

激光切割 AZ31B 镁铝合金正交实验研究

王洪建^{1,2*}, 李永亮¹, 李平^{1,2}

¹重庆工商大学制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;

²重庆工商大学国家智能制造服务国际科技合作基地, 重庆 400067

摘要 利用热力学方程进行了激光切割 AZ31B 镁铝合金的仿真实验。激光切割速度为 $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 试样具有较好的切割质量。开展了光纤激光切割 1.0 mm 厚 AZ31B 镁铝合金的工艺实验, 获得了激光功率、切割速度、离焦量对激光切割质量影响的单因素实验数据, 并提出了三因素正交实验方案。1.0 mm 厚 AZ31B 镁铝合金激光切割的优化工艺参数为: 激光功率 120 W, 切割速度 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, 离焦量 1.2 mm, 与理论计算值基本一致。

关键词 激光技术; 激光切割; 正交实验; 热力学方程; 切割质量

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101405

Orthogonal Experiment on Laser Cutting of AZ31B Magnesium Aluminum Alloys

Wang Hongjian^{1,2*}, Li Yongliang¹, Li Ping^{1,2}

¹Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control,
Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

²National Research Base of Intelligent Manufacturing Service, Chongqing Technology and Business University,
Chongqing 400067, China

Abstract The simulation experiment on the laser cutting of the AZ31B magnesium aluminum alloys is conducted based on the thermodynamic equations and it is found that the cutting quality of samples is better when the laser cutting speed is $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. The process experiment on the laser cutting of the 1.0-mm-thick AZ31B magnesium aluminum alloys is carried out and the single-factor experimental data related to the effects of laser power, cutting speed and defocusing is obtained. The scheme of three-factor orthogonal experiment is also proposed. The optimum process parameters for a laser cutting of the 1.0-mm-thick AZ31B magnesium aluminum alloys are a laser power of 120 W, a cutting speed of $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, and a defocusing of 1.2 mm, which are basically consistent with the theoretical calculation values.

Key words laser technique; laser cutting; orthogonal experiment; thermodynamic equation; cutting quality

OCIS codes 140.3390; 350.4600

1 引言

激光加工具有非接触加工, 无机械磨损, 局部加热, 热影响区域小等特点, 特别适用于金属板材加工。镁铝合金具有密度小、强度高、刚度高和易于机械加工等优点, 主要应用于航空航天、通讯、交通等领域。激光切割仿真实验主要采用物理数学模型分

析法和数值分析法等进行研究^[1-8], 通过有限元软件构建激光切割物理场域模型, 或通过实验数据测量、数值分析等构建数学模型的方式进行切割工艺的研究^[9-13]。关于激光切割工艺的研究主要聚焦于新型光纤^[14]、固体脉冲激光切割镁铝合金工艺的影响因素^[15]。镁铝合金的激光加工技术具有广阔的应用前景^[16], 与其他金属激光切削参数对切割工艺的影

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-05-01; 录用日期: 2018-05-22

基金项目: 重庆市教育自然科学基金项目(KJ1600633)、重庆工商大学科研平台项目(KFJJ2016031, KFJJ2017052, KFJJ2017053)

* E-mail: whj_cqu@163.com

响存在相似处^[17-19],即可通过研究光纤激光器切割的流体动力学分析激光切割工艺过程及影响因素^[20]。Manjoth等^[21]研究了 Al7075-TiB₂ 合金激光切割的参数优化;Srinivasan等^[22]研究了 CO₂ 激光切割不锈钢的表面粗糙度优化方法;Madić等^[23]优化了激光束切割不锈钢 316L 的方法并研究了辅助气体 CO₂ 激光切割的优化方法;Chen等^[24]研究了 CO₂ 激光切割过程优化算法。

镁铝合金对激光具有高反射率、低吸收率等特点,影响了镁铝合金精密激光切割加工的工业生产应用。本文利用热力学方程对激光切割镁铝合金的温度场域进行了有限元仿真,确定了激光加工的主要优化参数;采用光纤激光切割了 1.0 mm 厚的 AZ31B 镁铝合金,获得了激光功率、切割速度、离焦量三因素对激光切割质量影响的单因素实验数据;最后利用回归方程,分析了各因素对镁铝合金切割的主要效应图,建立了三因素正交实验方案,该研究为镁铝合金的精密激光加工提供了实验依据。

