口变得光滑圆整,出口处基本无熔融物堆积,重铸层厚度明显较小。

对样件进行抛光和金相处理后,用光学显微镜观察其重铸层如图 15 所示,对重铸层厚进行测量并与

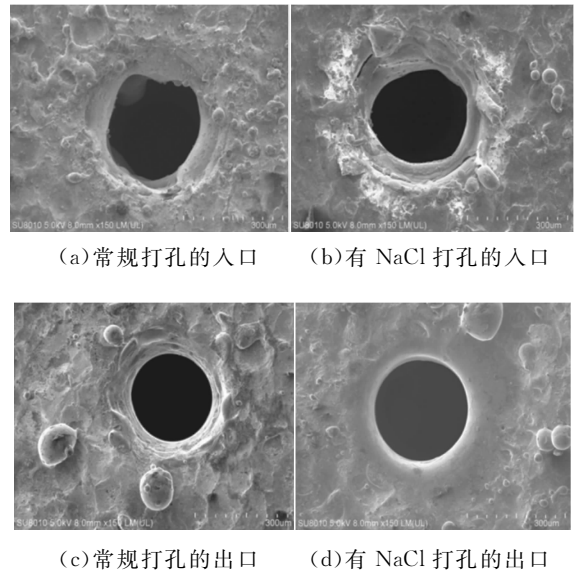


图 14 有、无 NaCl 打孔时的孔口形貌(脉宽为 0.3 ms)

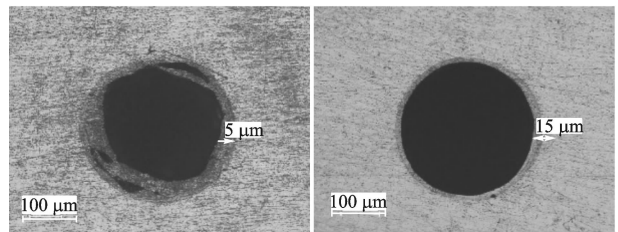


图 15 有、无 NaCl 打孔时的孔口金相图(脉宽为 0.3 ms)

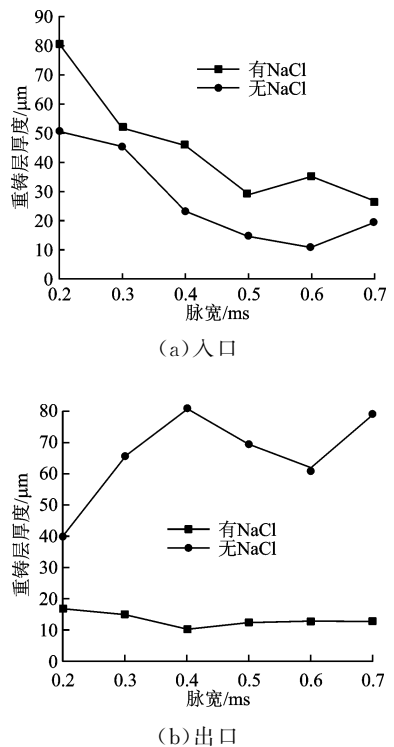


图 16 有、无 NaCl 打孔时的孔口重铸层厚度

常规打孔的重铸层进行对比,获得如图 16 所示的曲线。从图中可以看出,入口重铸层厚度增加了 $30\ \mu\text{m}$ 左右,且增加量随脉宽的变化不大;出口重铸层厚度明显减小到 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间,基本不随脉宽变化。

2.3.2 原因分析 当靶材被打穿之后,NaCl 受到激光辐照,绝大部分激光被散射,少部分能量被吸收。孔被打穿后,高温金属熔融物从出口处排出,与 NaCl 发生接触传热,NaCl 材料在热传导和自身吸收激光能量的共同作用下,自身温度急剧升高,发生熔化,并在高温下与高温金属熔融物发生反应,形成一种混熔物,如图 17 所示。这种混熔物与靶材的结合能力很弱,容易脱落,从而大大减小了出口毛刺和重铸层。对孔出口边缘的重铸层进行能谱(EDS)检测,结果如图 18 所示。表 3 为测得的主要元素及其摩尔分数,可知出口处 Na 元素的含量为 0,这说明混熔物已完全从出口处脱落。

