

光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究

陈 聪¹ 高 明¹ 顾云泽¹ 王 磊¹ 杨欢庆² 曾晓雁¹

(¹ 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)
² 西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘要 为了探究光纤激光切割铝合金的工艺特性,开展了光纤激光切割 2 mm 厚度 AA6061 铝合金工艺实验,系统研究了激光功率、切割速度、辅助气压等工艺参数对切割质量的影响规律。在优化工艺参数条件下可以获得根部挂渣小于 0.1 mm、切面粗糙度小于 3 μm ,且拼合后无肉眼可见间隙的切缝。当激光功率为 3.0 kW 时,光纤激光获得优质切缝的切割速度可达 9 m/min。结果表明,增大激光功率至 3.0 kW,提高切割速度至 6 m/min,升高喷嘴间距至 0.5 mm 或增加辅助气压至 1.1 MPa 后,挂渣量降至 0.1 mm 以下,最小为 20 μm 。当切缝表面粗糙度通常约为 3 μm ,可得到的最小热影响区宽度为 10 μm 。最后,基于线性回归法建立的数学模型,模型预测值和实测值吻合良好。

关键词 激光技术; 激光切割; 铝合金; 切割质量; 线性回归分析; 数学模型

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0603004

Study on Fiber Laser Cutting of Aluminum Alloy Sheet

Chen Cong¹ Gao Ming¹ Gu Yunze¹ Wang Lei¹ Yang Huanqing² Zeng Xiaoyan¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
² Xi'an Aerospace Engine Factory, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract To exploring fiber laser cutting of aluminum, fiber laser cutting of AA6061 Al alloy with the thickness of 2 mm is carried out. The effects of welding parameters such as laser power, cutting speed and the pressure of assisting gas on the quality of the kerf are investigated. The results show that accepted kerf can be obtained under appropriate parameters. The accepted kerf with the dross height less than 0.1 mm, the surface roughness less than 3 μm , and no megascopic gap as the kerfs are matched. It is found that when the laser power is 3.0 kW, the cutting speed of fiber laser that obtains accpeted kerf can be up to 9 m/min, which is two times than that of CO₂ slab laser with the same laser power. Moreover, by increasing laser power to 3.0 kW, enhancing cutting speed rate to 6 m/min, raising stand-off to 0.5 mm, or increasing the pressure of assisting gas to 1.1 MPa, the dross height of the kerf is reduced to less than 0.1 mm. The minimum dross height is only 20 μm . The results show that the surface roughness is around 3 μm , and the minimum width of heat affected zone is 10 μm . Finally, a model is established by linear regression, whose estimated value agrees with experimental data well.

Key words laser technique; laser cutting; aluminum alloy; cutting quality; linear regression; mathematical model

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 160.3900

1 引 言

因为高切割速率、良好的质量和强大的柔性加工能力,激光切割逐渐成为现代制造高质量自动化加工的主要切割技术,大量应用于钢结构制造中^[1]。

但是对于工业应用同样广泛的铝合金而言,激光切割还面临一系列技术难题。首先,铝合金对激光束,尤其是 CO₂ 激光束的高反射率大幅度降低了材料对激光束的吸收,使切口位置难以瞬间熔化形成,这

收稿日期: 2013-11-13; 收到修改稿日期: 2013-12-25

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2013ZX04001101)

作者简介: 陈 聪(1990—),男,博士研究生,主要从事激光切割和焊接等方面的研究。E-mail: 809431165@qq.com

导师简介: 高 明(1975—),男,研究员,主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: mgao@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

一因素减低了切割效率,同时影响了工艺和切缝质量的稳定性^[2]。其次,铝合金热导率较高,切割速率的降低导致切缝热影响区过宽,降低了切割质量^[3]。铝合金的强氧化性使熔化金属容易被氧化。铝氧化物的高黏性会阻碍熔融金属脱离切缝,增加切缝挂渣倾向^[4]。另外,铝合金的高反特性会将激光束反射回光学镜片和传输光纤,容易对光学系统或激光器造成损坏^[5]。