2 基本原理及仿真

2.1 热力学方程

镁铝合金的低电阻率和高热导率导致镁铝合金的激光加工存在一定的困难^[16]。当高功率激光光斑作用于镁铝合金时,镁铝合金体内产生温差,热量从物体的高温部分传向低温部分。热量传递过程分为稳态传热过程和瞬态传热过程^[25],而激光切割属于瞬态传热过程,激光切割温度场有限元数值分析属于非线性瞬态热分析。

热分析遵从热力学第一定律,在一个较短的时间内激光切割的能量关系为

$$E_0 = E_a + E_r E_t, \quad (1)$$

式中 E_0 为激光入射到材料表面的能量; E_r 为材料表面反射的能量; E_t 为透过材料的能量; E_a 为材料吸收的能量,其与材料的电阻率和激光频率相关^[16],满足

$$E_a = 0.365 \sqrt{rf/v}, \quad (2)$$

式中 r 为镁铝合金的电阻率; f 为入射激光的频率; v 为激光光速。

有限元分析的基本单元是一个微元体,将(1)式应用于微元体上,得到热传导方程的一般形式为

$$\rho C_t \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z), \quad (3)$$

式中 ρ 为材料的密度; C_t 为材料随时间变化的比热; T 为激光光斑辐照处材料表面的温度; λ_t 为导热系数; Q 为单位空间所产生的热量,当热源为表面热源时, $Q=0$ 。若某时刻 λ_t 为一个常数,则热传导方程表示为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{Q}{\lambda} = \nabla^2 T, \quad (4)$$

式中材料随时间变化的热扩散率 $\alpha_t = \lambda_t / \rho c$,其中 c 为比热容; ∇^2 为拉普拉斯算符。热物理性参数随温度变化不大的材料在一定条件下可以利用平均值进行热传导方程求解。激光加工的温度场是遵守热传导方程的,常见的温度场求解法包括有限差分法、有限元法等^[21]。

2.2 激光切割镁铝合金温度场仿真

激光切割镁铝合金时,材料在高功率密度激光光斑作用下被迅速加热到极高的温度,而 AZ31B 镁铝合金的熔点为 650 °C,高温下镁铝合金会发生熔化乃至气化现象。AZ31B 镁铝合金比热容随温度的变化如图 1 所示。潜热是物质相变过程中吸收或者释放的热量,激光切割中有固态相变潜热和熔化相变潜热,由于固态相变潜热比熔化相变潜热小得多,因此,一般不考虑固态相变潜热。相变潜热会对温度场分析造成影响,故相变分析必须要考虑潜热的影响,在 ANSYS 软件中,定义材料在不同温度下的热焓来处理相变潜热^[26]。热焓 H 是密度与比热的乘积对温度的积分,根据(3)式可得

$$H = \int \rho c(T) dT, \quad (5)$$

式中 $c(T)$ 为比热容。

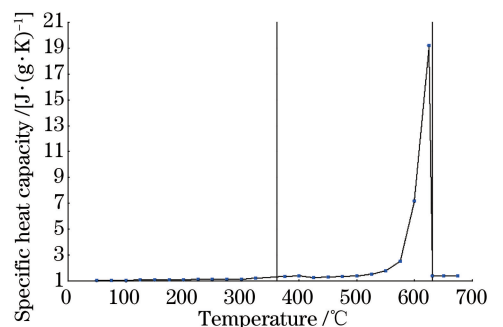


图 1 AZ31B 镁铝合金比热容随温度的变化

Fig. 1 Specific heat capacity of AZ31B magnesium aluminum alloy versus temperature

在 ANSYS 软件中,激光切割时热流密度近似高斯分布,采用高斯热源模型作为激光切割温度场有限元模拟的热源,高斯热源的表达式为

$$q_r = q_m \times \exp(-3r^2 / r_h), \quad (6)$$

式中 q_r 为距离热源中心 r 处的热流密度; q_m 为热流密度; r_h 为加热斑点半径。热流密度为

$$q_m = (3 \times k \times p) / (\pi \times r_h), \quad (7)$$

式中 k 为激光热效率; p 为激光功率。激光功率越大时, 光斑越小, 热流密度越大, 而激光功率密度和作用时间决定了单位面积上耦合给工件的能量大小, 同时局部加热区域小, 工件热影响区域小。通过仿真实验得到, 当激光功率为 200 W, 光斑半径为 1 mm 时, 大于 650 °C 的熔点区域较小; 当切割速度为 8 mm · s⁻¹ 时, 可以得到较好切割质量的试样。崔泽琴^[27] 利用 Nd: YAG 脉冲激光切割

