

# 基于去除熔化物形态分析的铝合金薄板激光切割试验研究

王彦飞 王续跃 康仁科 徐文骥 郭东明

(大连理工大学机械工程学院精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 为提高铝合金薄板激光切割质量,对切割去除熔化物进行了收集、观察及测量研究。在 Nd:YAG 脉冲激光切割模式下,采用不同气熔比 0.1898,0.2798,0.3708 和 0.6519,对 0.85 mm 厚的 1000 系铝合金薄板进行切割试验。试验通过超景深三维显微镜对收集的去除熔化物形状和尺寸进行观测研究。结果表明,去除熔化物颗粒由球形颗粒和蝌蚪形颗粒两种颗粒组成,其中球形颗粒平均尺寸在 71~123  $\mu\text{m}$  之间;高气熔比切割去除熔化物主要呈球形,颗粒尺寸较小,切割质量较好;低气熔比下熔化物主要是蝌蚪形,其中呈现的球形颗粒尺寸较大,切割质量较差。试验最终在辅助气压 0.6 MPa 高气熔比 0.6519 下获得了较高质量的切口。研究结果深化了铝合金激光切割的机理认识,有效提高了铝合金薄板的激光切割质量。

**关键词** 激光技术;激光切割;气熔比;熔化物形态;切割质量;铝合金薄板

**中图分类号** TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0803007

## Experimental Study on Laser Cutting Based on Removal Forms for Aluminum Alloy Sheet

Wang Yanfei Wang Xuyue Kang Renke Xu Wenji Guo Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** To improve the quality of laser cutting in aluminum alloy sheet, the collected melt is observed and measured. Laser cutting of 1000 series aluminum alloy sheets, with 0.85mm thickness, is carried out on a Nd:YAG pulsed laser machine under the different vapor-melt ratios of 0.1898, 0.2798, 0.3708 and 0.6519. In experiments the shape and size of collected removal are analyzed by a 3-D microscope. The melt is found to be tadpole-shape particles and spherical particles ranging from 71~123  $\mu\text{m}$  in average diameter. The results show the collected particles are formed spherical at the high vapor-melt ratio and small in average diameter with good cutting quality. In contrast, at the low vapor-melt ratio the form is mainly tadpole-shape and the existence of big spherical particles of which with poor cutting quality. Finally, under the condition of gas pressure of 0.6 MPa and high vapor-melt ratio of 0.6519, the researches achieve higher quality cut. The results help researchers to understand the characteristics of laser cutting in aluminum alloy and improve the laser cutting quality of aluminum alloy sheet effectively.

**Key words** laser technique; laser cutting; vapor-melt ratio; melt forms; cutting quality; aluminum alloy sheet

**OCIS codes** 140.3390; 320.5550; 350.2660

## 1 引 言

铝合金比强度高、导热性好、易于成形,在航空航天、交通运输、建筑、通信、电子工业等领域获得了

广泛应用。作为除了铁之外用量最多的金属材料,一直是材料领域研究的热点<sup>[1]</sup>。但是铝及铝合金切削性能较差,尤其是 1000 系铝合金<sup>[2]</sup>,这一缺点影

收稿日期: 2012-03-30; 收到修改稿日期: 2012-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(50975041)资助课题。

作者简介: 王彦飞(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光精密加工方面的研究。E-mail: wangyfmeng2010@163.com

导师简介: 王续跃(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事精密与特种加工等方面的研究。

E-mail: wbzdd@dlut.edu.cn(通信联系人)

响了其在精密及超精密领域内的应用。利用激光对铝及铝合金加工的方法是一种区别于传统加工的特种加工方法。同时由于铝及铝合金的熔化温度为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,激光加工容易达到熔化乃至气化温度,这样利用高功率密度激光对铝及铝合金加工是有优势的。

激光加工中材料去除形式对切割质量起着关键作用。然而由于激光加工中涉及到的物理过程的复杂和工艺参数的繁多,试验中很难在线通过观察检测来研究材料的去除机理。因此,国内外学者为研究材料去除大多是通过建立物理数学模型来分析模拟的<sup>[3~6]</sup>。但是对于熔化物材料是如何具体去除的,为了简化模型只是将熔化物去除假设为整体块状去除模型,这会给结果带来一定的误差。

