

文章编号: 0258-7025(2010)10-2648-05

气熔比法铝合金薄板激光切割试验研究

王续跃 孟庆轩 康仁科 徐文骥 郭东明 王连吉

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 为提高缝阵天线薄板的激光切割质量,介绍了一种基于气熔比控制的激光精密切割方法。在 Nd:YAG 脉冲激光切割系统上,试验研究了气熔比对激光切割 0.5 mm 厚 6063 铝合金薄板质量的影响,即气熔比对切口宽度、切口表面质量、重铸层和挂渣的影响。对气熔比分别为 2.62, 3.06 和 4.11 的 3 组试件进行检测与观察,发现提高气熔比,可减小重铸层、增大切口表面光滑区、改善激光切割质量。试验获得切口顶部宽度为 0.2 mm,底部无挂渣,重铸层厚度为 2.03 μm ,切口表面光滑区比例占切口的 40%。结果表明,研究气熔比可深化对激光加工机理的认识,有效地提高铝合金薄板激光切割质量。

关键词 激光技术;激光切割;气熔比;切割质量

中图分类号 TG 665; TN 249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2648

Experiments of Laser Cutting of Aluminum Alloy Sheet Based on Vaporization-Melt Ratio Controlled Method

Wang Xuyue Meng Qingxuan Kang Renke Xu Wenji Guo Dongming Wang Lianji

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract To improve the laser cut quality of slot array antenna sheet, a new method of laser precision cutting is presented based on vaporization-melt ratio controlled method. The cutting qualities of 6063 aluminum sheets of 0.5 mm in thickness are researched which are cut on a Nd:YAG pulse laser cutting system, and the effects of vaporization-melt ratio on kerf width, recast layer, kerf sides, and adhering slag are studied as well. Observation on samples of different vaporization-melt ratios (2.62, 3.06, 4.11) shows that high vaporization-melt ratio can improve laser cut quality with decreasing recast layer and increasing the smooth zone of kerf sides. The cut kerfs of 0.2 mm in width on the top, no adhering slag on the bottom, recast layer of 2.03 μm in thickness, and percentage of the smooth zone 40% out of whole thickness are obtained by experiment. The research on vaporization-melt ratio provides the deeper understanding of mechanism of laser cutting, and improves laser cut quality effectively.

Key words laser technique; laser cutting; vaporization-melt ratio; cut quality

1 引 言

缝阵天线薄板作为机载导弹导引头重要的组成部分,其微小缝阵列的加工是制约天线性能的重要因素^[1]。缝隙技术要求,宽度小于 1 mm,长度 4 mm 左右,精度 0.01 mm,表面粗糙度值 3.2 μm 。利用高精度数控激光设备切割微细裂缝是目前裂缝加工方法中最佳的选择^[2]。而气化和熔化作为激光切割中材料去除的两种基本形态,两者之比对切割

过程和质量有很大影响。

激光切割质量受多方面因素的影响,国内外学者围绕激光切割参数、材料等对切割质量的影响开展了多种研究。M. Vicanek 等^[3]认为材料去除是气流与切割前沿间的摩擦而导致的剪切力和切口上气流压力梯度所引起,并建立激光熔化切割气流吹除熔化材料的动态数学模型。R. Poprawe^[4]重点研究了切口波纹形成机理,监测到切口波纹存在 3 个

收稿日期: 2010-01-27; 收到修改稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(50975041, 50775019)和辽宁省重点实验室基金(2008S054)资助课题。

作者简介: 王续跃(1960—),男,博士后,副教授,主要从事特种加工和精密加工等方面的研究。

E-mail: wbzzd@dlut.edu.cn

不同特征区域,各区域质量依次变差,并提出了控制措施。袁根福等^[5]认为固体材料的去除主要是依赖其气化过程,激光热作用使材料在短时间内熔融并部分气化,在辅助气体和反喷物质产生的压力作用下,从固体表面喷射出来,作用后表面残留的熔体凝结形成一层凝固层,对表面质量有影响。

