

基于图像处理的铝合金薄板激光切割质量研究

王彦飞 王续跃 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 为加深激光切割中材料去除机理的认识,利用 Imagine-Pro Pluse (IPP)图像处理技术研究了激光切割去除熔化物颗粒形状及其特征尺寸分布。基于气熔比控制的试验方法,对 0.85 mm 厚的 1000 系铝合金薄板进行了激光切割试验。通过对颗粒图像度量标准的设定,去除熔化物颗粒形貌分为圆形颗粒、类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒。图像处理结果表明:随气熔比的增大,去除熔化物颗粒中圆形颗粒所占百分比越来越大,类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒所占百分比越来越小,且各形状颗粒平均特征尺寸随气熔比的增大而减小。同时对切口质量进行了测量,得到切口质量随着气熔比的增加而提高。建立了熔化物去除模型,揭示了熔化物去除与切割质量有着直接密切的关系,并最终得到了较高质量切口和缝阵天线薄板样件。

关键词 激光技术; 激光切割; 铝合金薄板; 图像处理; 气熔比; 去除熔化物; 切割质量

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0103002

Study on Laser Cutting Quality of Aluminum Alloy Sheet Based on Image Processing

Wang Yanfei Wang Xuyue 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 understand the material removal mechanism better in laser cutting, the shape and characteristic parameter distribution of removal melt particles are obtained through image processing with imagine-pro plus (IPP) software. Laser cutting of 1000 series aluminum alloy sheets with thickness of 0.85 mm, is carried out based on the vapour-melt ratio controlled. The removal melt particles are classified three kinds of shape through the metric rule, including the rounded particle, the quasi-rounded particle and the tadpole-shape particle. The results show the percentage of rounded particles increases in removal melt particles with vapour-melt ratio increasing, but the percentage of quasi-rounded and tadpole-shape decreases, and the average size of particles reduces with vapour-melt ratio increasing. Also the cutting quality improves with the increase of vapour-melt ratio in test. A removal model is established, which indicates that the cutting quality has a significant relationship with removal melt. Finally the high quality cutting and the slot array antenna sheet are obtained.

Key words laser technique; laser cutting; aluminum alloy sheet; image processing; vapour-melt ratio; removal melt; cutting quality

OCIS codes 140.3390; 320.5550; 350.2660

1 引言

激光切割金属材料时,材料流动的基本形态为气化和熔化,气化材料直接脱离基体材料,而熔化材料部分在辅助气体作用下脱离基体材料,部分发生

二次冷凝。材料气化质量和熔化质量的比值即为气熔比值。基于气熔比激光切割是一种新的分析视角^[1-3]。激光切割过程中熔化物的状态、最终成形和去除方式,直接影响着加工质量评价指标^[4-5]。

收稿日期: 2013-05-10; **收到修改稿日期**: 2013-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(50975041,51375073)

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: wbzzd@dlut.edu.cn

对此,很多学者对激光切割中的熔化物及去除进行了大量的数学模拟和试验研究,以揭示材料去除机理而提高激光切割质量^[6-9]。尤其是可视化技术的发展,利用高速摄像机监视激光切割中熔化物动态特性和去除已成为一种强有力的有效试验手段^[10-12]。但借助高速摄影机监视切割要么切割材料是透明材料,要么其监视区域为切口上端局部区域。对于去除熔化物,国内外学者仅在高倍显微镜下观察了其颗粒形貌,并未详细研究其形状、尺寸和数量分布。利用图像处理技术的方法研究激光切割去除熔化物是一种有效的方法。

本文基于气熔比控制,通过对去除熔化物形貌和特征参数评价来研究熔化物去除方式,加深激光切割材料去除机理认识。去除熔化物颗粒为几十微米到上百微米的微米级颗粒^[3]。颗粒测试常用的方法有激光散射法、沉降法、电阻法和图像分析法等。但是图像分析法是唯一可以观察颗粒形貌并测量单个颗粒大小的最传统、最可靠的方法^[13-14]。Imagine-Pro Plus (IPP)是功能强大的二维(2D)和三维(3D)图像处理、分析软件,具有丰富的测量功能,是世界顶级的图像分析软件包。基于 IPP 图像技术对激光切割去除熔化物显微颗粒图像作定量分析,内容包括颗粒形状、数量及其特征尺寸分布等,以此研究激光切割材料去除机理,为实时监测去除熔化物而在线控制激光切割质量这一技术手段提供了可能。

