

铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计

张 威 李国柱 王春明 胡席远 闫 飞

华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 铝锂合金是航空航天工业中最理想的轻质高强结构材料,为提高铝锂合金切割质量,采用1 kW 光纤激光器对2 mm 铝锂合金进行切割试验。初步探讨了离焦量、辅助气体压力、激光功率和切割速度对切割质量的影响,深入研究了连续激光模式与脉冲激光模式下的切割质量差异,结果表明脉冲模式下切缝挂渣少、粗糙度小。在此基础上,通过正交试验直观分析、方差分析、信噪比分析对工艺参数进行优化设计,最终获得良好的切割质量:挂渣厚度为0.087 mm,表面粗糙度为4.81 μm 。

关键词 激光技术; 光纤激光切割; 工艺优化; 方差分析; 铝锂合金

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203003

Process Optimization and Design of Fiber Laser Cutting Aluminium-Lithium Alloy

Zhang Wei Li Guozhu Wang Chunming Hu Xiyuan Yan Fei

School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Aluminium-lithium alloy is the ideal material in aerospace industry for its lightweight and high strength. 2 mm aluminium-lithium alloy is used for laser cutting by employing 1 kW fiber laser to improve its cutting quality. The effect of the process parameters on the quality of laser cutting, such as defocus, gas pressure, laser power and cutting speed is studied. Cutting qualities under continuous laser mode and pulsed laser mode are compared. The results reveal that pulsed laser mode can achieve a better cutting quality. Optimization of technological parameters is performed by using the visual analysis of orthogonal experiment, the analysis of variance and the analysis of signal to noise ratio. Finally, the good quality with 0.087 mm slag thickness and 4.81 μm surface roughness can be obtained.

Key words laser technology; fiber laser cutting; process optimization; analysis of variance; aluminium-lithium alloy

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 160.3900

1 引 言

铝锂合金作为一种性能优越的新型铝合金材料,是近年来航空金属材料中发展最为迅速的一个领域。铝锂合金具有低密度、高弹性模量、高比强度及比刚度等特点,用其替代常规铝合金,可使构件质量减轻10%~25%,刚度提高15%~20%^[1]。

激光切割速度快、切口宽度窄、适用范围广^[2],对实现航空航天结构件的高质量高精度高稳定性的制造,加快我国自行研制飞行器的进程等具有重要意义。尤其是光纤激光切割系统,激光波长1.07 μm ,仅为CO₂激光波长的1/10,能量更易被金属材料吸收,同时光束质量好、运行成本低、免维护、加工柔性高、不存在外光路、抗震性好、光电转换效率高(大于25%)^[3],这些都是传统CO₂激光切割系统所无法企及的。但铝合金热

收稿日期: 2014-08-05; 收到修改稿日期: 2014-09-12

基金项目: 航空科学基金(20115479006)、牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1303)

作者简介: 张 威(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光切割方面的研究。E-mail: zw735476262@163.com

导师简介: 王春明(1975—),男,教授,博士,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: cmwang@hust.edu.cn(通信联系人)

导率高,氧化物黏性高,具有高反特性,存在切割效率低,挂渣厚,切割质量差等问题^[4]。尽管光纤激光切割技术具有显著优势,但将其应用于航空飞行器构件的切割尚不成熟,尤其是切割铝锂合金这一新型材料,在国内外还鲜有报道。

本文采用 1 kW 光纤激光器进行铝锂合金切割试验,研究了工艺参数、激光模式对切割质量的影响,并用数理统计方法对切割工艺进行优化设计,最终获得了良好的切割质量。

2 试验材料及设备

试验材料为 2198 铝锂合金,试样尺寸为 300 mm×100 mm×2 mm,其化学成分如表 1 所示。

表 1 2198 铝锂合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2198 aluminium-lithium alloy

Chemical element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
Mass fraction /%	0.08	0.10	2.9~3.5	0.50	0.25~0.8	0.05
Chemical element	Ti	Ag	Li	Zr	Zn	Al
Mass fraction /%	0.10	0.10~0.50	0.8~1.1	0.04~0.18	0.35	surplus

