

# 5052 铝合金板材脉冲激光打孔成形规律的研究

任乃飞 夏凯波 王后孝

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 以 5052 铝合金板材为实验材料, 采用控制变量法进行了单脉冲激光打孔实验, 研究并得到了脉冲宽度、脉冲重复频率和离焦量等参数对激光打孔成形规律的影响, 推荐了脉冲宽度、脉冲重复频率和离焦量等参数的合理选择范围, 为 5052 铝合金脉冲激光微孔制造的工艺优化及参数选取提供了参考数据。研究表明脉冲宽度对孔径的影响比较大, 脉冲重复频率对上下孔径的尺寸有影响(频率增大, 上孔径变大, 下孔径减小), 通过合理降低脉冲重复频率、减小离焦量、增加脉冲宽度可以得到孔径小且锥度小的微孔。

**关键词** 激光技术; 激光材料加工; 脉冲激光打孔; 控制变量法; 微孔成形; 5052 铝合金

中图分类号 TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121402

## Investigation on Microhole Formation Characteristics for Pulsed Laser Drilling of Aluminum Alloy 5052 Sheets

Ren Naifei Xia Kaibo Wang Houxiao

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** The parameter control method is utilized to carry out the experimental investigation for the single pulse laser drilling of aluminum alloy 5052 sheets. Effects of pulse width, pulse recurrence frequency, and defocusing amount on microhole formation characteristics for laser drilling are achieved and the reasonable process parameter ranges are obtained, which can be the technical reference of process optimization and parameter selection for the pulsed laser drilling of aluminum alloy 5052. It shows that the laser pulse width can obviously influence the microhole diameter. Besides, the alteration of the pulse recurrence frequency may also result in the change of the drilled microhole diameter, that is, the entry hole diameter increases with the pulse repetition frequency. However, the radial size alteration for the exit hole shows a reverse trend. In addition, less tapered microholes with relatively small diameters can be drilled through appropriately decreasing pulse repetition frequency, reducing defocusing amount, and increasing pulse width.

**Key words** laser technique; laser materials processing; pulsed laser drilling; parameter control method; microhole formation; aluminum alloy 5052.

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.390

## 1 引言

激光打孔是基于工件材料对激光能量的吸收和光能转变为热能的原理<sup>[1]</sup>, 其中存在着各种各样的能量转换, 例如反射、吸收、气化、辐射和热扩散等, 是通过对激光束聚焦, 在焦点处形成很高的温度, 在脉冲激光作用下, 使材料不断熔化气化的过程。另外, 气体和打孔形成的等离子体会产生高压, 将加工形成的杂质吹出孔洞, 最后形成微孔<sup>[2-3]</sup>。

与传统机械加工和电火花微孔加工相比, 激光打孔具有打孔效率高、速度快、成本低、适用范围广等特点<sup>[4]</sup>, 且几乎不受材料限制, 清洁无污染, 能加工数量多、密度高的群孔。激光打孔可以大大提高加工效率,

收稿日期: 2015-06-30; 收到修改稿日期: 2015-07-10; 网络出版日期: 2015-10-20

**基金项目:** 国家 973 计划(2011CB013004)、江苏省高校自然科学基金研究项目(11KJA460003, 15KJD460002)、江苏省科技支撑计划(工业)重点项目(BE2013009)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏省“六大人才高峰”项目(2013-ZBZZ-025)、江苏大学高级人才科研启动基金(14JDG020)

**作者简介:** 夏凯波(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光微孔制造方面的研究。E-mail: xiakaibow@126.com

**导师简介:** 任乃飞(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造方面的研究。E-mail: rnf@ujs.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: xiakaibow@126.com

是提高我国微孔制造水平的重要技术,尤其是在航空涡轮叶片气膜孔制造上的应用。近年来,研究者们研究激光打孔,集中在碳钢、高温合金等材料,侧重打孔工艺、数值模拟和打孔质量的研究,提出了打孔作用机理,参数影响规律,打孔优化措施等<sup>[2,4-5]</sup>。