2 基本原理与试验方法

图 1 为气熔比法激光切割示意图。气熔比法激光切割与传统激光切割中的熔化切割在理论上并无差别。但与传统激光切割区别的关键在于建立起了熔化材料与气化材料之间的联系。所用到的激光能量是脉冲输入,这样零件的热累计减小,不会发生过热而影响零件的切割质量。

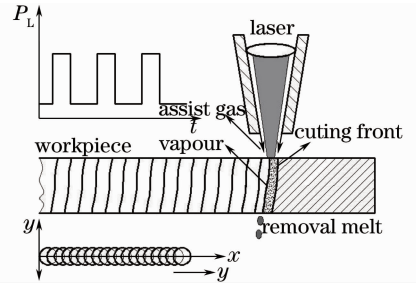


图 1 气熔比法激光切割原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vapour-melt ratio laser cutting
激光切割中的气熔比大小与材料特性、输入激光能量和扫描速度等有关。气熔比 R_{vm} ^[2] 为

$$R_{vm} = \frac{A_0 P_0 - \omega h q (T_m - T_a) - \rho v \omega h (e_m + e_{mreq})}{\rho v \omega h (e_v + e_{mreq}) - A_0 P_0 + \omega h q (T_m - T_a)}, \quad (1)$$

式中 A_0 为激光吸收系数, P_0 为激光功率, v 为切割速度, ω 为切口宽度, h 为板材厚度, q 为导热系数, ρ 为材料密度, e_m 为单位质量材料熔化能量, e_v 为单位质量材料气化能量, e_{mreq} 为单位质量熔化物维持稳态切割所需要的能量, T_m 为材料熔化温度, T_a 为材料初始温度。可见,在激光吸收率 A_0 一定的情况下,激光功率 P_0 越大,气熔比越大;而切割速度 v 越小,气熔比越大。

试验通过该变激光功率和切割速度来获得不同气熔比值。激光器选用 JK701H 型 Nd:YAG 固体脉冲激光器,波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。切割材料为 1000 系 0.85 mm 厚铝合金薄板。因实验用高精度分析天平的称重量程较低(量程 $0.00001 \text{ g} \sim 220.00000 \text{ g}$),为了称重的精密性,收集箱为纸质材料,尺寸为 $310 \text{ mm} \times 220 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 。激光切割长度共计 1082 mm。辅助气体 N_2 采用同轴吹气方式,去除熔化物保留在收集箱中。为防止穿透板材后的激光烧蚀纸箱,纸箱底部铺有金属片。表 1 为试验过程中固定的激光切割参数。通过该变激光功率和切割速度获得不同气熔比值,分别为 0.2798、0.3708、0.6519 和 0.1898,如表 2 所示。

表 1 激光切割工艺参数

Table 1 Parameters in laser cutting

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

表 2 不同功率和速度下的气熔比值

Table 2 Vapour-melt ratios at different powers and velocities

Test serial number	1	2	3	4
P_0/W	70	110	110	110
$v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	100	100	80	130
R_{vm}	0.2798	0.3708	0.6519	0.1898

3 试验结果

图2为通过超景深显微镜放大100倍拍摄的不同气熔比下切口质量。在不同气熔比下切口底部存在着不同程度的挂渣。从切口底部挂渣来看,低气熔比下挂渣较多,表现在挂渣粗大,在长度方向上挂渣出现频率高,甚至出现粘连现象,如图2(a)和(b);而在高气熔比下,切口底部挂渣少且短小,挂

渣出现频率相对较低,如图2(c)和(d)。试验对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平均高度。如图3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 μm 降至170 μm ,挂渣高度随气熔比的增加而减小。