本试验采用 RFL-1000 型光纤激光器,Cyolite 型光纤激光切割头。切缝宽度 K_w 的测量采用 PXS5-T 体视显微镜;表面粗糙度 R_a 的测量仪器为 BY-1 型便携式粗糙度测量仪;挂渣厚度 S 用精度 0.02 mm 的游标卡尺进行测量。

3 连续光纤激光切割试验

3.1 试验方法

试验中喷嘴直径为 1.4 mm,喷嘴工件距离为 1 mm,既能保证气流的流速和密度,又无明显的反弹效应^[5]。通过一系列单因素试验探究离焦量 Δf 、辅助气体压力 p 、激光功率 P 与切割速度 v 对切割质量的影响,试验参数如表 2 所示。

表 2 连续激光切割工艺参数

Table 2 Process variables of continuous laser cutting

Factor	Numerical value
P/W	800, 1000
$v/(m/min)$	0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5
$\Delta f/mm$	-2, -1.5, -1, -0.5, 0, +1
p/MPa	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2

3.2 试验结果与分析

3.2.1 离焦量对切割质量的影响

切割铝合金时常将焦点设定在工件表面以下,以扩大切口宽度,达到增加辅助气体流动的目的。

试验中只改变离焦量,结果如图 1 所示。零离焦时,能量最为集中,切缝宽度最窄,焦点位于工件下表面时切缝宽度最大。由于辅助气体压力不变,吹除熔渣的能力相同,故表面粗糙度在切缝较宽时较小,切缝窄时较大。挂渣是熔化产物没有完全从切缝中去除而形成的。气体的动力学理论指出,要得到没有挂渣的切割质量的条件是最大出口动量推力(马赫数)要与出口的压力相等^[6]。该试验中,由于速度、气压恒定,故出口的气体压力与割缝宽度相关联,由图 1 可看出挂渣厚度与切缝宽度的变化趋势一致。综合考虑切缝宽度、挂渣厚度、表面粗糙度 3 个指标,可得出本实验中离焦量取 -1.5 mm 为宜。

3.2.2 辅助气体压力对切割质量的影响

试验中仅改变辅助气体压力,结果如图 2 所示。表面粗糙度随气压增加呈先减小再增大的规律,分析认为气压影响着切割过程的除渣能力,同时会冷却带走热量。激光功率和切割速度保持不变,切缝各处熔融物的量基本不变。气压小于 1.6 MPa 时,气压加大更显著体现为除渣能力的加强,切缝侧面的残留物减少,表面粗糙度小。气压超过 1.6 MPa,气压加大更多体现为冷却作用的增强,导致切割不稳定,粗糙度增大。

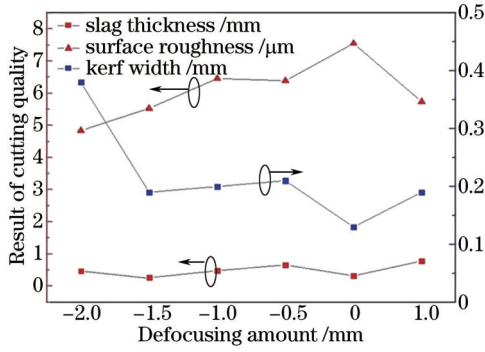


图1 不同离焦量下的切割质量($P=1000\text{ W}$, $v=1.2\text{ m/min}$, $p=1.4\text{ MPa}$)

Fig.1 Cutting qualities under different focus positions ($P=1000\text{ W}$, $v=1.2\text{ m/min}$, $p=1.4\text{ MPa}$)