目前对铝合金激光打孔的研究比较少,这主要是因为铝合金激光打孔的难度较大。铝合金材料对激光束能量的吸收率较低,而且铝合金在空气中极易氧化,打孔时必须使用保护气体,保护气体不利于材料的去除,由此导致铝合金激光打孔的效率比较低。罗垚等<sup>[6]</sup>建立了镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔模型,模拟了纳秒脉冲激光制孔过程中的三维温度场、流动场的演化过程,并与实验进行了比较分析;王禹茜等<sup>[7]</sup>研究了飞秒激光工艺参数对TiC陶瓷微孔制造的影响;臧彦楠等<sup>[8]</sup>选用铝作为研究材料,利用ANSYS生死单元法进行了激光金属打孔仿真;秦渊等<sup>[9]</sup>对铝合金厚板激光打孔进行过打孔过程的物理模型建立和实验比较,根据长脉冲激光的打孔特点,求得了孔形状的解析式,侧重热学和力学效应的研究;金友<sup>[10]</sup>选择表面硬化铝合金作为样品,分析研究了打孔过程和打孔效率问题;Li等<sup>[11]</sup>对铝合金激光打孔进行了物理模型建立并与实验进行了对比分析;AHN等<sup>[12]</sup>选取1050铝合金薄板,分析研究了激光工艺参数对打孔特征(入口孔径、孔型、锥度、孔周围的温度分布)的影响,建立了数值模型并与实验数据进行了分析比较;Mishra等<sup>[13-14]</sup>主要对铝合金激光打孔进行了数值模型建立,通过数值模型预测并设定出最佳的打孔工艺参数(脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲峰值功率等)来提高材料去除率和降低孔的锥度;Kikin等<sup>[15-16]</sup>主要研究了1420铝合金和1024铝合金晶粒粗细对激光打孔效率(同等条件下,晶粒越细,打孔时间越短)和微孔形状的影响(同等条件下,晶粒越细,入口孔径越大)。

目前国内外关于铝合金激光打孔的研究主要侧重于理论分析和数值模型的建立<sup>[8-9,11-14]</sup>,而关于铝合金激光打孔的实验研究报道很少<sup>[10,15-16]</sup>,且国内外对激光铝合金薄板打孔各参数影响规律着重进行论述并提出优化方案的研究较少,迄今尚未查阅到关于5052铝合金激光打孔的研究报道,考虑到铝合金薄板微孔制造应用前景比较广(例如铝合金扣板、吸音板等),通过实验研究了脉冲宽度、脉冲重复频率以及离焦量对5052铝合金薄板毫秒激光打孔的孔径、锥度等成形质量的影响(孔径和锥度是衡量打孔成形质量的重要指标),并总结分析了其影响规律,结合课题对激光微孔制造小锥度、小孔径的要求,推荐了脉冲宽度、脉冲重复频率和离焦量等参数的合理选择范围,为铝合金激光打微孔研究提供了参考数据。

## 2 实验材料设备及方法

实验采用脉宽为毫秒的长脉冲Nd:YAG激光光源,聚焦透镜的焦距为150 mm,脉宽范围为0.1~20 ms,脉冲重复频率为0.1~500 Hz。根据前期的实验工作,通过分析对比选取较佳的实验参数,如表1所示。选取5052铝合金板材作为实验材料。5052铝合金属于Al-Mg系铝合金,具有强度高、塑性和耐磨性好、耐腐蚀、焊接性能良好等特性,用途比较广,其化学成分如表2所示。实验选取100 mm×80 mm×2 mm薄板试样,采用适用于较薄材料加工的单脉冲激光打孔方法。

表1 实验参数

Table 1 Experiment parameters

Influence factors	Parameters					
	Pulse energy /J	Beam expansion	Pulse number	Pulse width /ms	Pulse repetition frequency /Hz	Defocusing amount /mm
Pulse width /ms	2.5	3.5	1	0.5、0.8、1.0、1.3、1.5	20	0
Pulse recurrence frequency /Hz	2.5	3.5	1	1	1、3、15、25、35、45	0
Defocusing amount /mm	2.5	3.5	1	1	20	-3、-2.5、-1.5、-0.5、0、0.5、1.5

所用的设备为LASERTEC 80 PowerDrill五轴联动激光精密钻孔系统。采用光学显微镜观察孔的形貌。采用控制变量法(把多因素的问题变成多个单因素的问题,只改变其中的某一个因素,从而研究这个因素对事物的影响)研究脉冲宽度、脉冲重复频率和离焦量对激光打孔成形质量的影响规律,通过分析比较,为

5052 铝合金脉冲激光微孔制造的工艺优化及参数选取提供参考数据。

表 2 5052 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of aluminum alloy 5052 (mass fraction,%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Other		Al
										Single	Total	
0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	-	0.10	-	-	0.05	0.15	Allowance