目前,在提高切割质量方面已取得了一定成果^[6~12],但所获得的结论局限于特定控制条件和特定材料,需要建立切割过程与切割质量之间的直接控制关系。本文介绍了一种基于气熔比控制的激光切割新方法。探讨两者之间的关系,对深化激光切割机理的认识、改善缝阵天线板等微小缝隙类精密零件的切割工艺具有理论意义和应用价值。

2 气熔比法激光切割原理

激光切割去除材料以气化和熔化为,气化材料以气体方式脱离基体,熔化材料一部分被辅助气体吹除,一部分二次凝固形成挂渣和重铸层。材料去除重量 M_t 和气熔比 R_{vmr} 分别为

$$M_t = M_v + M_m, \quad (1)$$

$$R_{vmr} = M_v/M_m, \quad (2)$$

式中 M_v, M_m 分别代表试件气化重量和熔化重量。气熔比法激光切割就是从加工去除形态入手,基于气熔比控制,优化气熔比,获得更好表面质量,并建立激光切割过程和质量的直接关系,深入分析气熔比对质量的影响。

如图 1 所示,切割前沿(在切口表面,包括气化区和熔化区)沿切割方向扩展,图 2 为切割前沿示意图。辅助气体产生压力 P_g , 气体与熔化材料之间因粘性摩擦产生剪切力 τ , 使熔化材料脱离去除。气化材料以速度 V_v 脱离,并产生辐射分布的膨胀压力 P_v , 加速了切口侧向的液态金属流动 V_y 。气化区对激光吸收率大大增强,达到 90% 以上,熔化层

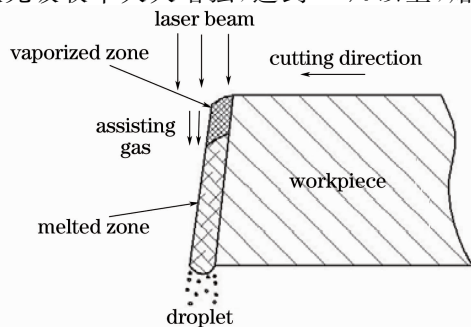


图 1 激光切割原理图

Fig. 1 Schematic of laser cutting

厚度 h 随之减小。气化的动力学变化比材料温度变化快^[13],限制了材料中的热量传输,使工件热负载小,切口边缘热影响区小且均匀分布。随着材料去除和工作台的行进,切口由此形成并将工件切开。

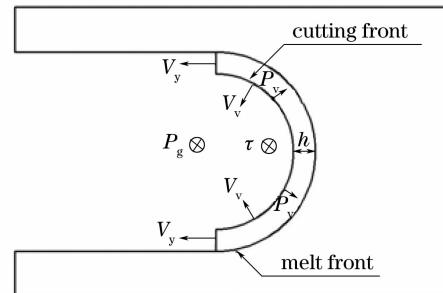


图 2 切割前沿示意图

Fig. 2 Schematic of cutting front

基于气熔比控制的方法与传统的调整工艺参数方法的不同在于,工艺参数法是对切割区域外部参数调整,改进切割质量;而气熔比控制法则直接揭示了激光切割前沿气化和熔化的内在状态,建立气熔比与切割质量的对应关系,对精密切割工艺有一定的指导意义。

3 试验材料与方法

3.1 试验材料

试验材料为 0.5 mm 厚 6063 铝合金,主要化学成分和物理参数^[14] 分别如表 1, 2 所示。辅助气体采用 N_2 。

表 1 6063 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of 6063 aluminum(mass fraction,%)

Mg	Si	Fe	Zn	Cu	Al
0.45~0.90	0.20~0.60	0.35	0.1	0.1	Bal

表 2 6063 铝合金热物理参数

Table 2 Heat physical parameters of 6063 aluminum

Parameters	Value
Laser absorption /%	12
Heat conductivity / (W / m)	238
Specific heat / (J / kg·K)	900
Melt point / °C	654
Density / (kg / m ³)	2700