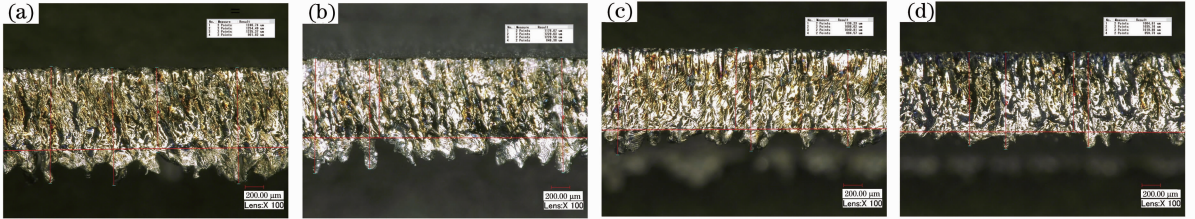


图2 不同气熔比下切口质量。(a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

Fig. 2 Cutting quality at different vapour-melt ratios. (a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

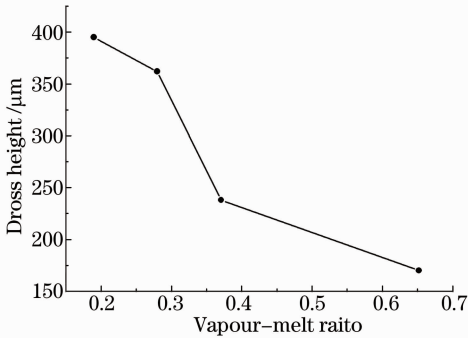


图3 气熔比对挂渣高度的影响

Fig. 3 Effect of vapour-melt ratio on dross height

图4为通过超景深显微镜放大200倍拍摄的去除熔化物。熔化物颗粒主要呈现三种形状,分别为圆形颗粒、类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒,偶尔出现不规则大块状颗粒,经证实为试件表面氧化皮,不予以研究。颗粒的特征尺寸经估计,圆形和类圆形颗粒分布于几十微米到上百微米,而蝌蚪形颗粒长度分布于200~300 μm 之间。

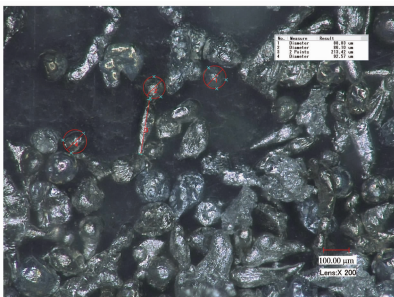


图4 去除熔化物颗粒显微图像

Fig. 4 Microscopic image of removal melt particles

4 图像处理步骤

将气熔比值为0.6519、辅助吹气压力为0.4 MPa的显微熔化物颗粒图像作为处理例子,演示IPP软件图像处理过程。将去除熔化物颗粒显微图像输入IPP图像处理软件,为便于识别颗粒边缘,需进行图像反差增强操作,操作结果如图5(a)所示。显微图像中有100 μm 长度标尺,需要作同样长度的标尺供软件识别并后续测量使用。

显微图像中的熔化物颗粒出现了大量的重叠,软件不能完全识别而给测试结果带来误差。对此,利用人工干预和IPP中的魔棒相结合的方法来标识出每个颗粒,使得每个颗粒成为单独的一个感兴趣区域进行测试,如图5(b)所示。标识时为了测试的精确性,设定如下准则:边缘颗粒为非完整颗粒时不进行标识;图像中的不规则的氧化皮颗粒不计入其中;图像中熔化物颗粒有相互重叠的现象,标识时标识线不能有重叠,否则软件会默认为一个颗粒,为此,当一个颗粒边缘标识后,可将边缘标识线移动到无颗粒区域,团聚颗粒不进行标识统计。

最后对颗粒进行计数和特征测量。测量过程中,IPP软件可以自动分析图像,并对每个测量对象进行数字标记。如图6(c)所示,图中标记的颗粒共有310个。同时相应颗粒的面积、周长、平均粒径、长度等特征参数以数据表格的形式存储到了软件中。