目前,铝合金激光切割研究更多地集中于高功率 CO₂ 激光器。Stournaras 等^[6]利用 CO₂ 激光开展了 5083 铝合金切割研究,发现激光功率和切割速度是影响热影响区宽度最重要的因素,并利用回归分析方法建立了脉冲 CO₂ 激光切割铝合金数学模型。Riveiro 等^[7]在 2024-T3 铝合金 CO₂ 激光切割研究中发现连续激光的切割质量要优于脉冲激光。王伟超等^[8]在脉冲 CO₂ 激光 2A12 铝合金切割中发现切缝表面容易形成微裂纹、易氧化,而且速度偏低。与此同时,少量研究采用 Nd:YAG 固体激光开展了铝合金激光切割研究,取得了更为理想的实验结果。比如葛亚琼等^[9]在 Nd:YAG 激光 5A06 铝合金切割研究中发现切缝宽度窄,切面波纹浅,没有明显的热影响区。相对来说,短波长的固体激光能够提高铝合金对激光能量的吸收率,从而获得更好的切割质量和生产效率。

光纤激光器是近十年发展起来的新型高功率工业固体激光器,具有光束质量好、光电转换效率高的一系列优点。为此,系统研究了光纤激光切割 AA6061 铝合金的工艺特性,并采用回归分析法对实验结果进行了统计分析。

2 实验方法

实验设备为 IPG YLR-6000 型连续光纤激光器,最大输出功率为 6 kW,激光束波长为 1070 nm,传输光纤芯径为 200 μm,光束参数积(BPP)为

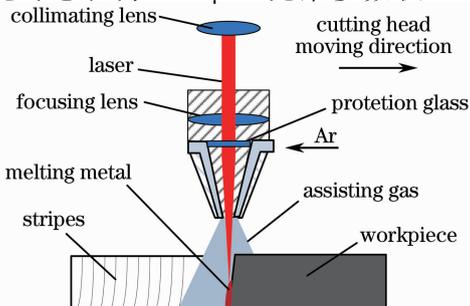


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

6.9 mm×mrad。激光切割头为 Precitec YK52 型,透镜式聚焦,准直焦距为 125 mm,聚焦焦距为 120 mm,聚焦光斑直径为 0.2 mm。实验材料采用厚度为 2 mm 的 AA6061-T6 铝合金板材。实验装置如图 1 所示。高压辅助气体采用同轴吹气方式,所用气体为纯度(体积分数)99.999%的氩气,切割喷嘴出口直径为 1.5 mm。切割工艺参数如表 1 所示。所有切割均采用单向直线切割方式进行,切割长度为 300 mm。

表 1 激光切割工艺参数

Table 1 Processing parameters for laser cutting

Cutting parameter	Value
Laser power, P /kW	2.5, 2.7, 3.0, 3.5, 4.0
Cutting speed, v /(m/min)	4, 5, 6, 7, 8, 9
Stand-off, Δ /mm	0.3, 0.5, 1, 1.5, 2
Assisting gas pressure, F /10 ⁵ Pa	5, 7, 9, 11

实验完成后,采用体式显微镜对切缝表面和切面形貌进行测量。采用英国泰勒 Talysurf-5 表面粗糙度测量仪按照标准 ISO4288:1996 测量切缝表面粗糙度。由于工件较薄,测量位置为切面中间部位。挂渣量采用游标卡尺测量,以切缝根部的挂渣高度来表征;每条切缝选取挂渣程度最明显的 3 个位置进行测量,结果取平均值。按照标准试样制作切面金相试样,采用体积比为 1% HF 溶液腐蚀试样,然后在金相显微镜和电子显微镜(SEM)下观察热影响区(HAZ)形貌并测定其宽度。