3.2 试验方法

优化气熔比可从材料选取和能量输入两方面考虑。试验材料为铝合金薄板,熔点 654 °C,易快速加热至气化,薄板厚度方向大部分直接气化,液相状态少,热量在固液之间的传导小,且气态时材料对激光的吸收率增至 90% 以上。采用脉冲激光器,获得较高功率;通过调整功率、离焦量、扫描速度、脉宽等参

数来提高能量输入,同时为获得不同大小的气熔比值,采取保持其他工艺参数在获得较高能量输入的前提下不变,改变激光功率的办法加工相同试件。

试验装置如图 3 所示,将试件悬置于玻璃器皿中并固定,在器皿上加盖板并使激光加工头伸入其中,带动盖板做进给运动。加工时气化材料逸出装置,熔化部分保留在装置内。通过 FA2004N 电子分析天平(精度 0.1 mg)分别测出加工前后试件与总装置质量并计算差值,可得总去除量和气化去除量分别为

$$M_{wb} - M_{wa} = M_t, \quad (3)$$

$$M_{eb} - M_{ea} = M_v, \quad (4)$$

式中 M_{wb} , M_{wa} 分别代表工件加工前后的质量; M_{eb} , M_{ea} 分别代表总装置加工前后的质量。激光器采用切割模式,最大功率 110 W,可调范围 65~110 W (当功率低于 65 W 时,切割铝合金质量较差),具体工艺参数如表 3 所示。在 VHX-600 型超景深三维显微镜下测量切口宽度,并观察挂渣、重铸层、切口及切口表面形貌等。



图 3 气熔比激光切割装置

Fig. 3 Experimental setup of laser cutting based on vaporization-melt ratio controlled method

表 3 激光切割工艺参数

Table 3 Parameters of laser cutting

Parameters	Value
Pulse frequency /Hz	35
Pulse width /ms	2
Defocus distance /mm	0
Cutting speed /(mm/min)	120
Gas pressure /MPa	0.8

4 试验结果与分析

试验获得不同气熔比对切割质量影响的试件。根据测量,得到激光功率为 70, 85 和 105 W 时,气熔比分别为 2.62, 3.06 和 4.11。这个结果相比一些文献记录的激光切割气化与熔化比例较大^[15], 原因

如下:

1) 试验材料为 6063 铝合金,熔点为 654 °C,气化温度相比其他金属也较低,在高能激光作用下更易气化;

2) 试件背面有少许挂渣,切口表面有重铸层,减少了所获熔化量;

3) 熔渣主要喷射在试件下部,但在上部仍有少量飞溅,这些大部分被盖板挡住,有小部分收集误差,影响气熔比精度。

4.1 气熔比对切口宽度的影响

对试件切口顶部和底部宽度的测量表明,顶部宽度稍大于底部。这是由于激光束强度损耗、聚焦等导致切口出现锥度的现象。对不同气熔比切口,在长度方向上选取间距相同的 4 个点,分别测出其顶部和底部宽度,取平均值,如图 4 所示。

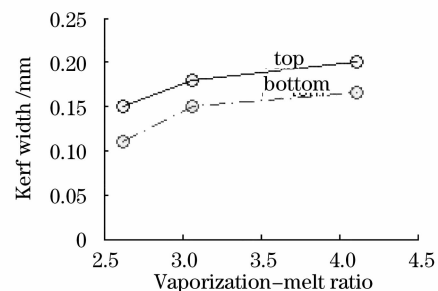


图 4 气熔比对切口宽度的影响

Fig. 4 Effect of vaporization-melt ratio on kerf width

随着气熔比由 2.62 增至 4.11,切口顶部宽度由 0.15 mm 增至 0.20 mm,底部由 0.11 mm 增至 0.16 mm。观察发现宽度增大,切口光洁度提高。