4 mm 厚的 AZ31B 镁铝合金, 切割速度为 2.5 mm · s⁻¹。

不同时间仿真得到的瞬时路径温度变化如图 2、3 所示。可以看出, 两个时间下试样尾部的温度扩散明显。10 s 时, 选定的路径上激光光斑中心及材料的温度分布如同彗星一般, 激光光斑中心拖着长长的尾巴, 影响到距激光光斑中心约为 33 mm 处。20 s 时, 温度大于 500 °C 的区域的直径约为 8 mm, 而在距离激光光斑中心约 30 mm 处的温度只有约 280 °C, 远小于光斑中心的 1380.57 °C。

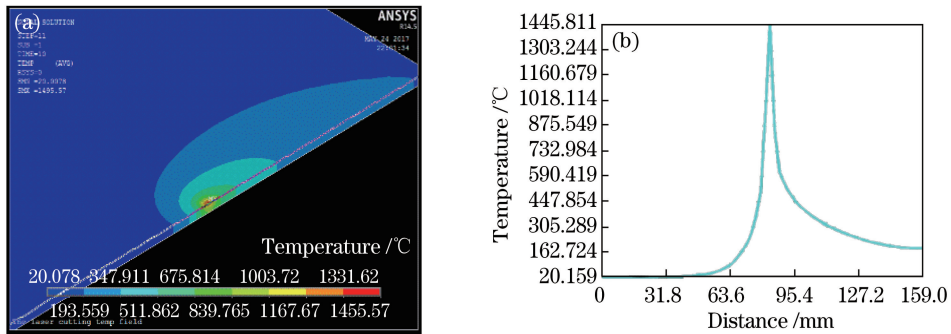


图 2 10 s 时的仿真。(a) 选定的路径; (b) 沿路径温度变化

Fig. 2 Simulation results at $t=10$ s. (a) Selected path; (b) temperature change along path

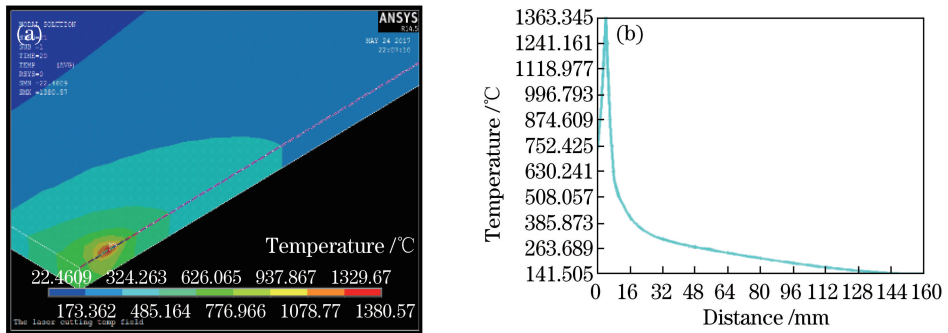


图 3 20 s 时的仿真。(a) 选定的路径; (b) 沿路径温度变化

Fig. 3 Simulation results at $t=20$ s. (a) Selected path; (b) temperature change along path

3 激光切割实验方法

3.1 材料选择

选择厚度为 1.0 mm 的 AZ31B 镁铝合金作为实验材料, 其具有细化晶粒, 焊接性能优良^[16] 等特性, 化学成分见表 1。AZ31B 镁铝合金的抗拉强度为 290 MPa, 晶粒度为 8 ~ 15 μm, 热导率为

155 W · m⁻¹ · K⁻¹, 熔点为 650 °C。使用深圳正天激光设备有限公司生产的 ZT-J-55M 型光纤连续性激光切割机进行切割, 其光电转换效率达到 30% 以上, 激光波长为 1070 nm, 激光输出最大平均功率为 500 W, 辅助气体为 O₂ 和 N₂。通过改变激光功率、离焦量、切割速度等参数, 分析工艺参数对切割面粗糙度、挂渣的影响规律。

表 1 AZ31B 镁铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium aluminum alloy (mass fraction, %)

Element	Mg	Al	Si	Ca	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni
Content	Bal.	2.3-3.5	0.08	0.04	0.6-1.4	0.2-1.0	0.003	0.01	0.001