(2)式为判定颗粒形状的判定公式^[15]:

$$M = \frac{4\pi \times A}{P}, \quad (2)$$

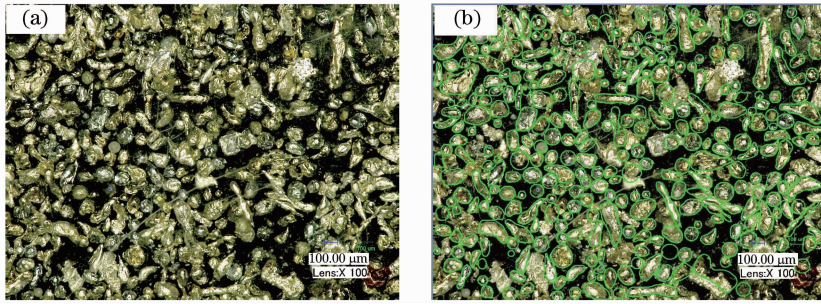


图 5 颗粒显微图像处理。(a) 图像反差增强；(b) 区域标识

Fig. 5 Microscopic image processing of particles. (a) Contrast enhancement; (b) identifying area

式中 M 为无量纲度量数, A 为颗粒的面积, P 为颗粒的周长, 度量数 M 的数值区间为 $[0, 1]$, 对于理想圆其数值为 1, 而对于非圆形其数值小于 1。其中度量数值越接近 1, 目标形状越接近圆形。这样可利用度量数 M 对熔化物颗粒的形状进行分类。依据颗粒实际形状与度量数值 M 的计算比较, 度量判定标准设为: 度量数值 M 在区间 $[0.95, 1]$ 之间的去除熔化物颗粒为圆形颗粒; 在区间 $[0.85, 0.95)$ 之间的为类

圆形颗粒; 在区间 $[0, 0.85)$ 之间的为蝌蚪形颗粒。

依据判定标准, 导出显微图像 6(c) 的 IPP 处理数值, 可得到表 3 所示的报告结果。圆形颗粒和类圆形颗粒考察指标为平均直径, 蝌蚪形颗粒考察指标为平均长度。图 7 为圆形颗粒直径分布直方图, 圆形颗粒直径主要分布在 $40 \sim 140 \mu\text{m}$ 之间, 其中集中分布在 $60 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间, 直径在 $80 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间分布数量最多, 达到了 50 个。

表 3 IPP 显微图像处理结果

Table 3 Result of IPP microscopic imagine processing

Total particle amount: 310	Rounded particle	Quasi-rounded particle	Tadpole-shape particle
Amount	181	49	80
Percentage /%	58.39	15.80	25.81
Average diameter / μm	93.93	111.09	
Average length / μm	—	—	220.26

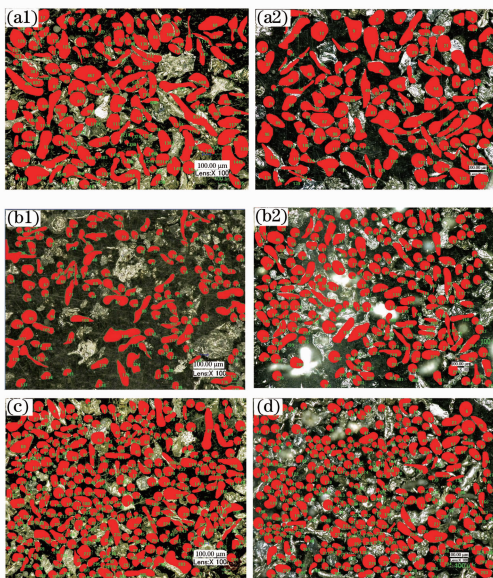


图 6 不同气熔比值下显微图像处理结果。(a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

Fig. 6 Results of microscopic image processing at different vapour-melt ratios. (a) 0.1898; (b) 0.2798; (c) 0.3708; (d) 0.6519