对于激光切割去除熔化物,国内外对这方面进行了相关试验研究。Cabanillas等<sup>[7]</sup>对去除熔化物颗粒进行了观察,指出激光切割产生的熔化物颗粒中存在球形颗粒,这或许可以利用于粉末冶金领域。Lobo等<sup>[8]</sup>用专用装置收集研究了激光切割中产生的空气悬浮物颗粒,得出空气悬浮物颗粒的直径大小与切割质量有着直接密切的关系。Yilbas等<sup>[9]</sup>模拟了激光切割金属材料时熔化层的形成并预测了颗粒的大小,通过扫描电子显微镜观察了圆球颗粒的高倍外表形貌。对于这方面国内文献记载较少,华中科技大学黄开金等<sup>[10]</sup>切割不锈钢管材时观察了去除颗粒的形貌。

激光切割基于气熔比控制是一种新分析视角<sup>[11]</sup>,文献[11]研究了气熔比与切割质量之间的关系,同时,又运用能量、质量和动量三大守恒定律建立了气熔比激光切割数学模型,研究了气熔比值和残留熔融层厚度随激光功率和扫描速度的变化,并经过试验验证了模型的可靠性<sup>[12]</sup>,有效地提高了缝阵天线薄板的激光切割质量。气化和熔化是激光切割铝合金薄板两种基本去除形态,从去除熔化物形态,即颗粒形状和尺寸着手研究,可进一步加深对激光切割机理的认识。本文基于去除熔化物形态分析,对铝合金薄板激光加工质量进行基础试验研究。

## 2 基本原理

激光切割过程存在着复杂的物理变化,高能量密度激光束照射工件表面,部分光束能量被反射,剩余部分被材料吸收,工件材料温度迅速上升至熔化乃至气化温度,在切割区域发生熔化和气化现象,并

在气态和固态材料之间形成具有一定粘度和厚度的液态熔化层。图1为激光稳态切割过程中切割区域材料的质量流动示意图<sup>[12,13]</sup>。激光切割在达到平衡状态下,熔化层,熔化界面 $F_m$ 和气化界面 $F_v$ 都将以切割速度 $V_c$ 向切割方向推进,且状态保持不变。熔融材料在气化界面 $F_v$ 发生气化,以速度 $V_v$ 脱离熔化层;在厚度方向,熔化层在辅助气体压力、辅助气体剪切力、自身重力等作用力下克服熔融材料之间的粘性摩擦力,使得部分熔融材料沿厚度方向以速度 $V_z$ 向下而被去除;在切口水平方向,气化膨胀产生反冲压力垂直作用于 $F_v$ 界面,使部分熔融材料以速度 $V_y$ 沿平行于切口切割反方向流动而脱离熔化层被去除。熔融材料脱离熔化层后由于内部存在粘性摩擦力以及光束作用后的冷凝效应不能完全去除,部分二次冷凝形成重铸层,在切口底部形成挂渣,切面上形成条纹,而这一过程与加工质量有着密切的关系。

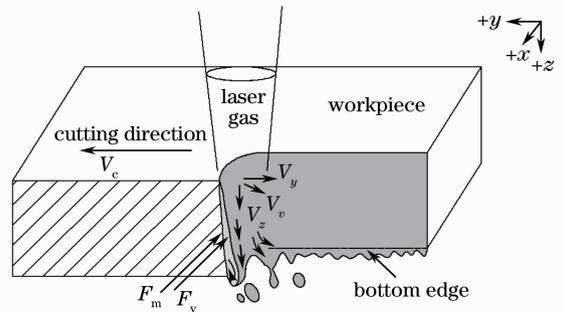


图1 激光切割材料流动图

Fig. 1 Illustration of material flows in laser cutting

在激光切割材料时,材料流动的基本形态为气化和熔化,两者质量之比即为气熔比。传统的激光切割是调整、比配外部切割工艺参数进而控制优化切割质量<sup>[14,15]</sup>,但是由于工艺参数的繁多,使得优化过程具有复杂性。气化和熔化是激光切割铝合金薄板的两种基本去除形态,以激光切割气化与熔化比例作为新的切割参数,从去除熔化物形态入手,研究颗粒形状和尺寸,可进一步加深对激光切割机理的认识,有利于提高激光切割铝合金薄板的质量。