3.2 辅助气体对切割质量的影响

不同辅助气体下激光切割的效果如图 4 所示。可以看出,当辅助气体为 O_2 时,试样的切面粗糙,表面氧化严重,没有形成规律的切割波纹,分布着大小不同的氧化镁颗粒,这是因为镁合金材料的化学性质活泼,极易氧化。当辅助气体为 N_2 时,试样的切割质量较好,断面呈亮白色,切割面平整光滑且切割波纹间距小,条纹呈熔融金属流态状,挂渣长度几乎为零,这是因为 N_2 的化学性质不活泼,与金属镁一般不发生反应。然而,当 N_2 气压不足时,试样中也会产生粗糙的切面,如图 4 最下面两片试样。基于 N_2 的激光切割 AZ31B 镁铝合金的切割数据

见表 2。

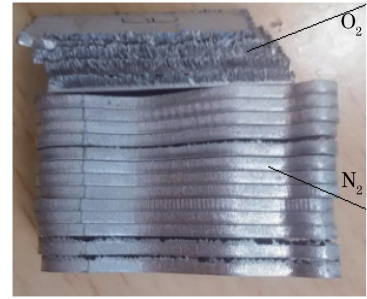


图 4 不同辅助气体下激光切割效果对比

Fig. 4 Laser cutting effect comparison under different auxiliary gases

表 2 N_2 下激光切割 AZ31B 镁铝合金的切割数据

Table 2 Cutting data on laser cutting of AZ31B magnesium aluminum alloy under N_2

Sample No.	Defocusing /mm	Laser power /W	Cutting speed /($m \cdot min^{-1}$)	Roughness / μm	Dross length /mm
1	1.0	150	0.5	30.05	0
2	1.0	150	0.7	38.31	0
3	1.0	150	1.0	28.22	0
4	1.0	150	1.2	35.58	0
5	1.0	150	1.4	33.09	0
6	1.0	100	1.4	39.01	0
7	1.0	125	1.4	34.28	0
8	1.0	150	1.4	31.90	0
9	0	150	1.4	34.39	0.42
10	0.5	150	1.4	29.52	0.36
11	1.5	150	1.4	33.37	0.04
12	2	150	1.4	39.64	0.18

3.3 切割速度和离焦量对切割质量的影响

N_2 下切割 AZ31B 镁铝合金的测量结果见表 3。可以看出,随着切割速度的增大,切割试样切面的粗糙度先增大后减小,挂渣长度几乎为零。由表 2 中的 9~12 号切割试样可以看出,当离焦量为 0~1.5 mm 时,切割试样切面的挂渣长度逐渐减小后增大,粗糙度先减小后增大。当激光的离焦量增大,激光聚焦能力降低,挂渣长度增大。

表 3 N_2 下切割镁合金的测量结果

Table 3 Measurement results for cutting of magnesium alloy assisted under N_2

Cutting speed / ($m \cdot min^{-1}$)	0.5	0.7	1.0	1.2	1.4
Roughness / μm	30.04	38.31	28.22	35.58	33.09
Dross length /mm	—	—	—	—	—

3.4 切缝断面形貌分析

利用日本日立公司生产的 Su1510 型扫描电镜对激光镁合金断面进行扫描,不同激光功率下

AZ31B 镁铝合金的切面形貌如图 5 所示。由图 5 (a)、(b)可以看出,A 区域放大后切面的表面存在较为规则的波纹,波纹间隔约为 $30 \mu m$ 。在连续光纤激光的作用下,熔化和燃烧速度小于切割速度,熔化和燃烧产物间歇性被辅助气体带走,因而在切面的表面留下波纹。也有可能熔化液体动态波动会导致液体层温度和厚度的变化,熔化液体层的振动速度大于辅助气体从切缝吹走的速度。然而,崔泽琴^[27]认为脉冲激光的间隔、辅助气体反应等是切面存在波纹的主要原因。实验结果表明,间歇的波纹也可能与光纤激光振镜控制步进电机及同轴辅助送气系统相关。同时可以看出,波纹上分布着不均匀的杂质,颗粒大小为 $5 \sim 30 \mu m$,这些颗粒可能是熔化液体未被辅助气体吹走而粘附在断面上。由图 5 (c)可以看出,切面上仅仅存在宏观波纹,未发现表面的颗粒物。