4.2 气熔比对切口挂渣量的影响

在试验条件范围内,切口顶部具有较好的切割质量,底部存在不同程度的挂渣。图 5 是放大 100 倍的不同气熔比试件底部挂渣的情况。由图 5 可见,随着气熔比增大,底部挂渣量逐渐减小,至无挂渣。在同样吹气(0.8 MPa)下,低气熔比挂渣较多,沿切口底部呈发散状分布,低于此气熔比时,不能获得底部全部切透的切口;中等气熔比时,挂渣明显改善,且可擦除掉;高气熔比时,切口底部无挂渣,光洁程度类似顶部。产生这种现象的原因在于挂渣是激光切割时部分熔融产物冷凝在底部边缘而形成,提高气熔比,使产生的熔融物减少,而且在同样压力气流作用下吹除更少的熔融物,去除更干净,挂渣量减少。缝阵天线薄板不允许挂渣的出现,故实际加工中需采用优化后的无挂渣切割,满足技术要求。

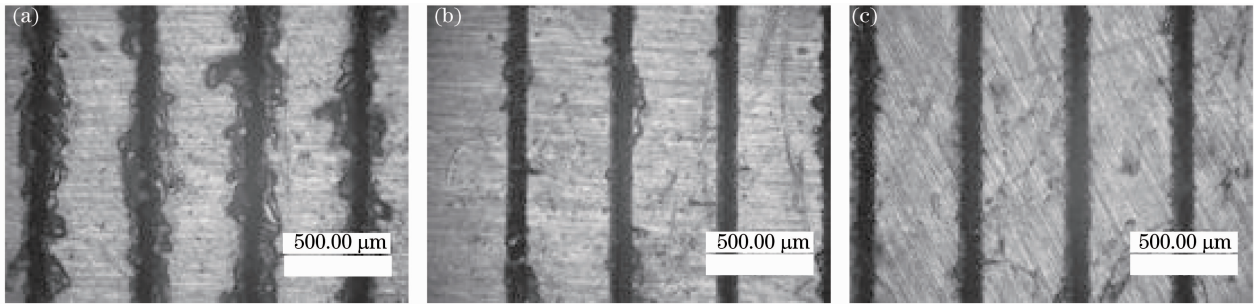


图 5 气熔比对挂渣量的影响。(a) 2.62, (b) 3.06, (c) 4.11

Fig. 5 Effect of vaporization-melt ratio on adhering slag. (a) 2.62, (b) 3.06, (c) 4.11

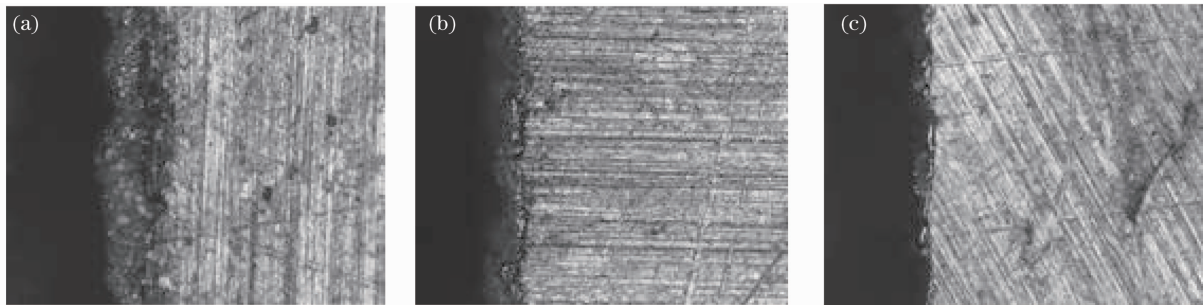


图 6 气熔比对重铸层的影响。(a) 2.62, (b) 3.06, (c) 4.11

Fig. 6 Effect of vaporization-melt ratio on recast layer. (a) 2.62, (b) 3.06, (c) 4.11