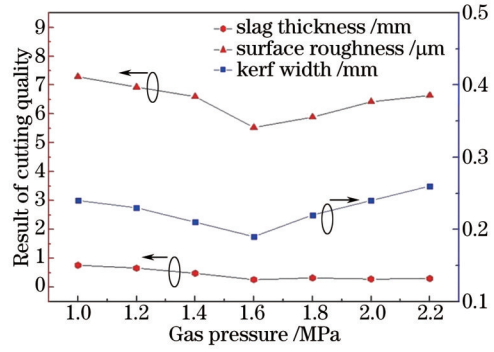


图2 不同气压下的切割质量($P=1000\text{ W}$, $v=1.2\text{ m/min}$, $\Delta f=-1.5\text{ mm}$)

Fig.2 Cutting qualities under different gas pressures ($P=1000\text{ W}$, $v=1.2\text{ m/min}$, $\Delta f=-1.5\text{ mm}$)

试验中,气压低于1.6 MPa时,随着气压的增大,挂渣厚度减小。但气压继续增大挂渣厚度几乎无变化,分析认为气压较高时在喷嘴前方的工件表面上存在一个密度梯度场,导致场内折射率改变,干扰光束能量的聚焦,造成光束再聚焦或发散^[7],使切割过程不稳定,熔渣量增多,同时冷却作用更显著,这些负面因素与高气压的强除渣能力共同作用,致使挂渣厚度无明显变化。

3.2.3 激光功率和切割速度对切割质量的影响

激光功率与光斑面积决定功率密度大小,线能量的大小由激光功率与切割速度决定,试验中光斑面积一定,故将激光功率与切割速度二者组合起来分析,试验结果如表3所示。

表3 不同激光功率和切割速度下的切割质量($\Delta f=-1.5\text{ mm}$, $p=1.6\text{ MPa}$)

Table 3 Cutting qualities under different laser powers and cutting speeds ($\Delta f=-1.5\text{ mm}$, $p=1.6\text{ MPa}$)

Sample number	Power / W	Cutting speed / (m/min)	Line energy / (J/mm)	Energy density / (10^6 W/cm^2)	Slag thickness / mm	Kerf width / mm	Surface roughness / μm
14#	1000	1.5	40	1.41		Not cutting through	
15#	1000	1.2	50	1.41	0.34	0.26	5.75
2#	1000	1.0	60	1.41	0.26	0.27	5.63
16#	1000	0.8	75	1.41	0.40	0.30	5.60
17#	800	0.8	60	1.12		Not cutting through	
18#	800	0.6	80	1.12		Not cutting through	

由表3得挂渣厚度在 $v=1.0\text{ m/min}$ 时最小。分析认为 $v=0.8\text{ m/min}$ 时,线能量增加,熔化量增加,材料单位面积受到气体吹除作用也更强,但此时熔化量增多因素更为显著,故挂渣厚度较大;同理, $v=1.2\text{ m/min}$ 时,材料单位面积受气体吹除作用减弱这一因素更为显著,挂渣厚度也较大。

14#试样线能量低不能被切透,18#试样线能量最高,但仍不能切透,由此说明线能量、功率密度均对材料能否切透有着决定性影响。

3.3 连续光纤激光切割的最佳工艺

根据上述试验得连续激光模式下切割的最优工艺参数为: $P=1000\text{ W}$; $v=1\text{ m/min}$; $p=1.6\text{ MPa}$; $\Delta f=-1.5\text{ mm}$ 。试样切割后的宏观形貌如图3所示,测得 $S_t=0.26\text{ mm}$, $K_w=0.27\text{ mm}$, $R_a=5.63\ \mu\text{m}$ 。