激光切割镁铝合金在厚度方向上存在四个不同特征的区域,第一个区域的表面重熔层厚度约为

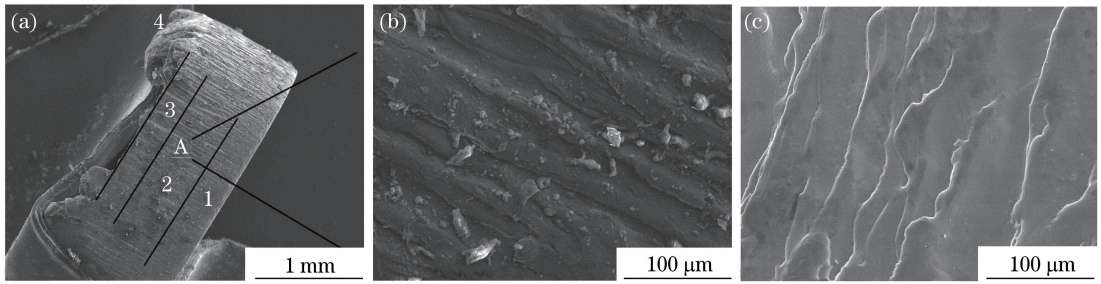


图5 不同激光功率下 AZ31B 镁铝合金切面的形貌。(a) 120 W;(b) 120 W,局部放大;(c) 300 W

Fig. 5 Cutting surface morphologies of AZ31B magnesium aluminum alloy under different laser powers.

(a) 120 W; (b) 120 W, enlarged partial view; (c) 300 W

200 μm ,该区域激光热吸收和热扩散大,因而切割前沿熔融层影响不大,波纹较为平直、间距较小,保留了高能激光光束气化镁合金的痕迹。第二个区域的表面重熔层厚度为 600~700 μm ,该区域热含量多、熔流多,激光能量的减小使得镁铝合金熔化并随切割辅助气流排出,波纹开始合并。第三个区域的表面重熔层存在较明显的沟壑,厚度约为 100 μm ,该区域熔流层多,受气压影响较大,气压减小或气流不畅通时,熔化金属不能完全排出,底部甚

至会形成挂渣^[27]。第四个区域是挂渣层,分布不均匀,中间部分有少量挂渣,上下切割弯曲部分的挂渣明显,长度为 20~30 μm ,辅助气体沿切缝的作用使挂渣的弯曲方向背向断面向内。

4 三因素正交实验方案设计

正交实验法在水平较少的情况下具有较高的效率,可以快速找出各相关因素的影响程度^[28]。

正交实验方案设计的计算结果见表 4。

表 4 正交实验方案设计的计算结果

Table 4 Calculation results based on design of orthogonal experiment

No.	Laser power /W	Cutting speed /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Defocusing /mm	Roughness/ μm	Dross length /mm
1	100	0.4	1.0	67.95	0.90
2	100	0.5	1.2	62.24	0.66
3	100	0.6	1.5	55.97	0.54
4	120	0.4	1.2	65.71	0.64
5	120	0.5	1.5	60.15	0.76
6	120	0.6	1.0	67.63	0.74
7	150	0.4	1.0	41.44	1.24
8	150	0.5	1.5	54.93	0.86
9	150	0.6	1.2	53.51	0.70

4.1 实验结果分析

通过方差分析表分析评估回归的显著性。方差分析的主效应,两因子交互作用以及三因子交互作用对应的概率值均为 0.000,远小于模型既定的显著性水平 0.05,可以认为回归总效果是显著的。分析评估回归的总效果分为以下两个部分:1) 通过已经建立的模型计算得到调整前后的回归模型误差占总误差的百分比(R-Sq)分别为 81.92%和 27.68%,标准差 $S=0.17333$,需进一步改进;2) 对于预测结果的整体估计。预测前后的 R-Sq 分别为 96.93%和 87.71%,激光功率、切割速度和离焦量的 P 值(确定否定假设检验中原假设的适当性)分别为 0.046, 0.946 和 0.084,当检测统计量小于常用值 0.05,则

可否定原假设,实验中三因素的 P 值与常用值差距比较小。这说明现在的模型已经相当合适,无需再进一步改进。

粗糙度主效应图如图 6 所示。可以看出,粗糙度平均值约为 58.84 μm ,当激光功率为 100~150 W 时,随着激光功率的增大,粗糙度呈减小趋势,当激光功率约为 130 W 时,粗糙度达到平均值;随着离焦量的增大,切面粗糙度减小;当切割速度为 0.4~0.6 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,随着切割速度的增大,切面粗糙度略有增大,约为 58.84 μm ,这说明切割速度对粗糙度影响非常小。