### 3 结果分析与讨论

由于使用检测装置直接测量孔的锥度比较困难,可以利用上下孔径和孔深近似地计算出微孔的锥度。如图 1 所示,  $\alpha$  为孔的锥度,  $d_1$  为上孔径尺寸,  $d_2$  为下孔径尺寸,  $h$  为孔深。公式如下

$$\frac{\alpha}{2} = \arctan\left(\frac{d_1 - d_2}{2h}\right). \quad (1)$$

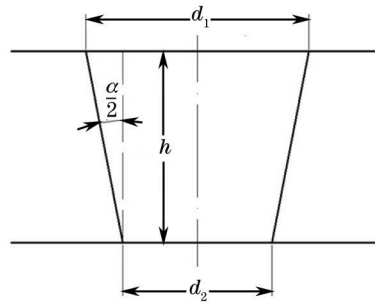


图 1 微孔锥度的计算

Fig.1 Taper angle calculation for drilled microhole

图 2 是孔的形貌(脉冲能量  $E=2.5$  J, 扩束比为 3.5, 脉冲宽度为 1 ms, 脉冲重复频率为 45 Hz, 离焦量为 0, 脉冲个数为 1)。图 2(a) 是入口孔的形貌图, 图 2(b) 是出口孔的形貌图。如图 2 所示, 入口孔的周围有少许材料残留物沉积, 这是激光打孔过程中材料熔化飞溅之后部分沉积导致的。孔的圆度较好, 熔融物沉积较少。

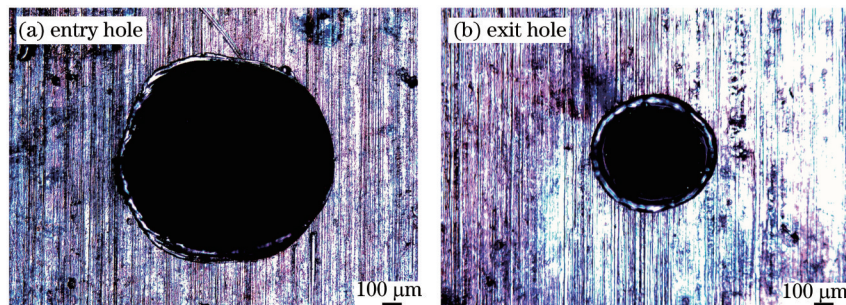


图 2 微孔形貌。(a) 入口; (b) 出口

Fig.2 Microhole morphology. (a) Entry hole; (b) exit hole

#### 3.1 脉冲宽度对激光打孔成形的影响

图 3 和图 4 分别为不同脉冲宽度条件下微孔上下孔径的变化曲线和微孔锥度的变化曲线(脉冲能量  $E=2.5$  J, 扩束比为 3.5, 脉冲重复频率为 20 Hz, 离焦量为 0, 脉冲个数为 1)。脉冲宽度分别取 0.5、0.8、1.0、1.3 和 1.5 ms。如图 3 所示, 微孔上下孔径的大小随脉冲宽度的增加而减小, 而且减小得比较明显, 这说明脉冲宽度对激光打孔孔径的影响比较大。在脉冲能量一定的情况下, 脉宽越大, 能量密度越小, 从而导致微孔孔径减小。如图 4 所示, 孔的锥度随脉冲宽度的变化没有孔径明显, 在 0.5~1.5 ms 范围内, 锥度的增加在  $3^\circ$  之内, 可见脉冲宽度对激光打孔锥度的影响较小。

#### 3.2 脉冲重复频率对激光打孔成形的影响

图 5 和图 6 分别为不同脉冲重复频率条件下微孔上下孔径的变化曲线和微孔锥度的变化曲线(脉冲能量  $E=2.5$  J, 扩束比为 3.5, 脉冲宽度为 1 ms, 离焦量为 0, 脉冲个数为 1)。脉冲重复频率分别取 1、3、15、25、35 和 45 Hz。如图 5 所示, 随着脉冲重复频率的增加, 上孔径变大, 下孔径变小。在脉冲能量不变的条件下, 脉冲