3 结果和讨论

3.1 切缝形貌特征

如图 2(a)所示,在优化的工艺参数下,铝合金光纤激光切割工艺可以得到理想的切缝:300 mm

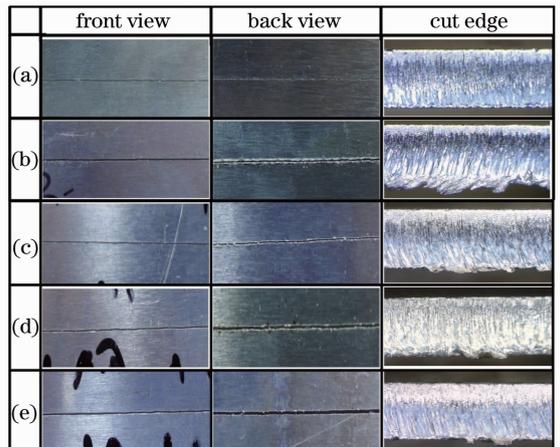


图 2 典型切缝的表面形貌特征

Fig. 2 Surfacermorphologies of typical kerfs

长切缝拼合后无肉眼可见间隙,表面和背面几乎无挂渣,切面条纹细小平整,无明显的重熔层出现。但是,当工艺参数不当时,如图 2(b)~(e)所示,图中各参数分别为:(a) $P=3.5\text{ kW}$, $v=9\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$; (b) $P=3.5\text{ kW}$, $v=9\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=0.5\text{ MPa}$; (c) $P=2.5\text{ kW}$, $v=9\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$; (d) $P=3.5\text{ kW}$, $v=9\text{ m/min}$, $\Delta=0.5\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$; (e) $P=3.5\text{ kW}$, $v=5\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$,切口拼合后有明显间隙,切缝根部有较多挂渣,且切面粗糙,重熔层明显。图 3 为典型切割的热影响区,其中 $P=2.7\text{ kW}$, $v=9\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$,可以看出从表面到切缝根部,热影响区逐渐变宽。在切割过程中,切割辅助气体流

速沿板厚方向逐渐减小,冷却作用逐渐减弱,热积累逐渐增强,从而造成这一现象。实验还发现,当激光功率为 3.0 kW 时,光纤激光获得优质切缝的切割速度可达 9 m/min ,而同等激光功率下, CO_2 板条激光切割铝合金的速度仅为 4 m/min ^[7]。比较而言,光纤激光切割铝合金的效率更高,切割速度是 CO_2 板条激光的 2 倍。

3.2 工艺参数对挂渣量的影响

如图 4 所示,当增大激光功率至 3.0 kW 、提高切割速度至 6 m/min 、升高喷嘴和工件之间的间距(喷嘴间距)至 0.5 mm 或增加辅助气压至 1.1 MPa 时,挂渣量能够降至 0.1 mm 以下。在工艺参数为 $P=3.5\text{ kW}$, $v=9.0\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$ 时,所得切缝的挂渣量最小,为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

增大激光功率有利于升高切割前沿的温度,降低熔化金属的粘性摩擦力^[7],使熔化金属能够更容易被高速气流排除,从而减少切缝挂渣量。当功率超过 3.5 kW 后,材料会因为热输入过大而过熔。从而,在辅助气流排渣能力一定的情况下,熔融金属量的增加使挂渣量有增加的趋势,如图 4(a) 所示。在激光功率固定的情况下,提高切割速度有利于降低热输入,减少熔融金属或熔渣总量,从而降低挂渣量。当切割速度增加至 6 m/min 后,这种作用减弱。此时,如图 4(b) 所示,切割速度每增大