挂渣主效应图如图 7 所示。可以看出,激光功率和切割速度对挂渣的生成影响较大,平均离焦

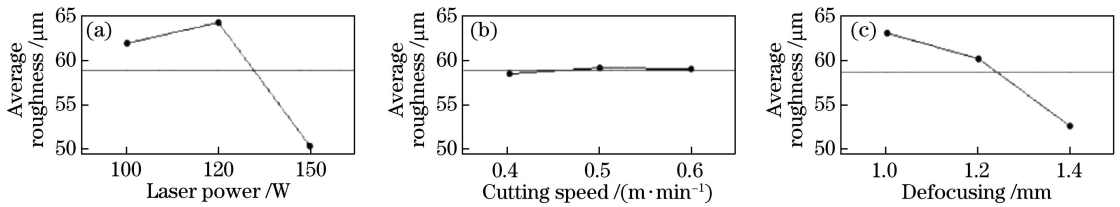


图6 粗糙度主效应图。(a)粗糙度-激光功率;(b)粗糙度-切割速率;(c)粗糙度-离焦距

Fig. 6 Main effect plots of roughness. (a) Roughness-laser power; (b) roughness-cutting speed; (c) roughness-defocusing

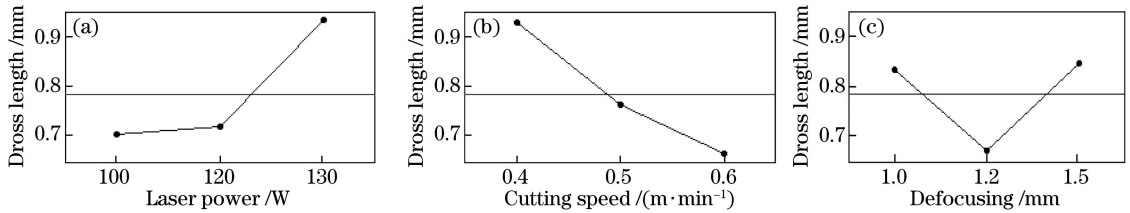


图7 挂渣主效应图。(a)挂渣长度-激光功率;(b)挂渣长度-切割速率;(c)挂渣长度-离焦距

Fig. 7 Main effect plots of dross. (a) Dross length-laser power; (b) dross length-cutting speed; (c) dross length-defocusing

量对挂渣影响较小。150 W 激光切割镁铝合金的挂渣长度明显大于 100 W 激光切割的,且长度方向的挂渣颗粒粗大,出现了连续挂渣现象。随着激光功率的增大,切面挂渣逐渐增多,长度从 0.7 μm 增大到 0.93 μm 。随着切割速度的增大,挂渣长度从 0.92 mm 减小为 0.62 mm,降幅明显。离焦距对挂渣的影响较小,挂渣长度基本在 0.78 mm 附近。

4.2 正交叉实验方案

直观分析法简单明了,但不能说明因素之间的

交互作用,因此需要进行方差分析。陈宇翔等^[29]计算得到,矫正数 G 可表示为

$$G = W^2 / (dn), \quad (8)$$

式中 W 为所有实验指标之和;区组数 $d = 2$;实验次数 $n = 9$ 。粗糙度交互作用图如图 8 所示。分析可知,当离焦距为 1.0 mm,激光功率为 100 W,切割速度为 0.4 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,切面的粗糙度较好;当离焦距为 1.5 mm,切割速度为 0.6 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,激光功率为 150 W 时,切割面粗糙度同样较好。

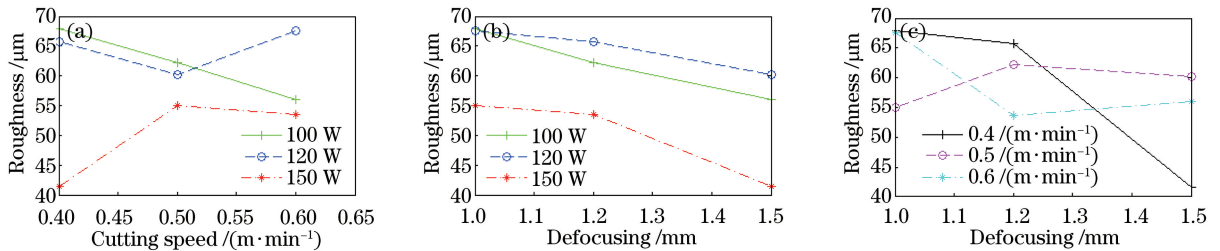


图8 粗糙度交互作用图。(a)不同激光功率下粗糙度-切割速度;(b)不同激光功率下粗糙度-离焦距;

(c)不同切割速度下粗糙度-离焦距

Fig. 8 Interaction plots of roughness. (a) Roughness versus cutting speed under different laser powers; (b) roughness versus defocusing under different laser powers; (c) roughness versus defocusing under different cutting speeds

