

毫秒激光加工小孔与重铸层的后处理工艺

王恪典, 段文强, 梅雪松, 王文君, 赵书兴

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 利用钕铝石榴石晶体(Nd:YAG)毫秒激光器以正交实验法在 1Cr13 不锈钢材料上进行加工实验,得出在现有条件下具有最小重铸层微小孔的脉冲激光优化参数(如脉宽、峰值功率、频率、离焦量).采用一种化学酸溶液对按此优化参数加工出来的微小孔进行腐蚀,发现腐蚀后孔壁上激光加工形成的重铸层已被完全去除,表明由脉冲激光优化参数加工出的微小孔能够很好地配合化学酸溶液的腐蚀.该复合加工方法具有成本低、效率高、操作简单的特点,不仅解决了高能束热源在金属上加工微小孔时常有重铸层及微裂纹缺陷的问题,而且得到了孔壁光滑、轮廓清晰的高质量微小孔.

关键词: Nd:YAG 毫秒激光器;重铸层;正交实验法;化学腐蚀

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0045-05

Processing of Micro-Hole by Millisecond Laser and Post Processing of Recast Layer

WANG Kedian, DUAN Wenqiang, MEI Xuesong, WANG Wenjun, ZHAO Shuxing

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experiment is conducted on stainless steel 1Cr13 with Nd: YAG: JK300D millisecond laser and Taguchi method. The optimized laser parameters, such as pulse width, peak power, frequency and defocus distance, are obtained in the manufacturing of microholes with the least recast layer on the present experimental conditions. Following the set of parameters, the holes form with characters that fit to be postprocessed by the present post processing technology, the holes are etched in acid solution, and eventually found that the recast layer sticking to the side wall is completely wiped off. This combined method is endowed with the advantages of low cost, high efficiency, and operation simplicity. So the defections of recast layer and micro crack due to high energy beam processing are removed to create high quality microholes.

Keywords: Nd:YAG millisecond laser; recast layer; Taguchi method; chemical etching

微小孔在航空、航天、机械、光电、仪器仪表等行业的一些尖端产品中的应用日趋广泛,如航空航天惯性陀螺中的仪表元件、涡轮发动机叶片的气膜冷却孔、燃气轮机叶片、印刷电路板、汽车的燃料喷嘴等,这些产品对于微小孔加工质量的要求越来越高.目前,国内外一般定义直径小于 0.3 mm 的孔为微孔,直径在 0.3~1 mm 之间的孔为小孔^[1-2],而采

用传统的机械加工方式加工微小孔已经不能满足工艺要求,现有的加工方法总是存在一定的缺陷,因此探索一种优质、高效、低成本的微小孔精密加工技术已成为现代制造领域的研究热点.

微小孔加工,特别是在一些高硬度、曲面复杂的零件上加工,一直是生产过程中的关键技术.在众多的加工方法中,如机械钻削、电火花加工、激光加工、

电子束加工,激光加工的突出优点^[3]有:①能够获得深径比较大的孔;②加工几乎不受材料和环境的限制;③容易与控制系统配合进行高密度孔群加工;④可方便地实现斜孔的加工.因此,激光加工技术在微小孔加工方面得到了广泛的应用.目前,被应用于微小孔加工的激光类型按脉冲宽度来区分,主要有毫秒激光、纳秒激光和飞秒激光.其中:毫秒激光加工效率很高,但是直接加工出来的孔会产生很厚的重铸层;纳秒激光虽然加工的孔质量有所提高,但加工效率比较低;飞秒激光加工的孔质量非常好,但同时加工效率也非常低,因此不能应用于工业生产^[4-5]中.本文主要考虑重铸层对孔质量的影响.重铸层及其上面附着有微裂纹,在零件(如涡轮叶片)的使用过程中,微裂纹会向基体蔓延,达到一定程度后就会导致叶片整体断裂,从而造成非常严重的后果.

在毫秒激光孔加工方面,很多的研究都集中在激光参数对孔几何尺寸的影响上,文献[6-8]分别研究了激光脉冲能量、脉冲宽度、聚焦条件、重复频率对打孔质量的影响,但却没有综合考虑各参数之间相互影响的因素,也没有专门针对重铸层进行深入的研究.本文全面考虑了激光各参数对孔加工质量的影响后,找到一种既可保留毫秒激光高效率的特点,又可以使加工质量有很大提高的方法.实验中以正交实验法得到毫秒激光的优化参数组合,再对采用优化参数加工出来的孔进行化学腐蚀后处理,从而得到了无重铸层及微裂纹缺陷的高质量微小孔.