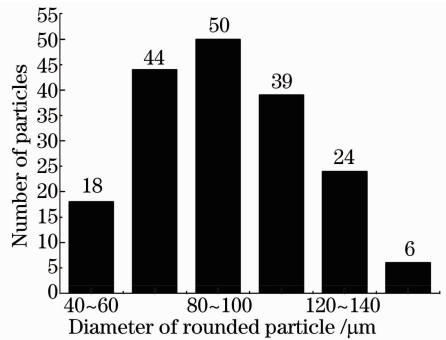


图 7 圆形颗粒数量分布

Fig. 7 Distribution of rounded particles

5 图像处理结果及其分析

5.1 图像处理结果

图像处理方法的一个显著特点是若采样数量少, 测量精度会降低。为了提高其测量精度, 试验中利用显微镜对某些气熔比下的颗粒进行了多张拍照, 一方面增加颗粒样品数量; 另一方面使得每一因素下的颗粒样品数量维持在同一数量级, 增加了统计的准确性。

依照上述图像处理步骤,利用 IPP 软件对不同气熔比值下的每一幅图像进行图像处理,处理结果如图 6 所示。气熔比为 0.1898 时,两幅图像的颗粒个数分别为 156 和 141,计 297 个;气熔比为 0.2798 时,两幅图像的颗粒个数分别为 140 和 211,计 351 个;气熔比为 0.3708 时图像的颗粒个数为 310 个;气熔比为 0.6519 时图像的颗粒个数为 306 个。各气熔比值下统计的颗粒个数基本处在同一水平。表 4 为不同气熔比值下各形状颗粒的数量。

表 4 不同气熔比值下不同形状颗粒数量统计

Table 4 Statistics of different shape particles at different vapour-melt ratios

Vapour-melt ratio	0.1898	0.2798	0.3708	0.6519
Total particle amount	297	351	310	306
Rounded particle	77	172	181	212
Quasi-rounded particle	66	53	49	44
Tadpole-shape particle	154	126	80	50

对不同气熔比值下颗粒数量进行数据处理,图 8 为气熔比值对颗粒形状百分比的影响规律。不同气熔比值下,去除熔化物中主要颗粒为圆形颗粒和蝌蚪形颗粒,圆形颗粒所占百分比始终是最底的。随气熔比值的增大,圆形颗粒所占百分比逐渐增加,如在低气熔比 0.1898 下,圆形颗粒百分比为 25.93%,而在高气熔比 0.6519 下,去除熔化物中圆形颗粒百分比高达 69.28%。而随着气熔比值的增加类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒所占百分比均逐渐减小,如在低气熔比 0.1898 下,类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒占总颗粒的 22.22% 和 51.85%,当气熔比增加到 0.6519 时,类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒百分比分别降到了 14.38% 和 16.34%。但类圆形颗粒变化较为平缓,而圆形颗粒和蝌蚪形颗粒所占百分比变化较为剧烈。

图 9 为气熔比值对去除熔化物颗粒特征参数的

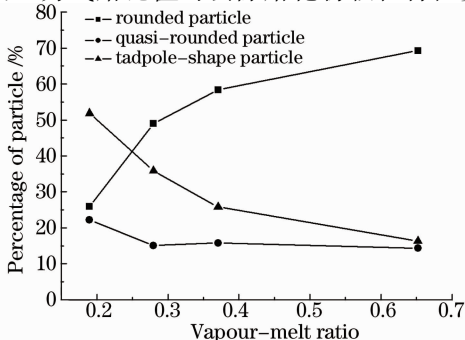


图 8 气熔比值对熔化物颗粒形状影响

Fig. 8 Effect of vapour-melt ratio on particle shape

影响规律。随气熔比值的增加,圆形颗粒平均直径、类圆形颗粒平均直径和蝌蚪形平均长度均呈减小趋势。如对于圆形颗粒,在气熔比值为 0.1898 时其平均直径为 116.36 μm ,随气熔比增加到 0.6519,圆形颗粒平均直径减小到了 88.96 μm ;对于类圆形颗粒,在气熔比值为 0.1898 时平均直径为 151.79 μm ,随气熔比增加到 0.6519,类圆形颗粒平均直径也减小到了 108.93 μm ;对于蝌蚪形颗粒,在气熔比值为 0.1898 时平均长度为 291.69 μm ,随气熔比增加到 0.6519,其平均长度也降低到了 205.22 μm 。纵向看,每个气熔比值下,圆形颗粒平均直径总是小于类圆形颗粒平均直径。