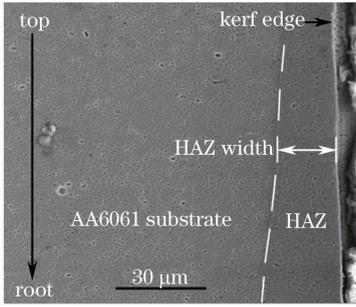


图 3 切缝热影响区扫描电镜图

Fig. 3 SEM image of HAZ across kerf cross-section

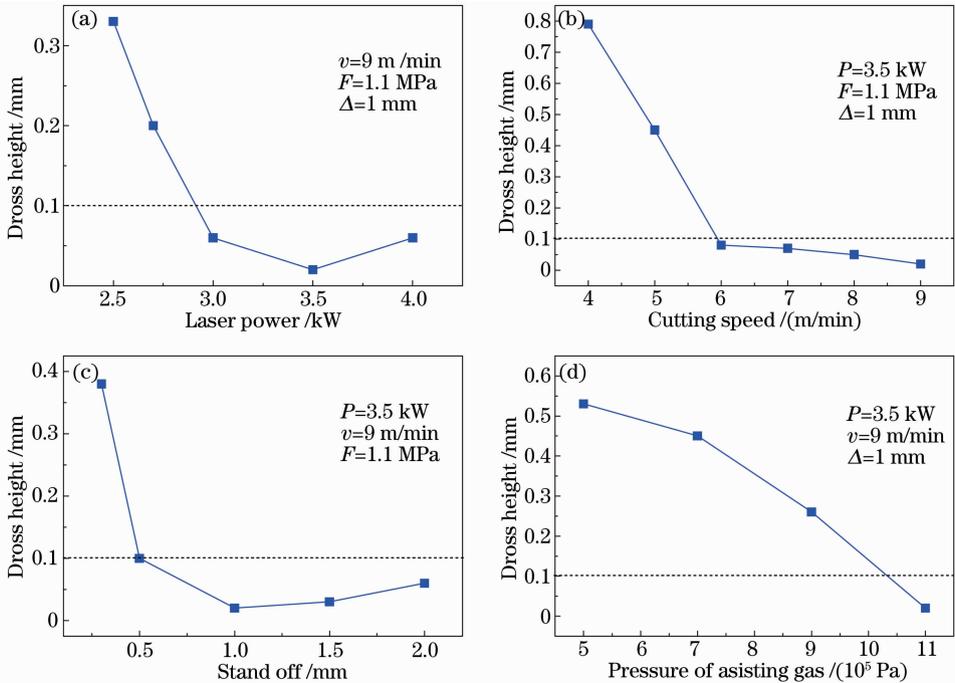


图 4 工艺参数对切缝根部挂渣高度的影响。(a) 激光功率;(b) 切割速度;(c) 喷嘴离工件表面距离;(d) 辅助气压

Fig. 4 Influence of cutting parameters on dross height of kerf root. (a) Laser power; (b) cutting speed;

(c) stand-off; (d) pressure of assisting gas

1 m/min, 挂渣量仅有约 0.02 mm 的减少。如图 4(c) 所示, 当喷嘴间距从 0.3 mm 增加到 1 mm 时, 气流到达工件表面后的反弹效应逐渐减弱, 减少了辅助气体的紊流倾向, 从而提高了气流排渣能力, 并减少挂渣量。随着喷嘴间距的继续增大, 达到材料表面的气流流速和密度会因为距离增加而减弱, 反而减弱了辅助气流的排渣能力。因此挂渣量在此阶段有增加的趋势^[10]。因为增加辅助气流气压直接增强了熔渣排除能力, 挂渣量随气压增加而逐渐减少。

