

光纤激光切割中厚铝合金板工艺特性研究

沈义平¹, 陈聪^{2*}, 高明², 成群林¹, 李中权¹, 曾晓雁²

¹上海航天精密机械研究所, 上海 201600;

²华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 为了探究中厚板铝合金光纤激光切割工艺特性,开展了光纤激光切割 8 mm 厚 AA2219 铝合金工艺实验,系统研究了激光功率、切割速度、离焦量和辅助气压等工艺参数对切缝质量的影响。以根部挂渣高度和切缝下部分倾斜条纹区域所占板厚比例来表征切缝质量。实验结果表明,激光功率和辅助气压是影响切缝质量的最主要的工艺参数,当激光功率增大至 5.4 kW、辅助气压取值范围增大至 1100~1500 kPa 时,切缝挂渣量最少。最后,为了提高中厚度铝合金激光切割质量,根据空气动力学原理,利用流体力学模拟设计并制作了简易 Laval 喷嘴,采用该喷嘴进行实验发现,切缝表面倾斜条纹区域范围从 0.5 降至 0.14,而挂渣高度变化较小。

关键词 激光技术; 激光切割; 铝合金; 切缝质量; 喷嘴; 空气动力学

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0102008

Technological Characteristics in Fiber Laser Cutting of Medium-Thickness Aluminum Alloy Sheet

Shen Yiping¹, Chen Cong^{2*}, Gao Ming², Cheng Qunlin¹, Li Zhongquan¹, Zeng Xiaoyan²

¹Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To explore the technological characteristics in fiber laser cutting of medium-thickness aluminum alloy sheets, the fiber laser cutting of an 8 mm thick AA2219 Al alloy is carried out. The effects of process parameters such as laser power, cutting speed, defocusing distance and assistant gas pressure on the kerf quality are systematically investigated. The kerf quality is assessed by the dross height and the fraction of oblique striation zone of the lower part of kerf. The experimental results show that the kerf quality is mainly determined by laser power and assistant gas pressure. The dross height of the kerf is reduced to minimum when laser power increases to 5.4 kW and the range of gas pressure increases to 1100-1500 kPa. Moreover, in order to further improve the kerf quality of medium-thickness aluminum alloys, a simple Laval nozzle is designed and made by the hydrodynamics simulation based on the aerodynamics theory. The experiment with this nozzle discloses shows that the fraction of oblique striation zone is reduced from 0.5 to 0.14, while the dross height does not nearly change.

Key words laser technique; laser cutting; aluminum alloy; kerf quality; nozzle; aerodynamics

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 160.3900

1 引言

激光切割因具有高切割速率、良好的质量和强大的柔性加工能力,已逐渐成为现代制造高质量自动化加工的主要切割技术,被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合金材料对激光束的吸收,使切口难以瞬间熔化形成,降低了切割效率,同时影响了工艺和切缝质量的稳定性^[2]。其次,铝合金热导率高,切割时易导致切缝热影响区过宽,使切割质量降低^[3]。再次,铝

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-09-04; 录用日期: 2018-09-26

基金项目: 上海市军民融合专项(沪经信军[2017]365号)

* E-mail: 809431165@qq.com

合金的强氧化性使熔化金属容易被氧化,而铝氧化物的黏性会阻碍熔融金属脱离切缝,这增加了切缝挂渣倾向^[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,铝合金激光切割大多为 CO₂ 激光切割和薄板切割。Stournaras 等^[6-7]对 CO₂ 激光切割薄板铝合金进行了研究,在优化工艺参数条件下,能够得到挂渣少、表面质量优异的切缝。而光纤激光器由于光束质量更好,铝合金对其发射激光的吸收率更高,且能够采用光纤传输,适应性较强,在激光加工领域已经逐渐取代 CO₂ 激光器^[8-10]。Scintilla 等^[11], Wandera 等^[12], Riveiro 等^[13]通过对光纤激光切割薄板铝合金进行研究,得到的切缝表面较 CO₂ 激光所得切缝更加光滑,根部挂渣更少,采用优化的工艺参数进行实验,所得样品的切割质量与 CO₂ 激光切割相近。

由于铝合金的特性及实验条件的限制,研究采用的铝合金大多为 4 mm 以内的薄板,关于厚度大于 4 mm 铝合金的研究较少^[14-16]。此外,厚板切割时需要更大的热输入和辅助气压,激光切割过程中