4.3 气熔比对切口重铸层的影响

重铸层是未被吹除的熔化金属在切口表面凝固形成的,对表面质量有影响。图 6 给出了放大 500 倍的不同气熔比切口顶部边缘重铸层情况,图中边缘发黑部分即为重铸层。由图可见,随着气熔比的增大,重铸层逐渐减小,当气熔比增大到 4.11 时重铸层已非常小。沿切口长度方向多次测量重铸层厚度,取平均值,得到 3 组气熔比重铸层平均厚度分别为 41.76, 16.75 和 2.03 μm ,其中高气熔比时,在长度方向多处无重铸层。

4.4 气熔比对切口表面的影响

试验发现,切口表面上部光滑,下部粗糙,且有不同程度的波纹。上部波纹是由于脉冲能量较高,使金属直接气化,每一个波纹都是一个激光脉冲使之气化的痕迹,下部波纹是由于脉冲能量有所减小,金属只发生熔化并随高压气体流出,越向下由于熔化速度的滞后和熔融物的累积,二次凝固呈现熔融金属流态状。两者之间有微小过渡部分。当熔化金属不能完全被吹出时,底部形成前面所述的挂渣。图 7 给出了放大 200 倍的不同气熔比切口表面形貌。

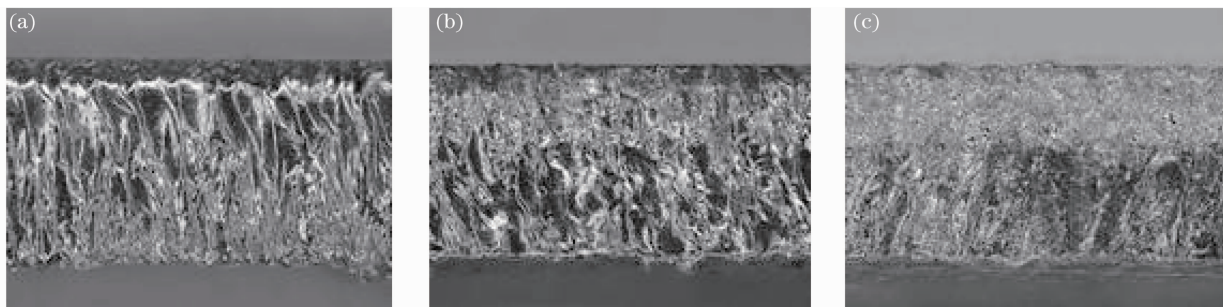


图 7 气熔比对切口表面的影响。(a) 2.62, (b) 3.06, (c) 4.11

Fig. 7 Effect of vaporization-melt ratio on kerf side. (a) 2.62, (b) 3.06, (c) 4.11

由图 7 看出,随着气熔比的提高,上部光滑区增大,中下部粗糙区减小。低气熔比时,气化区较小,熔化区呈现明显的液态金属流态状,粗糙并有亮色;中等气熔比时,上部光滑区增大,和下部粗糙区有明显过渡区,且较为粗糙;高气熔比情况下,表面质量

最好,光滑区和粗糙区界线比较明显,其中光滑区约占整个切口表面的 40%,且无波纹痕迹,粗糙区无明显重铸金属亮色,波纹较前两者有明显改善。产生这种现象的原因在于随着气熔比提高,气化区增大,熔化区减小,熔融物厚度减小且在中下部流动性

改善,使波纹突起和凹陷改善,得到较好表面质量。

5 结 论

研究了激光切割过程中气熔比对切割质量的影响。在试验条件范围内,采用脉冲 Nd:YAG 固体激光器切割 0.5 mm 厚 6063 铝合金薄板,获得不同气熔比值:2.62,3.06,4.11。随着气熔比由 2.62 增至 4.11,切口宽度逐渐增大,底部挂渣减少,直至无挂渣,重铸层由 41.76 μm 减至 2.03 μm ,切口表面光滑区增至 40%,粗糙区相应减小。气熔比为 4.11 时,获得满足缝阵天线薄板加工质量要求的切口。由此可见,较高气熔比能够有效改善激光切割质量,为激光精密切割加工提供了一种新的工艺方法。