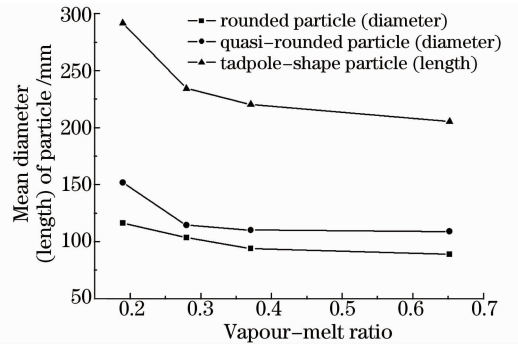


图 9 气熔比值对熔化物颗粒平均直径和长度的影响

Fig. 9 Effects of vapour-melt ratio on average diameter and length of particle

5.2 结果分析

激光切割过程中,激光与材料的作用产生了薄薄的一层熔化物,其厚度并不是均匀的。部分材料在高能量激光束作用下在切割前沿处发生了气化蒸发。气化蒸发对切割前沿熔化物产生了一个稳定的反冲压力 P_s ,反冲压力使得部分熔化物沿垂直于切割前沿方向反向流动。激光切割中,切割前沿上端熔化物材料主要受到辅助气体的向下作用力,此处的反冲作用力效应小于辅助气体作用力效应。气体作用力克服熔化物之间的粘性摩擦力使得熔化物材料主要向下流动;而在切割前沿下端蒸气反冲作用力变大^[10],熔化物材料又沿垂直于切割前沿反向流动。熔化物离切割前沿一定距离后,熔化物不再受到蒸汽反冲压力的作用,而主要受到的是辅助气体的作用力,其运动方向几乎平行于倾斜的激光切割前沿。此时,如果熔化物不能完全被去除时,熔化物将会在切口处发生二次凝固产生重铸层和挂渣,导致较差的切口质量。

而熔化物的去除跟本身属性和辅助气体剪切力大小有关。本身属性包括熔化物的量、温度、表面张

力、粘性力等。熔化物属性和气体剪切力对熔化物的作用可用韦伯 We 数来表示:

$$We = \frac{\rho(T)V_m^2(T)d}{\sigma(T)}, \quad (3)$$

式中 $\rho(T)$ 表示当前温度下熔滴的密度, $V_m(T)$ 表示当前温度下受到辅助气体剪切作用力和熔化物粘性力下的熔化物速度, d 为熔化物汇聚后形成的熔滴直径, $\sigma(T)$ 表示当前温度下熔滴的表面张力。 We 数表示气动力与表面张力的比值。 We 数越大, 表示辅助气体对熔化物的影响效应更大, 相反则表面张力对熔化物的影响效应大。

靠近切割前沿切口下端的熔化物离开切口需经过熔化物的变形、破碎阶段。而当熔化物表面张力与熔化物所受到的惯性气动力可以比较时, 即 We 约为 1 时, 熔化物变形破碎变的困难, 熔化物将很难被去除发生二次凝固, 导致较差的切口质量。为了能够使熔化物顺利被去除, 其 We 数需超过某一临界值。临界值的大小并不是固定的, 其分布在 2.2~99.6 之间^[16], 一般来说熔化物 We 数最小临界值的大小随其粘度的增大而增大。

对于在辅助气体作用下熔化物的去除破碎可以根依据开尔文-亥姆霍兹不稳定理论来解释。开尔文-亥姆霍兹不稳定理论指出两种流体做平行运动, 对于沿流速方向的小扰动, 运动流体是不稳定的。如图 10 所示, 液体受到周围气流的扰动, 表面将产生压力波动。当气动力足够大, 表面波达到临界波长而波幅增加到足够大时, 半个波长或整个波长将会被撕裂下来脱离整个液面, 在表面张力的作用下溶液收缩成液滴^[17]。