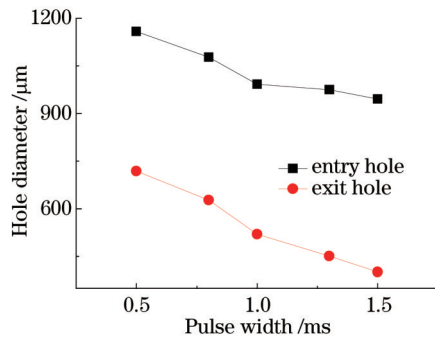


图3 脉冲宽度对微孔孔径的影响

Fig.3 Effects of pulse width on microhole diameter

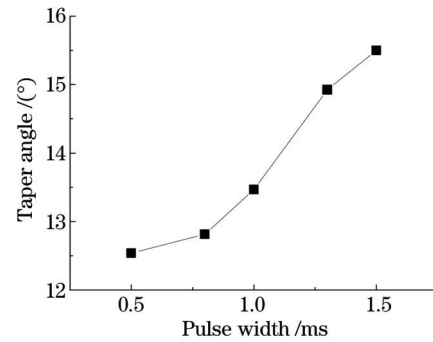


图4 脉冲宽度对微孔锥度的影响

Fig.4 Effects of pulse width on taper angle for microholes

重复频率的改变对平均功率的变化影响较大,频率增加,平均功率变大,从而导致上孔径变大;当脉冲能量一定时,由于上孔径的变大消耗了更多的能量,导致下孔径的变小。如图6所示,随着脉冲重复频率的增加,微孔锥度的变化比孔径的变化明显,几乎呈直线上升。这主要是由于在图5中上孔径呈上升趋势,下孔径呈下降趋势。

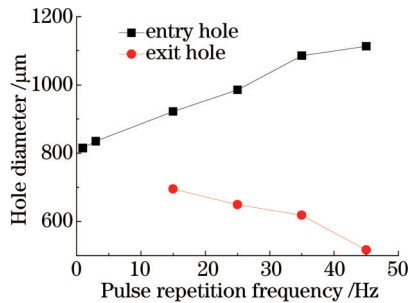


图5 脉冲重复频率对微孔孔径的影响

Fig.5 Effects of pulse repetition frequency on microhole diameter

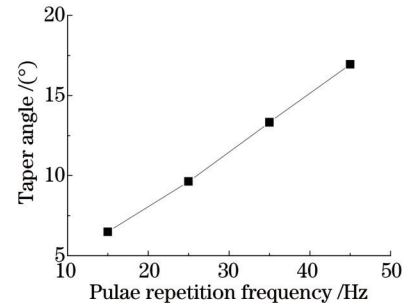


图6 脉冲重复频率对微孔锥度的影响

Fig.6 Effects of pulse repetition frequency on taper angle for microholes

### 3.3 离焦量对激光打孔成形的影响

图7和图8分别为不同离焦量条件下微孔上下孔径的变化曲线和微孔锥度的变化曲线(脉冲能量 $E=2.5$  J,扩束比为3.5,脉冲宽度为1 ms,脉冲重复频率为20 Hz,脉冲个数为1)。离焦量分别取-3、-2.5、-1.5、-0.5、0、0.5和1.5 mm。如图7所示,上孔径随离焦量的增加而变大,而下孔径变化比较小。根据激光光斑聚焦原理,离焦量越大,光束越发散,投影在工件表面的光斑直径越大,这导致上孔径的增大。而此时下表面所受影响较小,因而下孔径变化不大。当离焦量增加到0 mm时,微孔变为盲孔,这说明孔深随离焦量的增加而减小。这是由于离焦量越大,光束越发散,作用在工件表面的能量密度越小,工件吸收的能量越低,最终导致无法形成穿透性射孔,而只是形成了盲孔。如图8所示,微孔的锥度随离焦量的增加而增加,这是由于上孔径增加明显导致的。

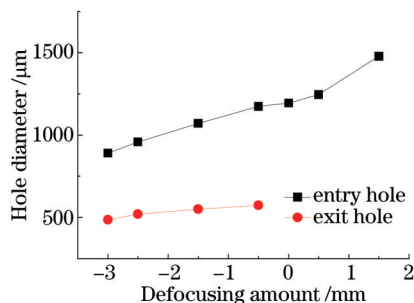


图7 离焦量对微孔孔径的影响

Fig.7 Effects of defocusing amount on microhole diameter

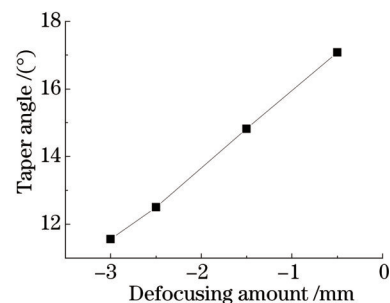


图8 离焦量对微孔锥度的影响

Fig.8 Effects of defocusing amount on taper angle for microholes

## 4 结 论

1) 脉冲宽度增加,上下孔径均变小,孔的锥度增加较小。离焦量增加,上孔径变大,下孔径增加较小,孔的锥度增加。

2) 理论上,孔径的大小主要由单个脉冲能量及脉冲宽度等因素决定。然而,脉冲重复频率对上下孔径也有影响,重复频率增加,上孔径增加,下孔径减小。

3) 在进行5052铝合金板材激光打孔时,通过合理降低离焦量和脉冲重复频率可以得到锥度比较小的微孔。通过合理增加脉冲宽度,降低脉冲重复频率和离焦量可以得到孔径比较小的微孔。推荐参数选择范围为:脉冲宽度0.8~1.3 ms、脉冲重复频率15~25 Hz、离焦量-3~-2.5 mm。