挂渣交互作用图如图 9 所示。可以看出,当切割速度为 0.4 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,激光功率为 150 W,离焦距为 1.5 mm 时,切面的挂渣较少;当离焦距为 1.0 mm,切割速度为 0.4 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,激光功率为 100 W 时,切面的挂渣同样较少。

通过正交实验综合分析可得,1 mm 厚的 AZ31B 镁铝合金激光切割的优化工艺参数为:激光功率 120 W,切割速度 0.5 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦

量 1.2 mm。

5 结 论

通过仿真实验和正交实验,进行了 AZ31B 镁铝合金激光切割的工艺研究,得到以下结论。

1) 激光功率为 200 W 时,1 mm 厚的 AZ31B 镁铝合金有较好切割效果。

2) 激光功率对试样切面的粗糙度和挂渣长度

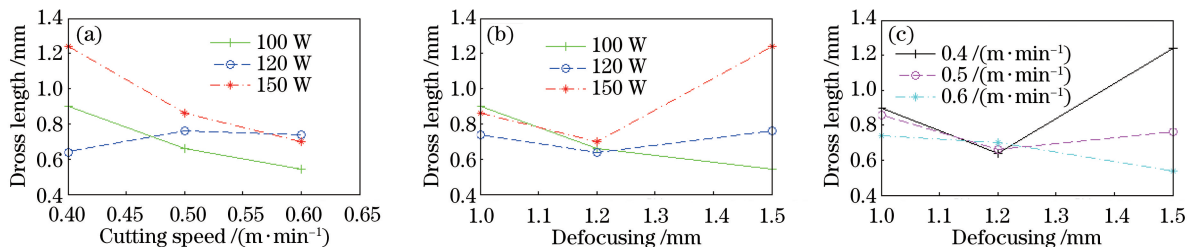


图9 挂渣交互作用图。(a)不同激光功率下挂渣长度-切割速度;(b)不同激光功率下挂渣长度-离焦量;
(c)不同切割速度下挂渣长度-离焦量

Fig. 9 Interaction plots of dross. (a) Dross length versus cutting speed under different laser powers; (b) dross length versus defocusing under different laser powers; (c) dross length versus defocusing under different cutting speeds

影响较大;激光切割速度对试样切面的粗糙度影响小,对挂渣长度影响大;离焦量的增大使得试样切面的粗糙度减小,而对挂渣长度影响不大。

3) 1 mm 厚的 AZ31B 镁铝合金激光切割的优化工艺参数为:激光功率 120 W,切割速度 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦量 1.2 mm。

参 考 文 献

- [1] Wang X H. Iron castings temperature field numerical analysis by laser cutting the stress-raising groove[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
王小焕. 铸铁件裂解槽激光切割温度场有限元数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [2] Yu F Y. Numerical simulation on CW-laser cutting the C70S6 fracture splitting notch[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
于风雨. 连续激光切割 C70S6 裂解槽数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [3] Yang J H. Study of the experiment and numerical simulation on laser drilling for 0Cr18Ni9 stainless steel[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2011.
杨俊华. 0Cr18Ni9 不锈钢激光打孔工艺及数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.
- [4] Ye S L, Ma J S, Huang X. Simulation of the temperature field in laser cutting of brittle materials[J]. Optical Technique, 2007, 33(4): 599-601.
叶圣麟, 马军山, 黄鑫. 激光切割脆性材料的温度场模拟[J]. 光学技术, 2007, 33(4): 599-601.
- [5] Yuan W, Li Z G, Cai Y G. Simulation of ANSYS-based laser cutting temperature field[J]. Journal of Changchun University, 2013, 23(12): 1561-1564.
袁伟, 李占国, 蔡云光. 基于 ANSYS 的激光切割温度场仿真[J]. 长春大学学报, 2013, 23(12): 1561-1564.
- [6] Kashani M M, Movahhedy M R, Ahmadi M T, *et al.* Analytical prediction of the temperature field in laser assisted machining[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 575-578.
- [7] Akhtar S S, Yilbas B S. Laser treatment of steel surfaces: Numerical and experimental investigations of temperature and stress fields[M] // Hashmi S, Batalha G F. Comprehensive Materials Processing. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014: 25-46.
- [8] Negarestani R, Sundar M, Sheikh M A, *et al.* Numerical simulation of laser machining of carbon-fibre-reinforced composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2010, 224(7): 1017-1027.
- [9] Zhang Z Y, Zhang Y K. The phase analysis and the simulation of temperature field of laser cutting[J]. Applied Laser, 2003, 23(6): 330-334.
张朝阳, 张永康. 激光切割过程的阶段分析及温度场模拟[J]. 应用激光, 2003, 23(6): 330-334.
- [10] Chen Y. Research on temperature field numerical simulation and performance of laser re-melted Ni-coating oriented by jet electroforming on 45 steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
陈勇. 45 钢喷射电镀镍层激光重熔温度场数值模拟及其性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [11] Kar A, Rothenflue J A, Latham W P. Scaling laws for thick-section cutting with a chemical oxygen-iodine laser[J]. Journal of Laser Applications, 1997, 9(6): 279-286.
- [12] Cenna A A, Mathew P. Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(1): 105-113.
- [13] Herzog D, Jaeschke P, Meier O, *et al.* Investigations on the thermal effect caused by laser