1 正交实验激光参数优化

1.1 参数选择

正交实验法不同于一般实验中只考虑单一参数变化对孔加工质量的影响规律,而是根据正交性和经验,有所偏向地在某一区域内选取有代表性的参数组合.选择合理的水平数进行实验,可以减少实验次数,同时考查所有的参数,更好地获得各参数的综合影响规律.

第 1 次在激光器参数较广范围内选取脉宽 W 、离焦量 S 、峰值功率 P_H 和重复频率 F 作为正交实验的参数,如表 1 所示,并以四因素三水平正交表来完成实验.通过对实验数据的分析,得到了各参数对于重铸层厚度的影响规律.按参数影响力从大到小排列,依次为 W 、 S (以 0.5 mm 为长度单位变化)、 P_H 、 F ,且 W 越小越好, P_H 越大越好. F 主要影响加工效率,所以可以在不超过激光器最大平均功率的条件下选择最大频率

$$F_{\max} = P_{\max}/(P_H W)$$

式中: $P_{\max}$ 为激光器最大平均功率.根据此式选择性地进行了参数的第 2 次选取(见表 2),再次进行正交实验.

表 1 第 1 次选取的激光参数

序号	S/mm	F/Hz	W/ms	P_H/kW
1	-0.3	20	0.2	8
2	+0.2	35	0.3	10
3	+0.7	50	0.5	12
极差	8.33	5.48	14.71	7.25

表 2 第 2 次选取的激光参数

序号	S/mm	F/Hz	W/ms	P_H/kW
1	-0.8	50	0.2	14.4
2	-0.3	60	0.2	15.2
3	+0.2	70	0.2	16.0

实验所用材料的厚度为 2 mm 的 1Cr13 不锈钢,加工方法如图 1^[3]所示,加工路径的直径为 0.3 mm,旋切速度为 0.5 mm/s.

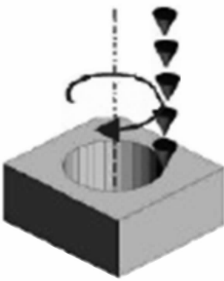


图 1 旋切加工方法示意图

1.2 实验结果与分析

多组参数的实验结果如图 2a 所示.采用优化后的参数对微小孔进行加工,其中离焦量为 +0.2 mm,频率为 50 Hz,脉宽为 0.2 ms,峰值功率为 15.2 kW.可以看到,孔壁上有薄皮状结构,呈现出欲脱落的状态,厚度约为 1 μm .由于选择了 JK300D 型激光器的脉宽最小值(0.2 ms),以及峰值功率最大值(16 kW)的 90%、95%、100%,所以在激光辐射作用中,相对于脉宽较大、峰值较低的情况,材料气化量与被熔融物内部剧烈沸腾所带出的材料会更多一些.孔底部熔池气化的部分材料会在已经形成并冷却的孔壁上再凝固,或直接凝华为固体.由于这一



(a)重铸层厚度约 10 μm (优化) (b)薄皮状结构(优化) (c)重铸层厚度约 73 μm (未优化)

图 2 按优化、未优化参数加工的孔的 SEM 图像比较

特殊的重铸层很薄,并在凝固过程中存在热应力,所以呈现出破裂欲脱落状. 气化凝固层是常见的固-液-固重铸层,因为实验采用的激光具有更高的功率密度,且在较短的时间内作用于物质表面,可使重铸层厚度基本稳定在 10 μm 以内,相对于未采用优化参数加工的孔厚度^[8] (20~80 μm),其加工质量得到了很大的提高.

2 化学腐蚀法对微小孔的后处理

由于用毫秒激光器无法直接得到无重铸层的微小孔,因此只能利用适当的后处理方法将其铸层去除,这样既保留了毫秒激光高效率的优点,又可以得到满足要求的高质量微孔. 本文选择了一种成本低、效率高、操作简单的方法——化学酸溶液腐蚀法,来完成微小孔的后处理工作.

2.1 化学腐蚀过程与结果

将 $\text{HNO}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O}$ 按 25 : 50 : 25 的比例配置成溶液,其中 HNO_3 的质量分数为 67%, HCl 的质量分数为 37%. 如图 3 所示,将样品浸入溶液,经过 150 s 的腐蚀后取出观察,发现孔壁还有部分重铸层残留,将其再次放入酸溶液中进行腐蚀,经 370 s 后取出,此时孔壁已无重铸层粘结.

实验结果证明,化学腐蚀方法对于重铸层的去除是十分有效的. 在该组孔中,重铸层已被完全去除,孔内壁形貌得到改善,同时孔径也扩大了约 80 μm . 由此可知,只要合理地控制腐蚀时间,就可以去除孔壁上的重铸层. 实验过程中出现的问题是,化学溶液对孔壁外的表面会产生腐蚀作用,因此可以先在试件表面涂一层保护膜,如陶瓷涂层,然后再打孔腐蚀. 本次实验中的试样未涂保护膜.