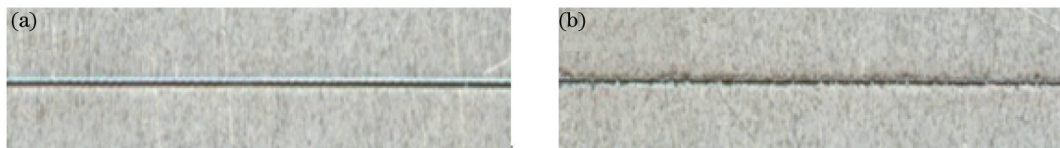


图3 2#试样切割后的宏观形貌。(a) 正面;(b) 背面

Fig.3 Macro appearance of 2# after laser cutting. (a) Front; (b) back

4 脉冲光纤激光切割试验

4.1 试验方法

脉冲激光切割时,材料表面因脉冲光能的作用发生气化或离子化,对激光的吸收率提高^[8],同时平均功率较低,切口质量得到提高。

根据连续激光模式的切割试验,确定 $P=1000\text{ W}$, $\Delta f=-1.5\text{ mm}$,着重研究切割速度、脉冲频率、占空比、辅助气体压力对切割质量的影响,做四因素四水平正交试验,试验根据五因素四水平正交表 $L_{16}(4^5)$ 进行,工艺参数如表 4 所示。

表 4 正交试验的工艺参数

Table 4 Technological parameters of orthogonal experiment

Symbol	Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A	Cutting speed / m/min	0.6	0.8	1.0	1.2
B	Pulse frequency /Hz	50	100	150	200
C	Duty-cycle /%	80	85	90	95
D	Gas pressure /MPa	1.2	1.4	1.6	1.8

4.2 试验结果

依据正交表 $L_{16}(4^5)$ 进行了 16 组试验,测量切割后试样的挂渣厚度 S_t 、表面粗糙度 R_a 、切缝宽度 K_w ,每组数据测量三次,其中 y_1, y_2, y_3 为质量评价指标的 3 次测量值试验结果,如表 5 所示。

表 5 正交试验结果

Table 5 Results of orthogonal experiment

Orthogonal test No. (ABCD)	Slag thickness / μm				Surface roughness / μm				Kerf width / μm			
	y_1	y_2	y_3	Average	y_1	y_2	y_3	Average	y_1	y_2	y_3	Average
1.(1111)	480	500	500	493	5.01	6.93	6.36	6.10	209	214	199	207.3
2.(1222)	200	260	300	253	4.7	5.58	5.39	5.22	204	201	206	203.7
3.(1333)	100	80	120	100	4.72	5.9	5.49	5.37	226	221	216	221.0
4.(1444)	100	140	160	133	6.23	6.2	5.67	6.03	211	228	202	213.7
5.(2123)	340	280	360	327	5.5	6.7	7.36	6.52	214	194	202	203.3
6.(2214)	180	220	260	220	6.21	5.84	6.07	6.04	206	194	197	199.0
7.(2341)	480	560	520	520	5.43	4.82	5.53	5.26	226	238	233	232.3
8.(2432)	320	300	320	313	4.88	6.1	5.93	5.64	211	209	204	208.0
9.(3134)	180	200	280	220	5.68	7.35	7.59	6.87	216	219	221	218.7
10.(3243)	380	300	280	320	5.07	5.97	6.98	6.01	228	231	224	227.7
11.(3312)	180	200	180	187	6.35	7.43	6.11	6.63	211	204	197	204.0
12.(3421)	360	400	420	393	4.77	5.16	5.39	5.11	197	197	206	200.0
13.(4142)	280	360	300	313	6.81	5.75	7.35	6.64	189	204	209	200.7
14.(4231)	500	540	460	500	7.77	6.56	6.94	7.09	219	206	219	214.7
15.(4324)	160	200	180	180	6.56	6.93	7.22	6.90	214	206	199	206.3
16.(4413)	200	200	220	207	4.67	4.96	6.66	5.43	224	214	214	217.3

由表 5 易见,正交试验中挂渣厚度最大值 $S_{t\max}=520\ \mu\text{m}$,挂渣厚度最小值 $S_{t\min}=133\ \mu\text{m}$;表面粗糙度最大与最小值相差 $1.98\ \mu\text{m}$;而切缝宽度均较窄符合质量要求。故本文着重研究工艺参数的变化对挂渣厚度和表面粗糙度的影响。