参 考 文 献

- Jiang Haidong. A research on manufacturing technology of the slotted waveguide antenna unit [J]. *Electronics Process Technology*, 2008, **29**(6): 361~364
江海东. 波导裂缝天线单元的制造技术研究[J]. *电子工艺技术*, 2008, **29**(6): 361~364
- Zhu Chunlin, Wang Fangbao. Precision manufacturing of plate slotted-array antenna[J]. *Electronics Process Technology*, 2006, **27**(1): 47~52
朱春临, 汪方宝. 平板裂缝天线的精密制造[J]. *电子工艺技术*, 2006, **27**(1): 47~52
- M. Vicanek, G. Simon, H. M. Urbassek *et al.*. Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987, **20**(1): 140~145
- R. Poprawe. Modeling, monitoring and control in high quality laser cutting [C]. *CIRP Annals -Manufacturing Technology*, France, 2001. 137~140
- Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Surface appearance study of Nd:YAG solid laser milling on single crystal silicon [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(3): 145~147
袁根福, 曾晓雁. Nd:YAG 固体激光铣削单晶硅表面形貌研究[J]. *应用激光*, 2005, **25**(3): 145~147
- Ge Yaqiong, Wang Wenxian, Cui Zeqin *et al.*. Corresponding experimentation research of aluminium alloy cutting using pulsed solid Nd:YAG laser [J]. *Welding Technology*, 2008, **37**(5): 20~24
葛亚琼, 王文先, 崔泽琴等. 铝合金脉冲固体 Nd:YAG 激光切割及其对比试验[J]. *焊接技术*, 2008, **37**(5): 20~24
- A. Stournaras, P. Stavropoulos, K. Salonitis *et al.*. An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum [C]. *CIRP J. Manufacturing Science and Technology*, USA, 2009, 61~69
- Hong Lei, Mi Chenglong, Liu Dejin. Laser cutting special steel sheet controlled by rotating gas flow [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 543~548
洪蕾, 米承龙, 柳德金. 旋转气流控制激光切割特种钢薄板 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 543~548
- Yan Cuo, Li Lijun, Li Juan *et al.*. Review of surface quality study on laser sheets cutting [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 270~274
颜锉, 李力钧, 李娟等. 激光切割板材表面质量研究综述 [J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 270~274
- Jiao Junke, Wang Xinbing, Li Youping. Experimental study of cutting glass by dual CO₂ laser beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1808~1812
焦俊科, 王新兵, 李又平. 双束 CO₂ 激光切割玻璃的实验研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1808~1812
- Xie Xiaozhu, Li Lijun, Wei Xin *et al.*. Evaporative front of laser cutting PMMA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 925~930
谢小柱, 李力钧, 魏昕等. 有机玻璃激光气化切割前沿 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 925~930
- Hong Lei, Mi Chenglong, Li Lijun. Influence of gas flow under workpiece in CO₂ laser cutting silicon steel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 522~527
洪蕾, 米承龙, 李立钧. 底部气流对 CO₂ 激光切割硅钢切口质量的影响 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 522~527
- F. Quintero, F. Varas, J. Poul *et al.*. Theoretical analysis of material removal mechanisms in pulsed laser fusion cutting of ceramics [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(4): 655~666
- Dong Junguo. Handbook of Applied Materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. 216~219.
董均果. 实用材料手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 216~219
- Hong Lei, Wu Gang. Fundamentals of Laser Manufacturing [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. 135~136
洪蕾, 吴钢. 激光制造技术基础 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. 135~136