3.3 工艺参数对粗糙度的影响

如图 5 所示, 激光切割切缝的表面粗糙度较低。

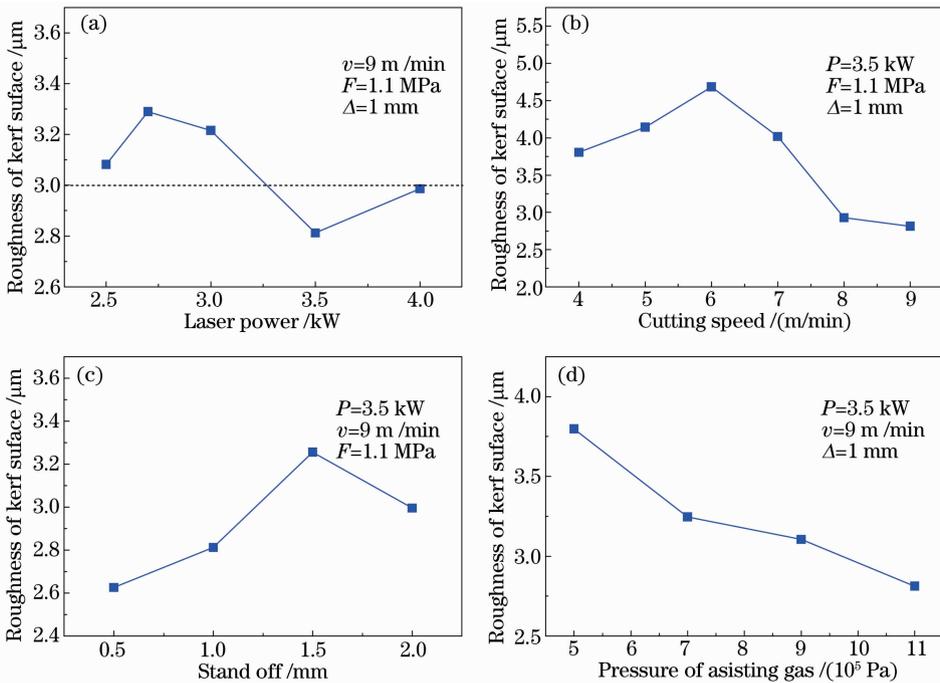


图 5 工艺参数对切面粗糙度的影响。(a) 激光功率; (b) 切割速度; (c) 喷嘴离工件表面距离; (d) 辅助气压
Fig. 5 Influence of cutting parameters on roughness of kerf surface. (a) Laser power; (b) cutting speed; (c) stand-off; (d) pressure of assisting gas

如前所述, 增大激光功率有利于升高切割前沿的温度, 降低熔化金属的粘性摩擦力, 有利于减少切缝截面熔化金属量, 降低粗糙度。但功率大于 3.5 kW 后, 金属熔化量会因为热输入的增加而增加, 此时过量的熔化金属会使粗糙度值升高。在激光功率足够高和气流排渣能力一定的情况下, 切割速度的增加有利于减少熔融金属或熔渣的数量, 从而提高切割速度, 也有利于降低切缝粗糙度^[11]。降低喷嘴间距等同于提高工件表面辅助气流的压力, 从而其效果和增加辅助气流一样, 都能够通过提高辅助气流排渣能力来减少附着在切缝表面的熔渣数量, 降低粗糙度。

在本实验条件下, 最高不超过 5 μm , 通常在 3 μm 左右波动。当工艺参数为 $P=3.5\text{ kW}$, $v=6\text{ m/min}$, $\Delta=1\text{ mm}$, $F=1.1\text{ MPa}$ 时, 切缝粗糙度最大, 为 4.685 μm 。在喷嘴间距为 0.5 mm 时, 可得到最小的切缝粗糙度, 为 2.626 μm 。当激光功率增大至 3.5 kW, 切割速度增大至 8 m/min, 喷嘴间距小于 1.0 mm, 以及辅助气压大于 1 MPa 时, 粗糙度有减小至 3 μm 以下的趋势。辅助气压对切缝表面粗糙度的影响最有规律: 气压每增加 2 MPa, 粗糙度减小约 9%。

3.4 工艺参数对热影响区宽度的影响

如图 6 所示, 切缝热影响区宽度随工艺参数变化在 20~60 μm 范围内波动。降低激光功率或者增加切割速度都有利于切缝热影响区宽度的减少。其次, 喷嘴间距为 1.5 mm 时, 可得到最小的热影响区宽度, 约为 10 μm 。当辅助气压小于 0.9 MPa 时, 热影响区宽度在 25 μm 左右波动; 但是, 当辅助气压高于 0.9 MPa 后, 热影响区有快速增宽的趋势。

显然, 降低激光功率或增大切割速度都能够通过减小热输入来降低热影响区宽度^[12]。增大喷嘴间距能够减弱气流到达工件表面后的反弹效应, 从而增强辅助气体的冷却作用。与此同时, 增大喷嘴

间距会减弱达到工件表面的气流强度,降低了气流对工件的冷却作用。这两种效应的相互作用使得在本实验条件下,喷嘴间距为 1.5 mm 时,辅助气体对切缝的冷却效果最佳,并得到最小的热影响宽度。通常情况下,增加辅助气压会增强气流的冷却作用,

从而减小热影响区宽度。但葛亚琼等^[13]发现当辅助气压过高时,气流中会卷入部分空气与液态切面反应并形成热传导率较高的氧化铝,从而增宽切缝热影响区。这也是导致辅助气流大于 0.9 MPa 后,热影响区宽度增加的主要原因。