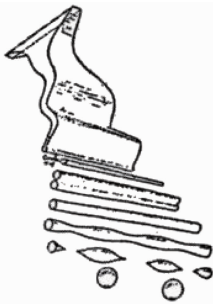


图 10 液体压力波动

Fig. 10 Pressure fluctuation of liquid

液体的粘性是阻碍振幅的因素, 气体速度是促进振幅的因素。激光切割中辅助气压的增大在切口中会有大的流动速度, 熔化物破碎后在表面张力的作用下会迅速凝固, 而形成凝固颗粒。凝固颗粒的平均直径 d_D 大小为^[18]

$$d_D = d \left(\frac{3\pi}{\sqrt{2}} \right) \left(1 + \frac{3\mu_m}{\sqrt{\rho_m d}} \right), \quad (4)$$

式中 d 为熔化物破碎前的熔化物直径, μ_m 为熔化物表面张力, ρ_m 为熔化物的密度。可见, 熔化物量越大, 越容易形成较大颗粒; 表面张力越大, 也越容易形成较大的颗粒, 而表面张力与熔化物温度有着直接的联系。

从试验结果来看, 随气熔比的增大切口挂渣量少且去除熔化物种圆形颗粒所占比例增加。这是因为: 一方面气熔比值的增加导致熔化物的量减少, 熔化物更加容易破碎去除; 另一方面, 气熔比值的增大导致激光切割前沿熔化物温度较大, (3) 式中的 We 数也增大, 而其 We 数临界值较小, 熔化物在辅助气压作用下更容易破碎。两方面导致切口出现少量挂渣, 切割质量较好。同时由于熔化物温度较高, 熔化物冷却速度较慢, 其球化时间长, 更加容易得到圆球形颗粒。而类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒所占比例将会减少。根据(4)式, 气熔比值的增加, 熔化物汇聚后的尺寸 d 降低, 表面张力 μ_m 也在降低, 更容易得到较小尺寸的颗粒。所以, 随气熔比值的增加, 其去除熔化物颗粒特征尺寸也将有减小的趋势。

试验中, 在辅助气压为 0.4 MPa 下, 试验气熔比值越高, 去除熔化物中的圆形颗粒所占比例越大, 且颗粒特征尺寸越小, 其切割质量也越高。同时由去除模型可知, 辅助气压的增大也有利于熔化物破碎去除。为此, 在高气熔比值为 0.6519 时, 试验增大了辅助气压至 0.6 MPa, 得到了达到实际应用的高质量无挂渣切口, 如图 11 所示。试验并试制了缝阵天线薄板样件, 其零件直径为 210.0 mm, 缝隙宽为 0.5 mm, 长度在 4.0 mm 左右, 如图 12 所示。

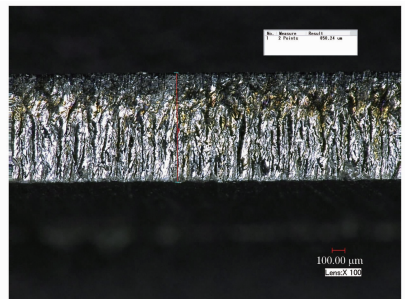


图 11 较高质量切口

Fig. 11 High quality cutting

6 结 论

针对铝合金薄板激光切割去除熔化物, 基于 IPP 图像处理的方法研究了去除熔化物形貌和特征

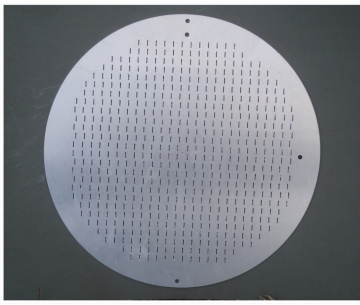


图 12 缝阵天线薄板

Fig. 12 Slot array antenna cutting

参数分布,得到了不同气熔比下熔化物主要去除形式和切口质量,并建立了熔化物去除模型,加深了激光切割材料去除机理,为通过实时监测去除熔化物而在线控制激光切割质量提供了一种方法。研究得到以下结论:

1) 通过 IPP 图像处理技术和判定标准的设定,熔化物颗粒形状主要呈现圆形、类圆形和蝌蚪形。不同气熔比下熔化物颗粒主要为圆形颗粒和蝌蚪形颗粒,而类圆形颗粒基本稳定在 15.00%~20.00% 之间。