## 3 试验材料与条件

### 3.1 试验材料

试验材料为 $0.85\text{ mm}$ 厚的1000系铝合金薄板材料,铝合金主要化学成分如表1所示。试验所用辅助气体为普通 $\text{N}_2$ 以排除部分熔化的材料。

表 1 1000 系铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of 1000 series aluminum alloy (mass fraction, %)

Al	Fe	Si	Cu	Cr	Zn	Ni
99.3628	0.4721	0.0980	0.0258	0.0201	0.0125	0.0087

### 3.2 试验条件

激光器是 JK701H 型 Nd:YAG 固体脉冲激光器,其参数为输出功率 0~170 W,脉冲宽度 0.5~5.0 ms,重复频率 11~200 Hz。试验装置示意图如图 2 所示,收集箱尺寸长宽高 310 mm×220 mm×160 mm。激光头在试件板材上方做直线扫描运动,扫描长度共计 1022 mm。加工时辅助气体采用同轴吹气,气化材料逸出装置,去除熔化物保留在收集装置内部。试验中所用激光功率范围为 70~110 W,切割速度范围为 80~130 mm/min,其他工

艺参数不变,如表 2 所示。

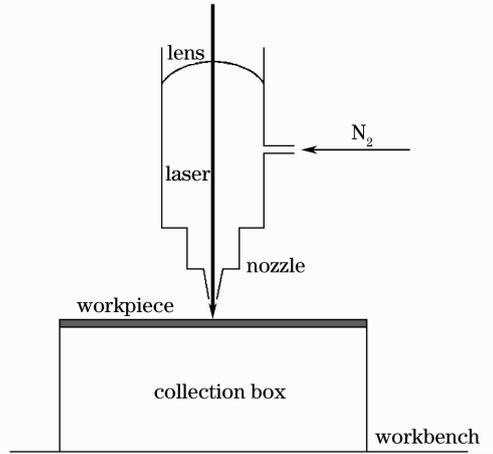


图 2 激光切割及去除熔化物收集装置示意图

Fig. 2 Setup of laser cutting and melt removal collected

表 2 激光切割工艺参数

Table 2 Parameters in laser cutting

Parameter	Frequency /Hz	Defocusing amount /mm	Pulse width /ms	Gas pressure /MPa
Value	35	0	2	0.4

试验后通过精度为 0.01 mg 的 CP225D 型高精度电子分析天平测出加工前后试件与总装置的质量  $M_1$ 、 $M_2$ 。采用超景深三维显微镜测得切口上部和下部宽度分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,根据材料密度  $\rho$ ,厚度  $h$ ,总切口长度  $l$  可测得气熔比值  $R_{vmr}$  为

$$R_{vmr} = \frac{M_v}{M_m} = \frac{2(M_1 - M_2)}{\rho h l (d_1 + d_2) + 2(M_2 - M_1)} \quad (1)$$

## 4 试验结果与分析

### 4.1 激光功率和切割速度对气熔比影响

图 3 为收集到的去除熔化物,可观察到熔化物呈颗粒粉末状。如表 3 所示,试验通过改变激光功率和切割速度来对气熔比进行调节控制,得到 4 组不同的气熔比值。由试验结果可知,固定激光加工



图 3 收集的去熔化物

Fig. 3 Collection of melt removal

速度,气熔比随激光功率的增加而增加;固定激光功率,气熔比随激光加工速度的增加而减小。这一规律也在文献[12]中得到了具体的数学建模分析。

表 3 不同功率和速度下的气熔比值

Table 3 Vapor-melt ratios at different powers and velocities

Test serial number	1	2	3	4
Power /W	70	110	110	110
Velocity / (mm·min <sup>-1</sup> )	100	100	80	130
Vapor-melt ratio	0.2798	0.3708	0.6519	0.1898