激光束与熔化金属和辅助气压之间的相互作用更加激烈,得到良好切缝质量的困难增大。本文采用光纤激光切割 8 mm 厚铝合金,探讨激光功率、切割速度、离焦量和辅助气压对挂渣和切缝表面质量的影响,得出优化的工艺参数范围,并通过改善喷嘴内部结构改善喷嘴出口气流形态。最后,利用设计的喷嘴进行切割实验,并与普通喷嘴切割质量进行对比。

2 实验条件

实验设备采用美国 IPG 公司生产的 YLS-10000 型连续多模光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,传输光纤芯径为 200 μm,光束质量参数 BPP(光束参数乘积)为 6.9 mm · mrad。激光切割头(YK52, Precitec 公司,德国)为透镜式聚焦,准直焦距为 125 mm,聚焦焦距为 150 mm,聚焦光斑直径为 0.24 mm,能够承受的最大激光功率为 5.4 kW,切割喷嘴出口直径为 1.5 mm,为普通锥形喷嘴。实验材料采用厚度为 8 mm 的 2219-T87 铝合金板材,材料的主要成分如表 1 所示。辅助气体采用体积分数为 99.9% 的氩气,切割长度为 300 mm,为单向直线切割。切割工艺参数如表 2 所示。

表 1 2219-T87 铝合金的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical compositions of 2219-T87 aluminum alloy (mass fraction, %)

Element	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	Zr	Al
Content	0.05	0.02	6.5	0.32	0.10	0.04	0.04	0.11	Balance

表 2 激光切割工艺参数

Table 2 Process parameters for laser cutting

Parameter	Value
Laser power P /kW	4.6, 4.8, 5.0, 5.2, 5.4
Cutting speed v /($m \cdot min^{-1}$)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4
Defocusing distance f /mm	-4, -3, -2, -1, 0
Stand-off of nozzle Δ /mm	1
Assistant gas pressure F /(10^2 kPa)	9, 11, 13, 15, 17, 19

激光切割实验装置如图 1 所示,激光切割头垂直于工件表面,将待切割工件固定在刀床上,采用电磁阀控制辅助气体,切割时,喷嘴与工件之间的距离始终保持不变。

实验完成后,采用金相显微镜(ECLIPSE MA100, Nikon 公司,日本)对切面形貌进行观测。选取切缝质量中的挂渣和表面形貌进行分析,主要是测量切缝根部挂渣与工件下表面之间的距离,表征为挂渣高度(H_d);十等分测量切缝 10 个位置的

挂渣高度,采用游标卡尺进行测量,结果取平均值;切缝表面形貌选取粗糙度最大的区域,以下部分倾斜条纹区域宽度所占板厚的比例(η)来表示:

$$\eta = H_o / D, \quad (1)$$

式中,工件厚度为 D ,倾斜条纹区域在切缝厚度方向的宽度为 H_o 。挂渣高度和倾斜条纹所占板厚比例的测量方法及位置如图 2 所示。挂渣高度和倾斜条纹所占板厚比例的值越小,表示切缝根部挂渣越少,表面粗糙度越低,切缝质量越好。

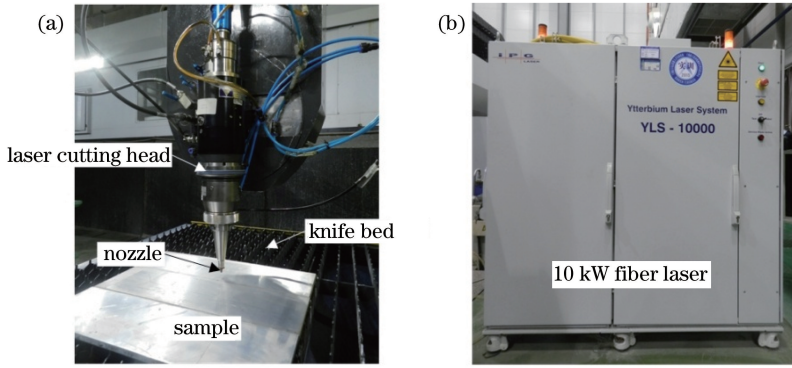


图 1 激光切割实验装置。(a)加工头;(b)光纤激光器

Fig. 1 Experimental devices for laser cutting. (a) Processing head; (b) fiber laser