4.3 工艺参数优化设计

4.3.1 正交试验的直观分析

在正交试验的 16 组试验中,因素 A(速度)取水平 1 ($v=0.6\text{ m/min}$) 的共有 4 组试验,将这 4 次试验的挂渣厚度累加得统计量 K_{1A} ,同理将各因素在各水平下的试验结果叠加,结果如表 6 所示。

表6 正交试验的直观分析表

Table 6 Visual analysis of the orthogonal experimental results

Target	Statistical magnitude	Factor			
		Cutting speed / (m/min)	Pulse frequency /Hz	Duty-cycle /%	Gas pressure /MPa
Slag thickness / μm	K_1	242.5	337.5	275	477.5
	K_2	345	322.5	290	265
	K_3	282.5	247.5	282.5	237.5
	K_4	297.5	260	320	187.5
	R	102.5	90	45	290
Surface roughness / μm	K_1	22.72	26.13	24.2	23.56
	K_2	23.46	24.36	23.75	24.13
	K_3	24.62	24.16	24.97	23.33
	K_4	26.06	22.21	23.94	25.84
	R	3.34	3.92	1.22	2.51

表6中 R 为极差,为同一因素在不同水平下的 K_i 值中最大与最小值之差。 R 值描述了分散程度的大小, R 值越大,表明该因素对指标的影响大;反之, R 值小表明该因素对指标的影响小。从表6易见,对指标挂渣厚度,影响因素由主到次依次为气压、切割速度、频率、占空比;对指标表面粗糙度,影响因素由主到次为频率、切割速度、气压、占空比。为直观起见,作出因素水平与质量评价指标折线图,如图4所示。

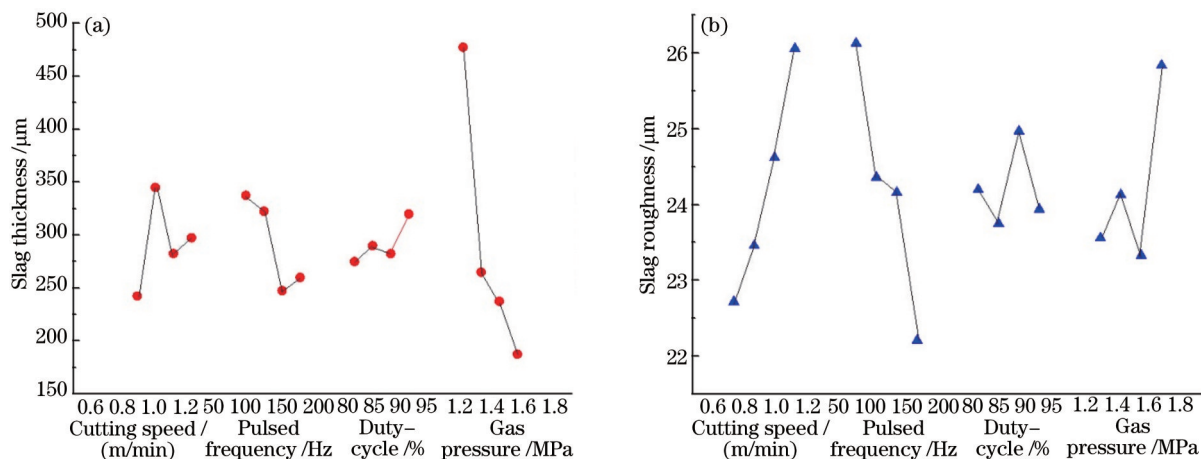


图4 因素水平与指标关系图。(a) 指标为挂渣厚度;(b) 指标为表面粗糙度

Fig.4 Relationship between factor level and target. (a) Indicator for slag thickness; (b) indicator for the surface roughness

根据图4可初步选出优化水平组合。仅考虑指标挂渣厚度时的最优水平为 $A_1B_3C_1D_4$;考虑指标表面粗糙度时的最优水平为 $A_1B_4C_2D_3$ 。

按照直观分析的预测进行试验,工艺参数为 $A_1B_3C_1D_4$ (切割速度0.6 m/min,频率150 Hz,占空比80%,气压1.8 MPa)时 $S_t=0.147$ mm, $R_a=5.94$ μm ,切割质量不及正交试验中3#试样,说明挂渣厚度受因素间的交互作用更为显著,仅通过直观分析不能有效进行工艺优化。