### 4.2 气熔比对去除熔化物形态的影响

图 4 是对收集熔化物在超景深显微镜下放大 100 倍后的拍摄图。可观察出无论是高气熔比还是低气熔比,熔化物颗粒主要呈现两种,一种是球形颗粒,另一种是有长尾部的蝌蚪形状。偶尔出现的大块状,经证实为试件表面氧化层的氧化皮。

图 4(a)是在低气熔比 0.1898 下拍摄收集到的熔化物颗粒图,熔化物颗粒呈现大量的蝌蚪形状,有少量的球形颗粒状。熔化物颗粒中的球形颗粒随气熔比的提高而增加,且蝌蚪形状颗粒减少,在高气熔比 0.6519 熔化物颗粒基本上由球形颗粒组成,如图 4(d)所示。将收集到的熔化物颗粒均匀铺开,在显微镜放大 100 倍下,视野内取样剔除大块颗粒形状,分别取蝌蚪形和球颗粒形数量,可得到样品在不同气熔比 0.1898,0.2798,0.3708 及 0.6519 下圆球

颗粒分别占总颗粒的 28.4%, 52.8%, 69.2% 和 75.0%。如图 5 所示, 在超景深显微镜放大 200 倍下取样, 采用两点直线法测量蝌蚪形颗粒尾部长度, 采用三点外接圆法测量球形颗粒状尺寸和蝌蚪形头部尺寸, 试验求得样品球形颗粒的平均直径。图 6 为球形颗粒平均直径随气熔比的变化情况, 可得到随气熔比的增加, 球形颗粒的平均尺寸在下降。如试验在较高气熔比 0.6519 下的球形颗粒平均尺寸

约为 71  $\mu\text{m}$ , 而在低气熔比 0.1898 下球形颗粒平均尺寸约为 123  $\mu\text{m}$ 。试验检测得到蝌蚪形状头部直径在 60~120  $\mu\text{m}$  范围, 尾部长度在 200~400  $\mu\text{m}$  范围。试验检测得到最小颗粒尺寸为 27  $\mu\text{m}$ , 所收集到的去除熔化物小于 30  $\mu\text{m}$  的颗粒非常少, 可以推断铝合金空气悬浮物难收集颗粒尺寸小于 30  $\mu\text{m}$ 。由于悬浮颗粒很难收集到收集箱内, 这也是本试验气熔比测量方法的一个误差。

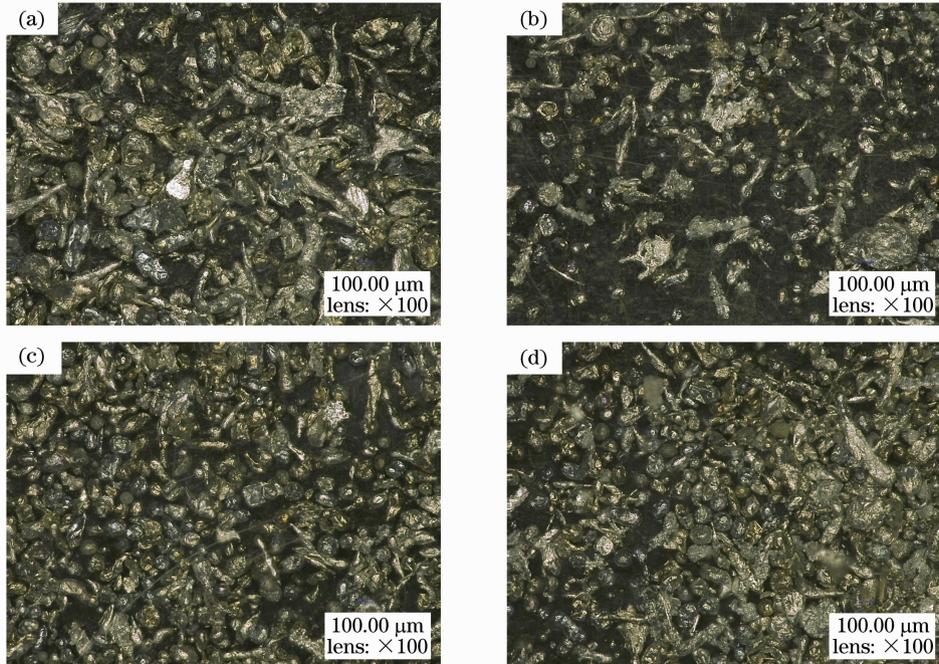


图 4 不同气熔比下的去除熔化物形态。(a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

Fig. 4 Removal particles at different vapor-melt ratios. (a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