- cutting with respect to static strength of CFRP [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12/13): 1464-1473.
- [14] Chen C, Gao M, Gu Y Z, *et al.* Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet [J]. Chinese Journal of 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.
- [15] Yan X G, Wang W X, Cui Z Q, *et al.* Investigation of cutting process of AZ31B magnesium alloy plate via solid-state pulsed Nd: YAG laser [J]. Applied Laser, 2010, 30(5): 381-385.
闫兴贵, 王文先, 崔泽琴, 等. 固脉冲 Nd: YAG 激光切割 AZ31B 镁合金的工艺研究 [J]. 应用激光, 2010, 30(5): 381-385.
- [16] Xie L C, Quan Y J. Status and development of laser processing of magnesium alloys [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(6): 120-124.
谢丽初, 全亚杰. 镁合金的激光加工现状与发展 [J]. 矿冶工程, 2012, 32(6): 120-124.
- [17] Rajamani D, Tamilarasan A. Fuzzy and regression modeling for Nd: YAG laser cutting of Ti-6Al-4V superalloy sheet [J]. Journal for Manufacturing Science and Production, 2016, 16(3): 153-162.
- [18] Mishra S, Sridhara N, Mitra A, *et al.* CO₂ laser cutting of ultra thin (75 μm) glass based rigid optical solar reflector (OSR) for spacecraft application [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 128-138.
- [19] Ozaki H, Le M Q, Kawakami H, *et al.* Real-time observation of laser cutting fronts by X-ray transmission [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 181-187.
- [20] Pocorni J, Powell J, Deichsel E, *et al.* Fibre laser cutting stainless steel: Fluid dynamics and cut front morphology [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 87: 87-93.
- [21] Manjoth S, Keshavamurthy R, Kumar G S P. Optimization and analysis of laser beam machining parameters for Al7075-TiB₂ *in-situ* composite [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 149: 012013.
- [22] Srinivasan S, Kadadevaramath R S, Kumar V, *et al.* Optimization of material removal rate and surface roughness in laser cutting machine by Taguchi method [J]. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 2015, 4(6): 4993-4998.
- [23] Madić M, Radovanović M, Manić M, *et al.* Optimization of CO₂ laser cutting process using Taguchi and dual response surface methodology [J]. Tribology in Industry, 2014, 36(3): 236-243.
- [24] Chen X Y, Li T C, Zhai K, *et al.* Using orthogonal experimental method optimizing surface quality of CO₂ laser cutting process for PMMA microchannels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 2727-2733.
- [25] Gui R S. Study of temperature distributions of layered-materials irradiated by Gaussian laser [D]. Suzhou: Suzhou University, 2008.
桂如胜. 高斯激光辐照下分层材料的温度分布研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- [26] Guo Z Q, Wu W J, Man Y H, *et al.* Phase change analysis of PCM by ANSYS finite element method [J]. New Technology & New Process, 2007 (11): 87-89.
郭志强, 吴文健, 满亚辉, 等. 基于 ANSYS 有限元方法对相变材料相变过程的分析 [J]. 新技术新工艺, 2007(11): 87-89.
- [27] Cui Z Q. Research on pulsed laser processing behavior of AZ31B magnesium alloy [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
崔泽琴. AZ31B 镁合金脉冲激光加工行为的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [28] Ren N F, Zhang W, Wang H X, *et al.* Process optimization for pulsed laser drilling of 20Cr13 sheets based on orthogonal experiments [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031410.
任乃飞, 张文, 王后孝, 等. 基于正交实验的 20Cr13 板材脉冲激光打孔工艺优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031410.
- [29] Chen Y X, Gao L. Analysis of processing parameters for laser cutting high-temperature alloy steel by orthogonal method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111403.
陈宇翔, 高亮. 正交法分析激光切割高温合金钢工艺参数 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111403.