再按照工艺参数 $A_1B_4C_2D_3$ (切割速度0.6 m/min,频率200 Hz,占空比85%,辅助气体压力1.6 MPa)进行试验,测得 $S_t=0.153$ mm, $R_a=4.75$ μm ,表面粗糙度优于正交试验中最小值5.11 μm ,说明对指标表面粗糙度的直观分析符合实际,能有效地指导试验。但此时仅优化了表面粗糙度,挂渣厚度并未得到改善。

4.3.2 正交试验方差分析

直观分析法简单明了,但不能把试验中由于因素改变引起的数据波动同试验误差引起的数据波动区别开来,不能提供一个标准用来判断考察因素对指标的影响是否显著^[9]。而方差分析则把数据总的波动分成两部分,一部分反映因素水平变化引起的波动;另一部分反映试验误差引起的波动,用方差齐性检验法(F检

验法)进行显著性检验,能实现定量分析判断。

首先对指标挂渣厚度进行方差分析,按照方差分析法依次计算修正项、总偏差平方、总自由度统计量:

$$C_T = \frac{\left(\sum_{i=1}^{16} Y_i\right)^2}{n}, \quad (1)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^{16} Y_i^2 - C_T, \quad (2)$$

$$f_T = n - 1, \quad (3)$$

式中 Y_i 为正交试验中每组试验挂渣厚度的均值, n 为正交试验的组数。

因素 A(速度)的偏差平方和 S_A 、均方差 V_A 及自由度 f_A 可表示为

$$S_A = \frac{n}{n_A} [K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 + K_4^2] - C_T, \quad (4)$$

$$V_A = S_A / f_A, \quad (5)$$

$$f_A = n_A - 1, \quad (6)$$

式中 n_A 为因素 A 的水平数。同理计算因素 B、C、D 的相关统计量。最后按(7)式得出误差的偏差平方 S_e 为

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D). \quad (7)$$

方差分析结果如表 7 所示,得出在 $\alpha=0.10$ 的显著水平下,因素 D(气压)与 B(频率)对挂渣厚度有显著影响,表中 F, F_α, α 为数理统计中 F 分布常用的符号, α 为显著性水平, F_α 为查 F 分布表后得出的数值, e 表示误差。这与直观分析的结论大致相同,气压对挂渣厚度具有决定性影响。按照同样的方法对指标表面粗糙度进行方差分析,结果如表 8 所示。

表 7 指标挂渣厚度的方差分析表

Table 7 Analysis of variance of target slag thickness

Soruce of variance	S	f	V	F	F_α
Cutting speed /(m/min)	21518.75	3	7172.92	3.077	
Pulse frequency /Hz	24018.75	3	8006.25	3.434	
Duty-cycle /%	4668.75	3	1556.25		$F_{0.10}(3,6)=3.29$
Gas pressure /MPa	196118.75	3	65372.92	28.042	
Error e' (C,e)	13987.5	6	2331.25		

表 8 指标表面粗糙度的方差分析表

Table 8 Analysis of variance of target surface roughness

Soruce of variance	S	f	V	F	F_α
Cutting speed /(m/min)	1.593	3	0.531	1.553	
Pulse frequency /Hz	1.928	3	0.643	1.880	
Duty-cycle /%	0.216	3	0.072		$F_{0.25}(3,9)=1.63$
Gas pressure /MPa	0.965	3	0.322		
Error e' (C,D,e)	3.077	9	0.342		

在 $\alpha=0.25$ 的显著水平下,仅有因素 B(频率)对表面粗糙度有显著影响,这与之前直观分析的结果相吻合,验证了对指标表面粗糙度,频率为最显著的影响因素。频率过低时光斑重叠率低,导致切割过程不稳定,粗糙度增加;频率过高,热积累效应显著,切缝宽度增大。