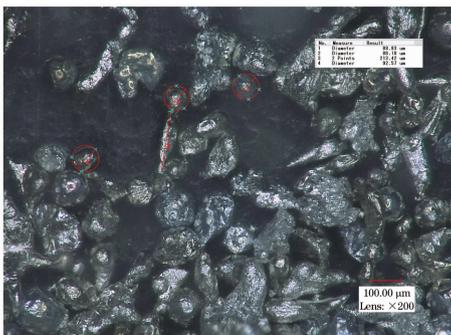


图 5 测量颗粒尺寸图

Fig. 5 Measurement of particles size

以上结果分析说明不同气熔比下, 去除熔化物中的球形颗粒和蝌蚪形颗粒组成比例不同, 高气熔比球形颗粒多而低气熔比蝌蚪形颗粒多, 没有完全造成去除熔化物形态的跳跃式变化。球形颗粒平均尺寸在高气熔比较低气熔比下要小。

### 4.3 气熔比对切割质量的影响

切割质量与材料去除形式有着密切的联系。激

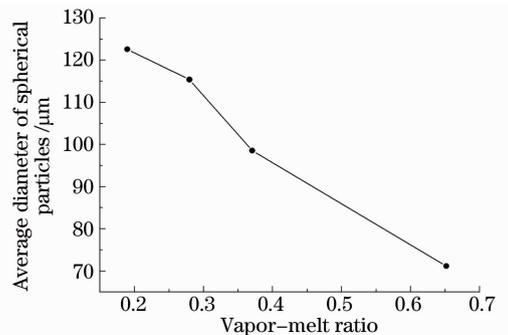


图 6 气熔比对球形颗粒平均尺寸的影响

Fig. 6 Effect of vapor-melt ratio on average diameter of spherical particles

光切割铝合金薄板在高气熔比与低气熔比下的去除熔化物形态有所差异, 意味着切割质量也会存在着差异。试验通过超景深显微镜观察和测量了不同气熔比下切口顶部质量和切面质量。

图 7 为不同气熔比值下放大 200 倍的切口形貌图。图 7(a)切口显示有明显重铸层, 切口宽度不均

匀,总体表现为切口质量差;图7(b)切口表现为有明显重铸层,切口宽度不均匀,总体仍表现为切口质量较差;图7(c)切口有重铸层,且切口宽度较均匀;图7(d)得到的切口质量好,无明显重铸层且切口宽度一致性好。由图7可见,高气熔比下可以得到好

的切口质量。同时试验对各切口宽度进行了3次测量取平均值,得出了随气熔比的增加,切口宽度增大,如图8所示。在低气熔比0.1898下其平均缝宽为145  $\mu\text{m}$ ,而在高气熔比0.6519下其宽度较大,平均缝宽为181  $\mu\text{m}$ 。