在腐蚀实验中,对多组不同参数加工的微孔在相同条件下同时进行腐蚀操作,其中图 3 的结果为各实验数据组中效果最好的一组,其重铸层已被完

全去除. 该孔的激光参数为 $S = +0.2 \text{ mm}$, $F = 70 \text{ Hz}$, $W = 0.2 \text{ ms}$, $P_H = 16 \text{ kW}$,均符合本文所提出的各参数对重铸层厚度影响规律的结论.

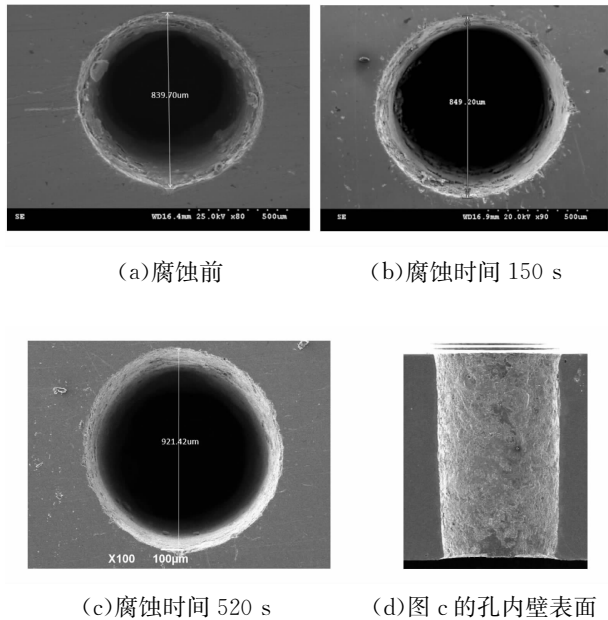
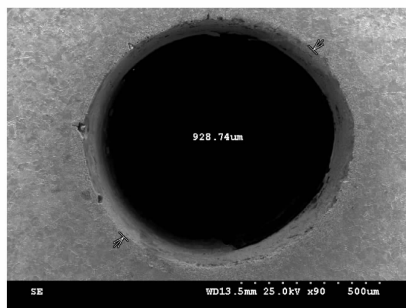


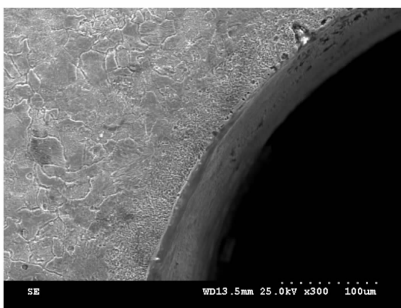
图 3 腐蚀过程中孔形貌的变化

2.2 金相分析

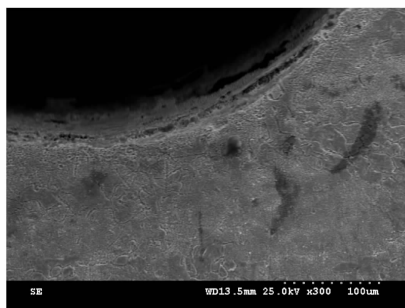
对图 3 的孔进行金相处理,结果如图 4 所示. 从图中可以看到,孔壁表面轮廓清晰,但从基体到孔壁边缘的金相组织则有明显的变化,孔壁边缘有一圈晶粒致密的结构,属于激光打孔过程中产生的热影响区^[9-10]. 由于热影响区紧粘在原来的重铸层上,经过热传导,所以在一段时间内该区的温度会变得较高,但却低于熔化温度;又因为微小孔是由脉冲聚焦激光束(直径 0.2 mm)加工的,所以热源作用范围很小,在脉冲波谷和光斑离开时,热影响区就会立即开始冷却. 利用有限元分析软件(ANSYS)模拟,发现热影响区的温度会在 0.1 s 内从 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 降至约 100 $^{\circ}\text{C}$,如图 5 所示. 图 6 为孔截面的光学显微镜图,