4.3.3 信噪比法寻求最佳工艺

信噪比(SNR)不仅考虑了平均值与误差的效应,还考虑了平均值的误差,从而提高了判断精度,把它与正交实验设计结合起来,能解决许多不同特性值的综合功能评价问题^[10]。

L_{ij} 能体现目标特征的真实值与每次试验中测量值的偏差,即^[11]

$$L_{ij} = \frac{1}{3} [y_1^2 + y_2^2 + y_3^2], \quad (8)$$

式中 y_1, y_2, y_3 为质量评价指标的3次测量值; i 取值1、2,表征质量评价指标, j 取值范围从1~16代表试验序号。为同时优化多个切割质量评价指标,须算出整体信噪比取代每个指标单独的信噪比。计算整体信噪比 T_{MSNR} 需先计算标准值质量损失 T_{NQL} 和总的标准质量损失 T_{TNQL} , 三者的计算式分别为^[12]

$$T_{\text{NQL}} = \frac{L_{ij}}{L_i^*}, \tag{9}$$

$$T_{\text{TNQL}} = \sum_{i=1}^2 W_i L_{ij}, \tag{10}$$

$$T_{\text{MSNR}} = -10 \lg(T_{\text{TNQL}}), \tag{11}$$

式中 L_i^* 为 L_i 的最大值, W_i 表征第 i 个指标在整体切割质量中的重要程度。由于挂渣厚度更为分散,表面粗糙度相对比较稳定,故对 S_i 取 $W_1=0.6$, 对 R_a 取 $W_2=0.4$ 。各统计量的计算结果如表9所示。

表9 信噪比分析中各统计量的计算结果

Table 9 Results of statistical magnitude in signal to noise ratio analysis

Experimental run	L_{ij}		T_{NQL}		T_{TNQL}	T_{MSNR}
	S_i	R_a	S_i	R_a		
1	243466.7	37.86	0.90	0.75	0.838	0.77
2	65866.67	27.43	0.24	0.54	0.363	4.40
3	10266.67	29.08	0.04	0.58	0.253	5.97
4	18400	36.47	0.07	0.72	0.329	4.82
5	107866.7	43.10	0.40	0.85	0.580	2.37
6	49466.67	36.50	0.18	0.72	0.398	4.00
7	271466.7	27.77	1.00	0.55	0.820	0.86
8	98266.67	32.06	0.36	0.63	0.471	3.27
9	50266.67	47.96	0.19	0.95	0.491	3.09
10	104266.7	36.69	0.38	0.73	0.521	2.83
11	34933.33	44.29	0.13	0.88	0.428	3.69
12	155333.3	26.14	0.57	0.52	0.550	2.59
13	99333.33	44.49	0.37	0.88	0.572	2.43
14	251066.7	50.52	0.92	1.00	0.955	0.20
15	32666.67	47.73	0.12	0.94	0.450	3.47
16	42800	30.26	0.16	0.60	0.334	4.76

将分贝数 T_{MSNR} 作为每组实验的最终结果 Y_i , 按之前方差直观分析方法, 计算出各个因素在不同水平下的试验结果之和, 得到表10。

表10 各因素不同水平下的信噪比值

Table 10 Effect of input process parameter levels on T_{MSNR}

Factor	SNR			
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Cutting speed	3.992*	2.624	3.051	2.714
Pulse frequency	2.164	2.859	3.497*	3.862
Duty-cycle	3.303*	3.208	3.133	2.736
Gas pressure	1.106	3.447	3.983*	3.845

质量评价指标 S_i 及 R_a 越小越好, 应选择不同水平中分贝值最大的为最优水平(即表中带星号的水平), 优化的工艺参数为 $A_1B_3C_1D_3$ 。在该工艺条件(切割速度 0.6 m/min, 频率 150 Hz, 占空比 80%, 辅助气体压力 1.6 MPa)下得到的切割试样宏观形貌如图5所示, 测得 $S_i=0.087$ mm, $R_a=4.81$ μm , 均优于正交试验中 $S_{i\text{min}} = 0.1$ mm, 表面粗糙度最小值 $R_{a\text{min}} = 5.11$ μm , 说明经信噪比法优化后的工艺能显著改善切割质量。