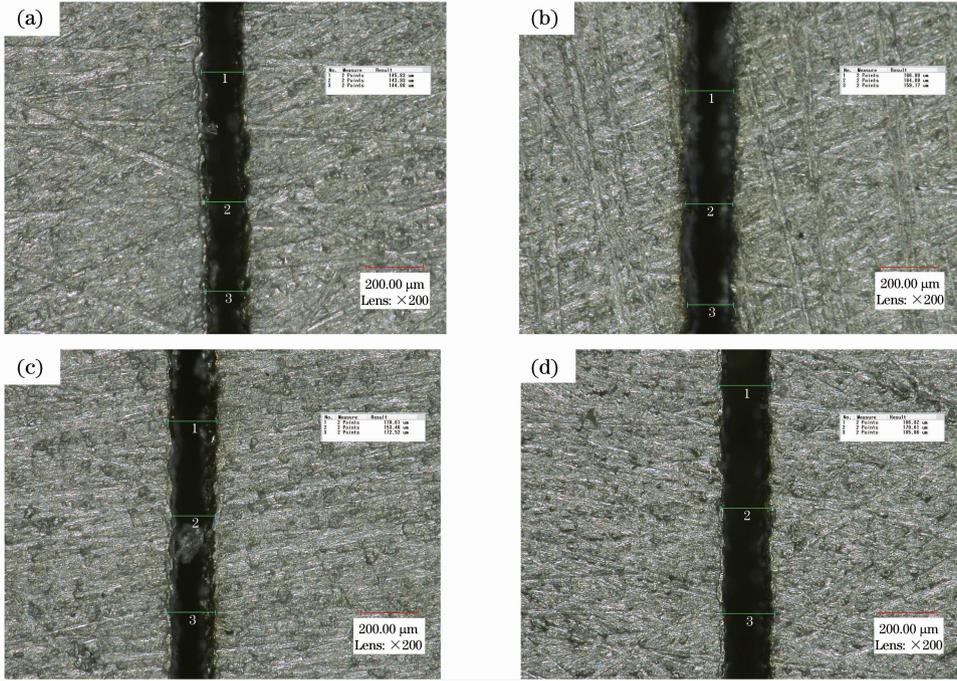


图7 不同气熔比下顶部切口质量。(a) 0.1898;(b) 0.2798;(c) 0.3708;(d) 0.6519

Fig. 7 Top cutting quality at different vapor-melt ratios. (a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

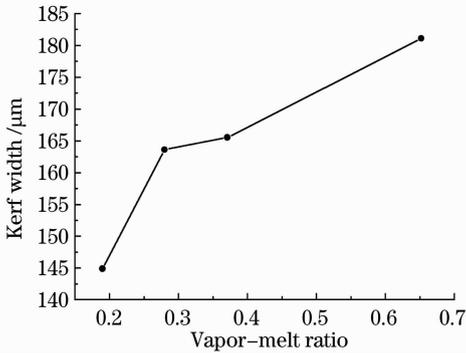


图8 气熔比对缝宽的影响

Fig. 8 Effect of vapor-melt ratio on kerf width

重铸层为材料熔化物未被及时去除而重新凝固形成的,在切面上形成的重铸层表现为条纹,在切口底部上形成的则表现为挂渣,两者对切割质量有着严重影响。图9为放大100倍的切面形貌图。气熔比的不同也导致了切面的质量不同。通过标定板材底部基材的位置,可得到挂渣根部的位置。观察得到低气熔比切割底部挂渣高度要明显大于高气熔比切割,且在长度方向挂渣颗粒粗大,出现频率高,以至于出现了挂渣的连接现象。如图9(a)所示,该切

面明显出现熔化物熔流痕迹,造成切口表面较粗糙。而在高气熔比下,图9(d)切面所表现的切面质量好,挂渣少,且出现频率低。图9(b)和(c)的切面质量介于上述两者之间。试验对基材和挂渣高度进行三次测量,取平均值减去板材厚度可得到挂渣的高度。如图10所示,在相同辅助气压0.4 MPa下,随气熔比由0.1898增至0.6519,挂渣高度由395  $\mu\text{m}$ 降至170  $\mu\text{m}$ ,挂渣高度随气熔比的增加而减小。

由于试验中所采用的辅助气压0.4 MPa不够大,即使高气熔比下也会出现一定程度的挂渣。基于以上试验得到的气熔比、去除熔化物形态及切口质量之间的关系,在气熔比为0.6519条件下,去除熔化物主要呈现球形颗粒,切口质量较好,适当调高辅助气压至0.6 MPa,试验获得了达到实际应用要求的高质量底部无挂渣的切口,且切面无明显重铸层,如图11所示,测得的厚度与试件厚度相等。