2) 随着气熔比的增加,去除熔化物中球形颗粒所占百分比由低气熔比值的 25.93% 增大到高气熔比的 69.28%,而类圆形颗粒和蝌蚪形颗粒所占百分比随气熔比的增大而降低,且各形状颗粒特征尺寸在降低。如随切割气熔比值由 0.1898 增加到 0.6519 时,熔化物圆形颗粒平均直径由 116.36 μm 减小到了 88.96 μm ,类圆形平均直径由 151.79 μm 减小到了 108.93 μm ,蝌蚪形颗粒平均长度由 291.69 μm 减小到了 205.22 μm 。

3) 根据开尔文-亥姆霍兹不稳定理论建立了熔化物去除模型,熔化物的去除跟本身属性和辅助作用力有着直接的关系,而熔化物的去除又决定了切口质量好坏。随气熔比由 0.1898 增至 0.6519,挂渣平均高度由 395 μm 降至 170 μm ,切口质量越来越好,且挂渣量也在减少。试验最终在高气熔比 0.6519 和高辅助气压 0.6 MPa 下得到了无挂渣切口,并试制了缝阵天线薄板样件。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 Wang Yanfei, Wang Xuyue, Kang Renke, *et al.*. Experiments of laser cutting quality based on removal forms for aluminum alloy sheet[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0803007.
王彦飞, 王续跃, 康仁科, 等. 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[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803007.
- 4 Zuo Tiechuan. Advanced Manufacturing in 21st Century: Laser Technology and Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. 133-137.
左铁钊. 21 世纪的先进制造: 激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 133-137.
- 5 Deng Qiansong, Zhao Chenfeng, Chen Liang, *et al.*. Study on reducing apex angle burnt rate during laser cutting based on path transformation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0803006.
邓前松, 赵辰丰, 陈亮, 等. 基于轨迹变换法降低激光切割尖角烧蚀率的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803006.
- 6 Giovanni Tani, Luca Tomesani, Giampaolo Campana, *et al.*. Prediction of melt geometry in laser cutting[J]. Applied Surface Science, 2003, 208-209: 142-147.
- 7 Catherine Wandera. Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel[J]. Journal of Laser Applications, 2010, 22(2): 62-70.
- 8 Andreas Otto, Michael Schmidt. Towards a universal numerical simulation model for laser material processing [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 35-46.
- 9 J Powell, S O Al-Mashikhi, A F H Kaplan, *et al.*. Fiber laser cutting of thin section mild steel: an expansion of the 'striation free' effect[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(8): 1069-1075.
- 10 A Riveiro, F Quintero, F Lusquinos, *et al.*. Study of melt flow dynamics and influence on quality for CO₂ laser fusion cutting[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(13): 135501.
- 11 Koji Hirano, Remy Fabbro. Experimental observation of hydrodynamics of melt layer and striation generation during laser cutting steel[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(10): 105502.
- 12 Gao Shiyu, Ma Lei, Zhan Runsheng. Method of monitoring cutting point state in laser cutting plank process based on vision [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0203007.
高士友, 马雷, 张润生. 基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203007.
- 13 Tan Lixin. Study on the Particle Characterization and Measurement Technology [D]. Changsha: Central South University, 2009. 5-7.
谭立新. 各种粒度表征技术的相关性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. 5-7.
- 14 Wang Wenfeng, Zhu Shuhua, Feng Yihao, *et al.*. Parallel edges detection from remote sensing image using local orientation coding [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315001.
王文锋, 朱书华, 冯以浩, 等. 基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315001.
- 15 Zhang Qiang, Wang Zhenglin. Master MATLAB of Imagine Processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. 329-331.
张强, 王正林. 精通 MATLAB 图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 329-331.
- 16 A Wierzba. Deformation and breakup of liquid drops in a gas stream at nearly critical weber numbers[J]. Exp Fluids, 1990, 9(1-2): 59-64.
- 17 Adel Mansour, Norman Chigier. Air-blast atomization of non-newtonian liquids[J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1995, 58(2): 161-194.
- 18 B S Yilbas, B J Abdul Aleem. Dross formation during laser cutting process[J]. J Physics D: Applied Physics, 2006, 39(7): 1451-1461.