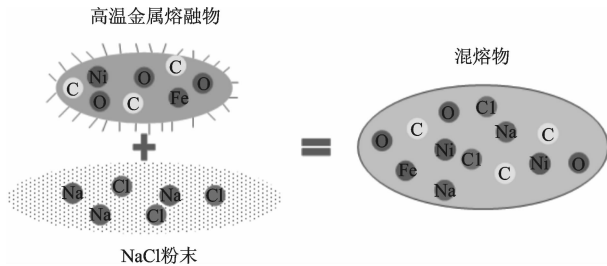


图 17 混熔物形成示意图

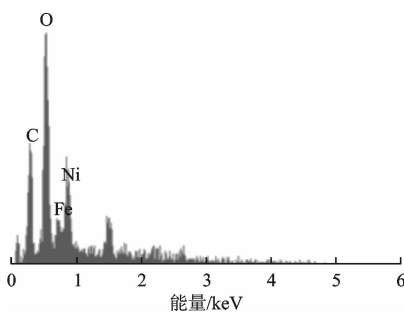


图 18 孔出口重铸层的能谱分析

表 3 孔出口重铸层的主要元素

主要元素	C	O	Fe	Ni	Na
摩尔分数/%	39.17	39.10	7.33	14.40	0.00

由于 NaCl 材料自身温度的上升发生熔化,熔化物的一部分混熔物会在反冲力的作用下从入口处喷出,造成在入口处残留的熔融物增加,从而增加了入口重铸层厚度。对孔入口边缘的重铸层进行能谱检测,结果如图 19 所示。

表 4 为测得的主要元素成分及其摩尔分数,可

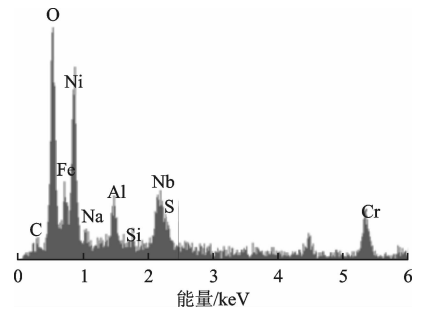


图 19 孔入口重铸层的能谱分析

知入口处 Na 元素的摩尔分数为 2%,说明入口重铸层厚度的增加与 NaCl 熔化物和混熔物从入口处的喷出有直接关系。

表 4 孔入口重铸层的主要元素

主要元素	C	O	Fe	Ni	Na	Al
摩尔分数/%	7.55	41.55	9.69	26.41	2.00	5.12

3 结论

本文结合理论研究和实验验证的方法,选用 Inconel718 材料作为靶材,在其背面分别增加了石英玻璃、石蜡、NaCl 3 种材料,在不同脉宽下进行激光打孔,分析 3 种材料对孔口形貌和重铸层厚度的影响,并得出以下结论。

(1)在靶材背面增加材料可以改善出口形貌,减小重铸层厚度,但会使入口重铸层厚度有所增加。

(2)靶材背面增加材料后孔口的重铸层和毛刺的变化随脉冲宽度的不同而不同,这是因为脉冲宽度的变化会引起孔径的变化,产生的熔融物的体积和排出方式也会发生变化。当脉宽较小时,形成的孔径较小,熔融物主要在蒸气压力的作用下从入口喷出,孔打穿瞬间,反冲压力消失,由于孔径较小,辅助气体很难进入孔内,所以不能将熔融物完全从出口吹除,造成在出口处的堆积。当脉宽较大时,形成的孔径较大,辅助气体很容易进入孔内,在孔打穿之后,熔融物在辅助气体的压力下从出口处被吹除,减少了在出口处的堆积。

(3)在靶材背面增加的辅助材料为透光材料(如石英玻璃)时,主要起到阻碍熔融物从出口处喷出和孔打穿的瞬间仍然保持反冲压力的作用,使熔融物在反冲压力的作用下更多地从入口处喷出。

(4)在靶材背面增加的辅助材料为易气化的吸光材料(如石蜡)时,由于材料吸光且容易气化,气化物增加了熔融物从孔入口排出的反冲力,使熔融物更好地从入口排出。出口处的石蜡通过熔化和气化