## 5 结 论

针对铝合金薄板激光切割过程中气化和熔化两种基本去除形式,利用气熔比方法研究激光切割铝

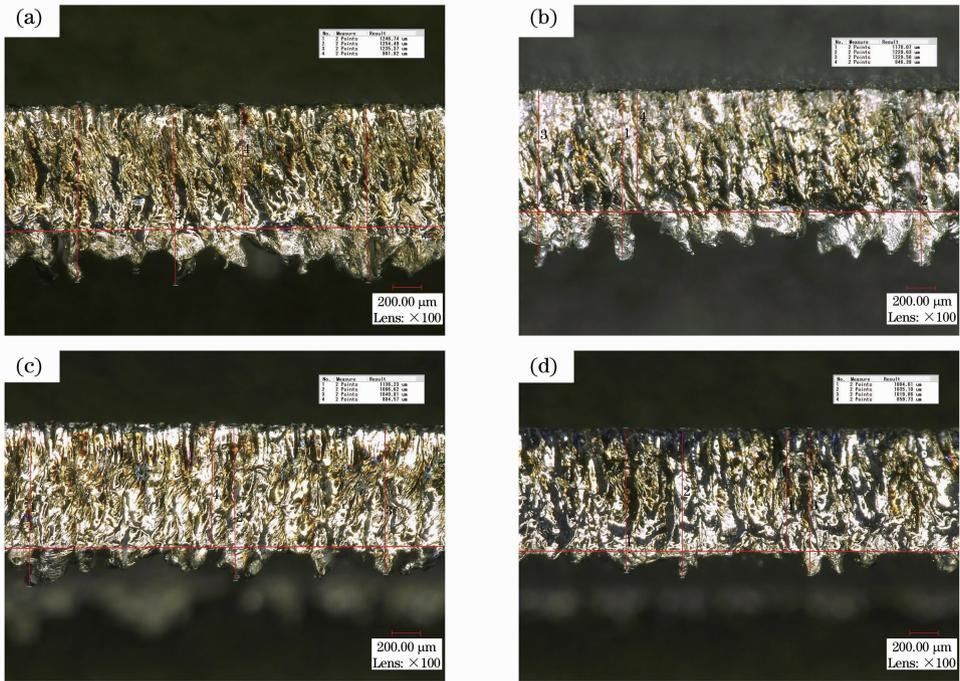


图 9 不同气熔比下切面质量。(a) 0.1898;(b) 0.2798;(c) 0.3708;(d) 0.6519

Fig. 9 Section quality at different vapor-melt ratios. (a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.6519; (d) 0.6519

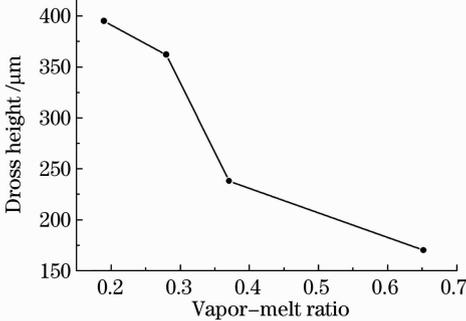


图 10 气熔比对挂渣高度的影响

Fig. 10 Effect of vapor-melt ratio on dross height

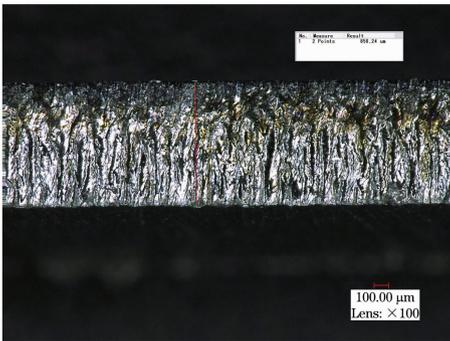


图 11 高质量切口(0.6519, 0.6 MPa)

Fig. 11 Excellent quality cut (0.6519, 0.6 MPa)

合金薄板去除熔化物颗粒形态。对去除熔化物形态进行了观察测量,得到高气熔比与低气熔比下球形颗粒与蝌蚪形颗粒组成比例不同,分析了球形颗粒平均尺寸与气熔比之间的关系,研究了气熔比与切