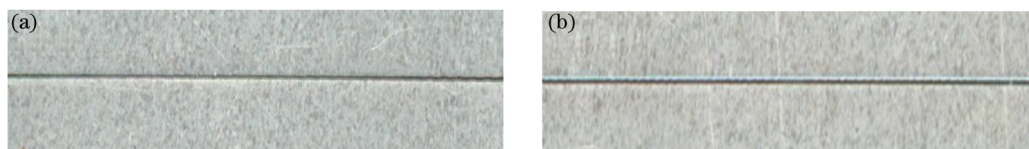


图5 切缝宏观形貌。(a)正面;(b)背面

Fig.5 Macro appearance of sample after parameter optimization. (a) Front; (b) back

5 结 论

1) 光纤激光切割2 mm铝锂合金薄板时,离焦量取-1.5 mm为宜,离焦量太小导致切缝宽度增大,离焦量过大又使挂渣厚度太大。辅助气体压力最佳值为1.6 MPa,气压太低时对熔渣的吹除力不够,气压过大会造成光束的再次聚焦或发散,同时冷却作用太强,导致挂渣厚度大。

2) 铝锂合金热导率大,对激光反射率高,致使起切较困难,必须线能量和功率密度均突破阈值才能顺利起切并切透工件。对于2 mm厚的2198铝锂合金,线能量不得低于40 J/mm,能量密度不得低于 1.12×10^6 W/cm²。

3) 铝锂合金在脉冲激光模式下的切割质量较连续模式更好。本试验中脉冲模式下的最优工艺参数为激光功率为1000 W,切割速度为0.6 m/min,频率为150 Hz,占空比为80%,辅助气体压力为1.6 MPa,此时 $S_1=0.087$ mm, $R_a=4.81$ μm。

参 考 文 献

- Zhang Yunlong, Tao Wang, Chen Yanbin, *et al.*. Shaping control of welds for fiber laser welding T-section of fuselage panels[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203006.
张涇龙,陶汪,陈彦宾,等. 光纤激光焊接机身壁板T型结构焊缝成形控制[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203006.
- Hirano K, Fabbro R. Experimental observation of hydrodynamics of melt layer and striation generation during laser cutting of steel [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 555-564.
- Xu Guojian, Li Xiang, Hang Zhengxiang, *et al.*. Laser welding of high strength steel using fiber laser and CO₂ laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031403.
徐国建,李响,杭争翔,等. 光纤激光及CO₂激光焊接高强钢[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031403.
- Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603004.
陈聪,高明,顾云泽,等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- Xu Guojian, Li Hongli, Hang Zhengxiang, *et al.*. Performance of 6 mm mild steel sheet laser cutting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040601.
徐国建,李宏利,杭争翔,等. 6 mm碳钢板的激光切割性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040601.
- Li Yajiang. Cutting Technology and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 112-115.
李亚江. 切割技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 112-115.
- Liu Shunhong. Laser Manufacturing Technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011. 198-199.
刘顺洪. 激光制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011. 198-199.
- Li Yang, Hu Shengsun, Shen Junqi. Microstructural characteristics and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded copper and 316L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703008.
李扬,胡绳荪,申俊琦. 紫铜与316L不锈钢脉冲激光焊微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703008.
- Luan Jun. The Techniques and Methods of Test Design[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1987. 50-58.
栾军. 试验设计的技术与方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987. 50-58.
- Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava. Robust parameter design and multi-objective optimization of laser beam cutting for aluminium alloy sheet[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(3-4): 268-277.
- Amit Sharma, Vinod Yadava. Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd: YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(1): 159-168.
- A Stournaras, P. Stavropoulos, K. Salonitis, *et al.*. An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2009, 2(1): 61-69.

栏目编辑: 王晓琰