被去除,随激光加工的孔深增加,出口处的喷溅物主要存在于未被打穿的石蜡上,减少了在靶材出口处的堆积。

(5)在靶材背面增加的辅助材料为散射光材料(如 NaCl)时,NaCl 类的金属盐颗粒对光具有散射作用,在高温金属熔融物的热传导作用下发生熔化,在高温下与金属熔融物反应形成一种混熔物,这种混熔物与基体结合能力较弱,容易脱落,连出口毛刺一并去除,减少了出口毛刺和重铸层。

(6)对比 3 种材料的作用效果,NaCl 的作用效果最佳,入口处重铸层厚度增量较小,出口处干净圆整,出口的重铸层厚度减小了 60% 以上,减至 10~15 μm 。

参考文献:

- [1] 孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 3.
- [2] MURRAY A J, TYRER J R. Nd: YAG laser drilling of 8.3 mm thick partially stabilized tetragonal zirconia-control of recast layer microcracking using localized heating techniques [J]. *Journal of Laser Applications*, 1999, 11(4): 179-184.
- [3] 王健. 高功率激光脉冲组打孔技术 [J]. *航空工艺技术*, 1995(s1): 16-18.
WANG Jian. Drilling by using high peak power laser pulse group [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1995(s1): 16-18.
- [4] LINLOR W I. Ion energies produced by laser giant pulse [J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 3(11): 210-211.
- [5] ZENG D, LATHAM W P, KAR A. Two-dimensional model for melting and vaporization during optical trepanning [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 471-512.
- [6] MISHRA S, YADAVA V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of nickel-based super-alloy sheet using Nd: YAG laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(6): 681-695.
- [7] DUBEY A K, YADAVA V. Experimental study of Nd: YAG laser beam machining: an overview [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 195(1): 15-26.
- [8] CHIEN W T, HOU S C. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of Inconel 718 using the Taguchi method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(3/4): 308-316.
- [9] 张晓兵, 孙瑞峰. 二次法激光加工小孔技术 [J]. *航空学报*, 2014, 35(3): 894-901.
ZHANG Xiaobing, SUN Ruifeng. Sequential laser drilling technology [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3): 894-901.
- [10] 段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(3): 95-103, 112.
DUAN Wenqiang, WANG Kedian, DONG Xia, et al. Study on machining of high-quality micro-holes by laser trepan drilling [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(3): 95-103, 112.
- [11] DUAN Wenqiang, WANG Kedian, DONG Xia, et al. Experimental characterizations of burr deposition in Nd: YAG laser drilling: a parametric study [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9/10/11/12): 1529-1542.
- [12] DUAN Wenqiang, DONG Xia, WANG Kedian, et al. Effect of temporally modulated pulse on reducing recast layer in laser drilling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5/6/7/8): 1641-1652.
- [13] 高伟芳. 微小孔激光加工重铸层电解去除技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2015: 24-25.

[本刊相关文献链接]

- 吴继璋, 朱刚贤, 陆斌, 等. 自愈合效应对光内送粉激光变斑熔覆成形薄壁件的影响. 2016, 50(1): 145-150. [doi: 10.7652/xjtuxb201601022]
- 白浩, 王伊卿, 董霞, 等. Ti₆Al₄V 钛合金脉冲激光抛光微裂纹产生机理与尺寸特征研究. 2015, 49(12): 117-123. [doi: 10.7652/xjtuxb201512019]
- 段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究. 2015, 49(3): 95-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201503016]
- 郑卜祥, 姜歌东, 王文君, 等. 超快脉冲激光对钛合金的烧蚀特性与作用机理. 2014, 48(12): 21-28. [doi: 10.7652/xjtuxb201412004]
- 梁晓轩, 王晶, 张镇西. 纳米尺度激光紧聚焦光穿孔技术. 2012, 46(10): 107-115. [doi: 10.7652/xjtuxb201210019]
- 王恪典, 段文强, 梅雪松, 等. 毫秒激光加工小孔与重铸层的后处理工艺. 2011, 45(7): 45-49. [doi: 10.7652/xjtuxb201107009]

(编辑 杜秀杰)