## 参 考 文 献

- 1 K Salonitis, A Stouraras, G Tsoukantas, *et al.*. A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183(1): 96-103.
- 2 Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan, *et al.*. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603001.  
褚庆臣, 虞 钢, 卢国权, 等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603001.
- 3 Yan Xuguang, Gao Wenbin, Yang Shuiqi, *et al.*. Effect of pulse and workpiece parameters on microhole quality in laser drilling[J]. *Applied Laser*, 1994, 14(3): 127-130.  
晏绪光, 高文斌, 杨水其, 等. 激光脉冲和工件参数对激光微孔加工质量的影响[J]. *应用激光*, 1994, 14(3): 127-130.
- 4 Rong Lierun. The laser microhol processing technolgy and its applications in space navigation field[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2009, 45(6): 30-33.  
荣烈润. 激光微细孔加工技术及其在航空航天领域中的应用[J]. *航空精密制造技术*, 2009, 45(6): 30-33.
- 5 Qiu Xianchen, Chen Le, Hu Jun. Simulation and experimental analysis of laser drilling on thick plate[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(2): 192-195.  
邱宪琛, 陈 乐, 胡 俊. 中厚板激光打孔过程中的仿真分析及实验研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(2): 192-195.
- 6 Luo Yao, Pang Shengyong, Zhou Jianxin, *et al.*. Numerical simulation of recast layer formation in nanosecond pulse laser drilling on nickel-based high-temperature alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403007.  
罗 垚, 庞盛永, 周建新, 等. 镍基高温合金纳秒激光脉冲制孔再铸层形成过程数值模拟[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403007.
- 7 Wang Yuqian, Zhang Junzhan, Liu Yongsheng, *et al.*. Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003010.  
王禹茜, 张军战, 刘永胜, 等. 飞秒激光工艺参数对加工TiC陶瓷微孔的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003010.
- 8 Zang Yannan, Ni Xiaowu, Chen Yanbei. Simulation of long pulsed laser drilling on metal based on birth and death method of ANSYS[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0603005.  
臧彦楠, 倪晓武, 陈彦北. 基于ANSYS生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603005.
- 9 Qin Yuan, Bi Juan, Ni Xiaowu, *et al.*. Analysis and experiment on millisecond pulsed laser drilling of metals[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 340-347.  
秦 渊, 毕 娟, 倪晓武, 等. 毫秒激光金属打孔的解析和实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 340-347.
- 10 Jin You. Study of using laser drilling in metal and alloy material efficiency[J]. *OME Information*, 2008, 25(2): 26-29.  
金 友. 采用激光在金属及合金材料上高效率钻孔[J]. *光机电信息*, 2008, 25(2): 26-29.
- 11 Li Mingxin, Jin Guangyong, Guo Ming, *et al.*. Theoretical simulation of melt ejection during the laser drilling process on aluminum alloy by single pulsed laser[C]. *SPIE*, 2014, 9295: 92950Q.
- 12 Dong-Gyu AHN, Gwang-Won JUNG. Influence of process parameters on drilling characteristics of Al 1050 sheet with thickness of 0.2 mm using pulsed Nd:YAG laser[J]. *Transactions of Nonferrous Metals*, 2009, 19(s1): s157-s163.
- 13 S Mishra, V Yadava. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 461-474.
- 14 S Mishra, V Yadava. Prediction of hole characteristics and hole productivity during pulsed Nd:YAG laser beam percussion drilling[C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B -Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227 (B4): 494-507.
- 15 P Yu Kikin, A I Pchelintsev, E E Rusin. Features of the hole shape formation during laser drilling of an ultrafine-grained aluminum alloy[J]. *Technical Physics Letters*, 2007, 33(11): 917 - 918.
- 16 P Yu Kikin, V N Perevezentsev, A I Pchelintsev, *et al.*. Effect of ultrafine-grained structure on the regime of laser drilling in aluminum alloy 1420[J]. *Technical Physics Letters*, 2006, 32(10): 845 - 846.