(a)金相图



(b)局部放大的金相图



(c)重铸层未被完全去除

图4 金相分析的SEM

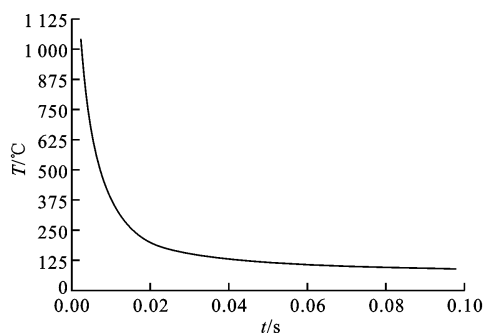
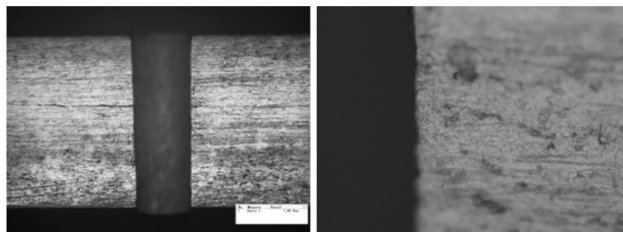


图5 热影响区的温降模拟曲线

气化比例更大一些。孔底部熔池气化的部分材料会在已经形成并冷却的孔壁上再次凝固,或直接凝华为固体。由于这一特殊的重铸层很薄,并在凝固过程中存在着热应力,因此呈现出破裂欲脱落的状态。

(3)采用一种酸溶液对激光加工的微小孔进行化学腐蚀后处理,得到了无重铸层、无微裂纹缺陷的高质量孔。该复合加工方法既保留了毫秒激光高效率加工的特点,又使微小孔加工质量有了很大提高,因此解决了高能束热源在金属上加工微小孔时出现重铸层及微裂纹缺陷的问题,得到了孔壁光滑、轮廓清晰的微小孔。



(a)孔截面整体

(b)孔截面局部

图6 孔截面整体与局部的光学显微镜图

孔侧壁轮廓清晰光滑,无毛刺。

此外,化学腐蚀作为一种后处理方法,相对于文献[11]中的利用飞秒激光去除重铸层,其操作难度小,容易实现,而且效率更高。

3 结 论

(1)本文利用正交实验法,定性地得出了激光各参数对于孔壁重铸层的影响规律。

(2)在现有条件下得到了最佳激光参数组合。采用优化参数加工孔时,孔壁会出现厚度约 $1\ \mu\text{m}$ 的薄皮状重铸层,并呈现出欲脱落的形态,这是由于所用激光器的最小脉宽为 $0.2\ \text{ms}$,峰值功率最大值 $16\ \text{kW}$ 的 90% 、 95% 、 100% ,因此在激光辐射作用中,相对于脉宽较大、峰值功率较低的情况,此时的材料

参考文献:

- [1] 马星辉,高国富,赵波,等.精密微小孔加工技术进展[J].电加工与模具,2008(5):13-18.
MA Xinghui, GAO Guofu, Zhao Bo, et al. The development in processing technology of precision micro-hole [J]. Electromachining & Mould, 2008(5): 13-18.
- [2] 应人龙,曾莉群,顾大强.微小孔加工技术综述[J].机床与液压,2008,36(6):144-147.
YING Renlong, ZENG Liqun, GU Daqiang. Review of micro-hole machining technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008,36(6): 144-147.
- [3] 辛凤兰.高质量激光打孔技术研究[D].北京:北京工业大学,2006.
- [4] 张晓兵.激光加工涡轮叶片气膜孔的现状与发展趋势[J].应用激光,2002,22(2):227-229.
ZHANG Xiaobing. The present state and perspective of laser drilling technology in turbine blades [J]. Applied Laser, 2002,22(2): 227-229.
- [5] 张晓兵. $100\ \text{ns}\sim 700\ \text{ns}$ 脉冲列 YAG 激光加工镍基合金小孔[J].应用激光,2005,25(2): 90-92.
ZHANG Xiaobing. Laser drilling with $100\text{ns}\sim 700\text{ns}$ YAG laser in Nickel-based alloy [J]. Applied Laser,

2005,25(2):90-92.

[6] 宫磊. Nd:YAG 激光器激光打孔实验研究 [D]. 长春: 长春理工大学,2008.

[7] FISHTER R E, RATON B, LAPA H. Selective chemical milling of recast surfaces: USA, 4411730 [P]. 1983-10-01.

[8] 丁明江. 激光微小孔精密加工技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学,2010.

[9] ARAUJO D, CARPIO F J, MENDEZ D, et al. Microstructural study of CO₂ laser machined heat affected zone of 2024 aluminum alloy [J]. Applied Surface Science, 2003, 208/209(3):210-217.

[10] 郝建民. 机械工程材料 [M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.

[11] YANG Chengjuan, MEI Xuesong, WANG Wenjun, et al. The experimental study on recast layer removal of metallic material by femtosecond laser[C]//Pacific International Conference on Applications of Lasers & Optics. Orlando, USA: Laser Institute of America, 2010:109.

(编辑 管咏梅)