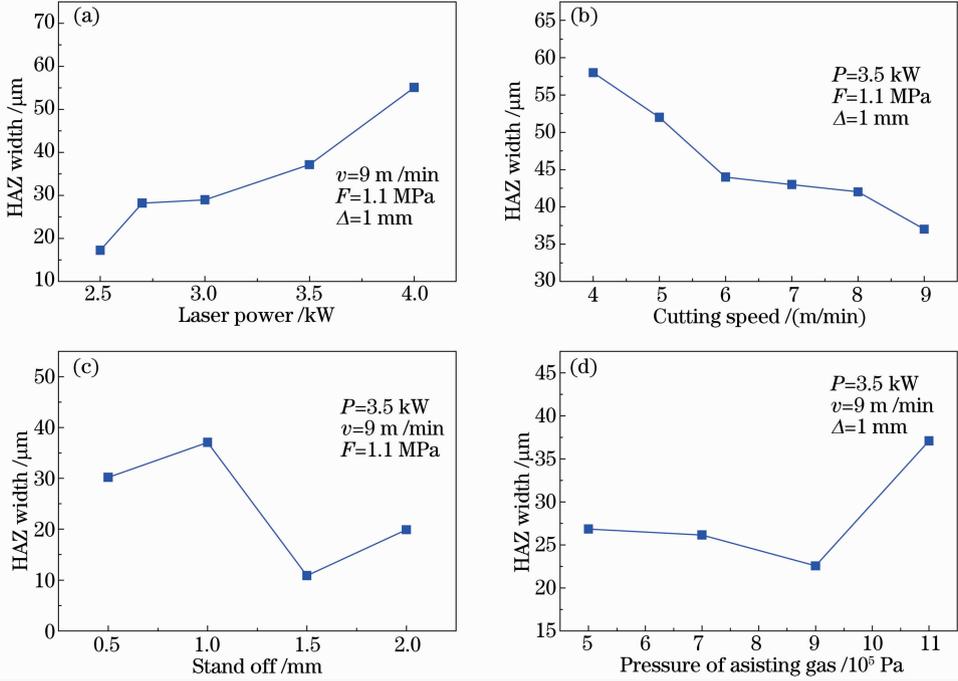


图 6 工艺参数对热影响宽度的影响。(a) 激光功率; (b) 切割速度; (c) 喷嘴离工件表面距离; (d) 辅助气压
Fig. 6 Influence of cutting parameters on kerf HAZ width. (a) Laser power; (b) cutting speed; (c) stand-off; (d) pressure of assisting gas

3.5 线性回归分析

为了确定各工艺参数对切缝质量的定量影响规律,根据上述实验结果,采用回归分析法建立了以下

$$Y_j = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + a_7x_1x_4 + a_8x_2x_3 + a_9x_2x_4 + a_{10}x_3x_4, \quad (1)$$

式中 $Y_j (j = 1, 2, 3)$ 为切割质量参数, Y_1 为挂渣量, Y_2 为粗糙度, Y_3 为热影响区宽度, a_i 为回归方程系数, x_1 为激光功率值, x_2 为切割速度, x_3 为喷嘴和工件表面的距离, x_4 为辅助气压。在模型建立过程中,将实验数据分为两组,一组用于训练切割质量数学模型,一组用来检验切割质量数学模型。表 2 为训练数据表。模型训练及验证方法为:首先将训练数据表中的工艺参数及其对应的切缝质量参数(挂渣量、粗糙度和热影响区宽度)代入 Matlab 软件进行计算,得到如表 3 所示的切缝质量回归方程系数值;随后,将检测数据(图 7)中的工艺参数代入所得公式得出切缝质量理论预测值;最后,基于预测值和实测值计算拟合度指标 R 来判定模型优劣。 R 的计算公式为