割质量之间的关系。

在相同辅助气压 0.4 MPa 条件下,随气熔比由 0.1898 增至 0.6519,熔化物球形颗粒尺寸逐渐减小,平均尺寸由 123 μm 降至 71 μm,去除熔化物球形颗粒百分比也由 28.4% 增至 75.0%。高气熔比切割质量要好于低气熔比切割质量,表现为切口宽度均匀,无明显重铸层,切面底部挂渣少,而低气熔比切割切口质量差,切面底部挂渣粗大,出现频率高,切面质量差。在辅助气压 0.6 MPa 高气熔比 0.6519 下得到了能达到实际应用的底部无挂渣高质量的切口。

### 参 考 文 献

- 1 C. Kammer. Aluminum Handbook [M]. Lu Huimin Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. 32~40  
卡 默. 铝手册[M]. 卢惠民译. 北京: 化学工业出版社, 2008. 32~40
- 2 Liu Jing'an, Xie Shuisheng. Aluminum Alloy Material Application and Development [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004. 130~134  
刘静安, 谢水生. 铝合金材料应用与技术开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 130~134
- 3 A. F. H. Kaplan. An analytical model of metal cutting with a laser beam[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(5): 2198~2208
- 4 P. Marek, C. Hana, S. Martin et al.. Modeling of laser cutting and drilling[C]. *SPIE*, 2002, **4888**: 146~151
- 5 C. Mas, R. Fabbro. Steady-state laser cutting modeling[J]. *J. Laser Appl.*, 2003, **15**(3): 145~152
- 6 Lee Mein Wee, Lin Li. An analytical model for striation formation in laser cutting [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **247**(1-4): 277~284

- 7 E. D. Cabanillas, M. F. Creus, R. C. Mercader. Microscopic spheroidal particles obtained by laser cutting[J]. *J. Mater. Sci.*, 2005, **40**(2): 519~522
- 8 L. Lobo, K. William, J. R. Tyrer. The effect of laser processing parameters on the particulate generated during the cutting of thin mild steel sheet[J]. *J. Mech. Engng. Sci.*, 2002, **216**(3): 301~313
- 9 B. S. Yilbas, B. J. Abdul Aleem. Dross formation during laser cutting process[J]. *J Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(7): 1451~1461
- 10 Huang Kaijin, Xie Changsheng, Shao Keran. Investigation on the hanging dross and the flight slag of 1Cr18Ni9Ti stainless steel pipe laser cutting[J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(3): 159~163  
黄开金, 谢长生, 邵可然. 激光切割 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管材挂渣和飞渣的研究[J]. *应用激光*, 2001, **21**(3): 159~163
- 11 Wang Xuyue, Meng Qingxuan, Kang Renke *et al.*. Experiments of laser cutting of aluminum alloy sheet based on vaporization-melt ratio controlled method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2648~2652  
王续跃, 孟庆轩, 康仁科 等. 气熔比法铝合金薄板激光切割试验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2648~2652
- 12 Meng Qingxuan, Wang Xuyue, Xu Wenji *et al.*. Vaporization-melt ratio mathematical model and experiments of laser cutting sheet metal [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(17): 172~178  
孟庆轩, 王续跃, 徐文骥 等. 薄板激光切割气熔比数学建模及试验验证[J]. *机械工程学报*, 2011, **47**(17): 172~178
- 13 F. Quintero, F. Varas, J. Pou *et al.*. Theoretical analysis of material removal mechanism in pulsed laser fusion cutting of ceramics [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(4): 655~666
- 14 Chen Jimin, Xiao Rongshi, Zuo Tiechuan *et al.*. Intelligent system for selecting laser cutting parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 575~578  
陈继民, 肖荣诗, 左铁钊 等. 激光切割工艺参数的智能选择系统 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 757~760
- 15 Yan Qi, Liu Feng. Influence of technology parameters on the laser cutting quality [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(3): 151~153  
阎启, 刘丰. 工艺参数对激光切割工艺质量的影响 [J]. *应用激光*, 2006, **26**(3): 151~153

栏目编辑: 宋梅梅