激光切割质量数学模型。该模型充分考虑了工艺参数的交互影响,数学表达式为

表 2 切割质量模型训练数据表

Table 2 Training data table of model on cutting quality

Number	Welding parameter			
	P /kW	v / (m/min)	Δ /mm	F / 10^5 Pa
1	2.5	9	1	11
2	3.0	9	1	11
3	3.5	9	1	11
4	4.0	9	1	11
5	3.5	4	1	11
6	3.5	5	1	11
7	3.5	6	1	11
8	3.5	8	1	11
9	3.5	9	0.3	11
10	3.5	9	0.5	11
11	3.5	9	2	11
12	3.5	9	1	5
13	3.5	9	1	9

$$R = 1 - [\sum (y - y^*)^2 / \sum y^2]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\sum (y - y^*)^2$ 是残差平方和, y 是实测值, y^* 是预测值, R 的取值范围为 $[0, 1]$ 。 R 值越接近 1, 模型拟合度越好。

表 3 回归方程系数表

Table 3 Coefficient table of regression equation

Coefficient	Dross height	Roughness	Width of heat affected zone
a_0	0	0	0
a_1	0	0	0
a_2	0	0	0
a_3	0	0	0
a_4	0.2338	0.9417	3.7382
a_5	0.0290	0.1403	0.6394
a_6	0	0	0
a_7	-0.0385	-0.1290	0.9557
a_8	0	0	0
a_9	-0.0180	-0.0697	-0.6951
a_{10}	-0.0125	0.0044	0.1121

图 7 为线性回归模型预测值和实测值分布图。在大部分情况下, 预测值与实测值吻合良好。图 7 中部分数据, 如图 7(a) 中 4 号试样和图 7(c) 中的 3 号和 6 号试样存在预算值和实测值相差较大的情况。这是因为所采用测试试样相对较薄, 部分试样的测试值和实测值存在一定的测量误差, 并最终造成上述情况。利用(2)式计算得到切缝挂渣量、粗糙度和热影响区宽度的拟合度分别为 0.696、0.874、0.635。切缝表面粗糙度的拟合度最高, 挂渣量和热影响区宽度的拟合度相对较低。分析认为挂渣量和热影响宽度在实际测量中存在的误差, 以及相对较少的训练数据可能是造成两者拟合度较低的主要原因。尽管上述数学模型存在一定的偏差, 但是整体上看, 该模型能够较好地预测各质量参量的变化规律, 对工业应用中工艺参数的选取有一定的指导意义。

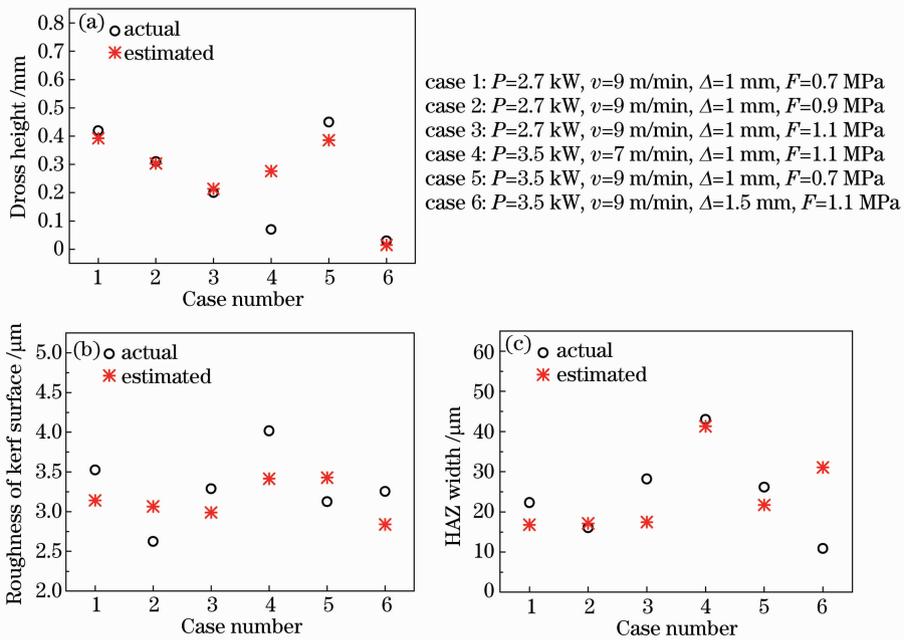


图 7 线性回归模型预测值与实测值对比关系图。(a) 挂渣量; (b) 粗糙度; (c) 热影响区宽度

Fig. 7 Contrasting of actual and estimated values. (a) Dross height; (b) roughness; (c) HAZ width

4 结 论

1) 开展了 AA6061-T6 铝合金薄板光纤激光切割工艺研究, 得到了激光功率、切割速度、辅助气压等工艺参数对切缝质量的影响规律。当激光功率为 3.0 kW 时, 光纤激光获得优质切缝的切割速度可达 9 m/min。在优化工艺参数条件下可以获得根部挂渣小于 0.1 mm、切面粗糙度小于 $3 \mu\text{m}$, 拼合后无肉眼可见间隙的切缝。

2) 增大激光功率至 3.0 kW, 提高切割速度至 6 m/min、升高喷嘴间距至 0.5 mm 或增加辅助气压至 1.1 MPa 以上时, 挂渣量能够降至 0.1 mm 以下, 最小为 $20 \mu\text{m}$ 。

3) 切缝表面粗糙度不超过 $5 \mu\text{m}$, 通常在 $3 \mu\text{m}$ 左右。当激光功率增大至 3.5 kW, 切割速度增大至 8 m/min, 喷嘴间距小于 1.0 mm, 辅助气压大于 1 MPa 时, 粗糙度减小至 $3 \mu\text{m}$ 以下。

4) 大部分切缝热影响区宽度在 20~60 μm 范

围内波动。降低激光功率或者增加切割速度都能够减小切缝热影响区宽度。当喷嘴间距为 1.5 mm 时,可得到最小热影响区宽度,数值为 10 μm 。

5) 基于线性回归方法建立了数学模型。模型预测值与实测值在一定范围内吻合良好。切缝挂渣量、粗糙度和热影响区宽度的拟合度分别为 0.696、0.874、0.635。该模型对铝合金光纤激光切割的工艺参数选取有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 N Rajaram, J Sheikh-Ahmad, S H Cheraghi, *et al.*. CO₂ laser cut quality of 4130 steel[J]. *Int J Mach Tools Manufact*, 2003, 43(4): 351-358.
- 2 A Riveiro, F Quintero, F Lusquiños, *et al.*. The role of the assist gas nature in laser cutting of aluminum alloys[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 548-554.
- 3 B S Yilbas. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156: 2106-2115.
- 4 H G Salem, M S Mansour, Y Badr, *et al.*. CW Nd:YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheets using O₂ assist gas [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 196(1): 64-72.
- 5 A F M Arif, B S Yilbas. Thermal stress developed during the laser cutting process: consideration of different materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 37(7-8): 698-704.
- 6 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.
- 7 A Riveiro, F Quintero, F Lusquinos, *et al.*. Parametric

- investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(9): 1138-1152.
- 8 Wu Weichao, Wang Yongjun, Zhang Xinjuan, *et al.*. Laser cutting heat affected zone and the impact analysis of 2A12 aluminum alloy[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2010, 9: 91-97.
武伟超,王永军,张新娟, 2A12 铝合金激光切割热影响区及其影响分析[J]. *航空制造技术*, 2010, 9: 91-97.
- 9 Ge Yaqiong, Wang Wenxian, Cui Zeqin, *et al.*. Laser cutting of aluminum alloy by pulse Nd:YAG laser and contrast test[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.
- 10 Wang Yanfei, Wang Xuyue, Kang Renke, *et al.*. Experimental study on laser cutting based on removal forms for aluminum alloy sheet[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0803007.
王炎飞,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.
- 11 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.
- 12 Mei Lifang, Chen Genyu, Liu Xufei, *et al.*. Three dimensional laser cutting technology in auto body panel[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3308-3312.
梅丽芳,陈根余,刘旭飞,等. 车身覆盖件的三维激光切割工艺 [J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3308-3312.
- 13 Ge Yaqiong, Wang Wenxian, Cui Zeqin, *et al.*. The influence of assist gas in Nd:YAG laser cutting of 5A06 aluminum alloy[J]. *Applied of Laser*, 2008, 28(5): 358-394.
葛亚琼,王文先,崔泽琴,等. 辅助气体对 5A06 铝合金 Nd:YAG 激光切割质量影响 [J]. *应用激光*, 2008, 28(5): 358-394.

栏目编辑:宋梅梅