3 结 果

3.1 切缝形貌

实验得到的 8 mm 铝合金切缝形貌如图 3 所示。比较图 3(a)~(c)可知,当焦点位置靠近工件表面时,切缝表面条纹粗大,倾斜条纹区域宽,几乎覆盖整个工件截面,且根部挂渣较多,而焦点位置越靠近工件底部,得到的切缝质量越好。如图 3(c)和 3(d)所示,当采用较高的气体压力时,得到的切缝表面倾斜条纹区域变窄,挂渣高度略有减少。此外,通过实验发现,激光切割 8 mm 厚板时能取得较好切缝质量的工艺参数的可选范围较窄,且切缝质量波动较大。

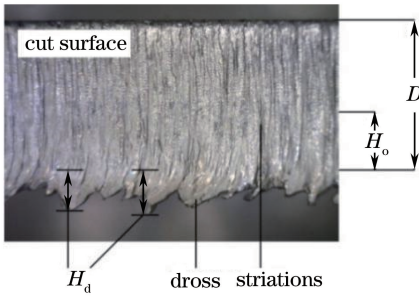


图 2 挂渣高度和倾斜条纹占板厚比例的测量方法

Fig. 2 Method for measuring dross height and fraction of oblique striation zone

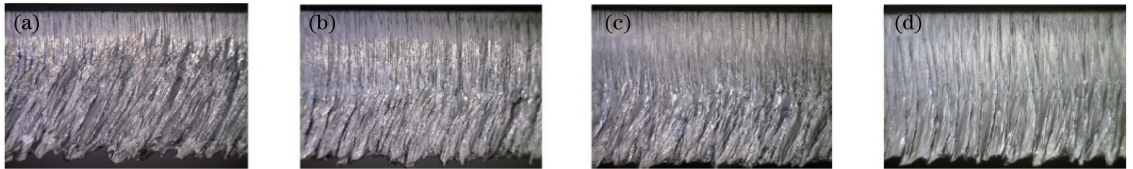


图 3 $P=5.4 \text{ kW}$, $v=2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,不同切割参数下的切缝形貌。(a) $f=0 \text{ mm}$, $F=1500 \text{ kPa}$;

(b) $f=-3 \text{ mm}$, $F=1500 \text{ kPa}$; (c) $f=-4 \text{ mm}$, $F=1500 \text{ kPa}$; (d) $f=-4 \text{ mm}$, $F=1900 \text{ kPa}$

Fig. 3 Kerf morphologies under different cutting parameters when $P=5.4 \text{ kW}$ and $v=2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. (a) $f=0 \text{ mm}$, $F=1500 \text{ kPa}$; (b) $f=-3 \text{ mm}$, $F=1500 \text{ kPa}$; (c) $f=-4 \text{ mm}$, $F=1500 \text{ kPa}$; (d) $f=-4 \text{ mm}$, $F=1900 \text{ kPa}$

3.2 工艺参数的影响

1) 激光功率的影响

如图 4(a)所示,挂渣高度随激光功率的增大而减小,当激光功率为 5.4 kW 时,挂渣高度有最小值,为 0.36 mm。由图 4(b)可知,倾斜条纹所占板厚的比例 η 随激光功率的增大而减小,说明倾斜条纹区域的宽度减小,切缝表面质量随激光功率的增大而变好,但是从图中倾斜条纹占板厚比例的变化规律可看出,随着激光功率的增大,倾斜条纹区域缓慢变少。由于切割头能够承受的最大功率为 5.4 kW,且板厚较厚,热传导损失的热量较多,需要

更大的激光功率才能提高切缝质量。

2) 切割速度的影响

切割速度对挂渣高度和倾斜条纹所占板厚比例的影响如图 5 所示,图 5(a)中,挂渣高度随着切割速度的增加先减小后增大,在速度为 $1.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,挂渣高度有最小值 0.26 mm。切割速度过小时,熔化金属量增多,不能完全被辅助气流排出而形成挂渣。切割速度过大时,热输入不足使熔化金属黏度增加,排出困难,挂渣倾向大,因此,实际切割时,需要把切割速度控制在适当的范围内。如图 5(b)所示,随着切割速度的增大,倾斜条纹所占板厚的比

例逐渐升高,倾斜条纹区域的范围逐渐增大。因为切割速度的增大使热输入降低,熔化金属黏度下降

快,向切缝下部分运动较困难,随着激光束向前移动,熔化金属快速冷却形成较宽的倾斜条纹。

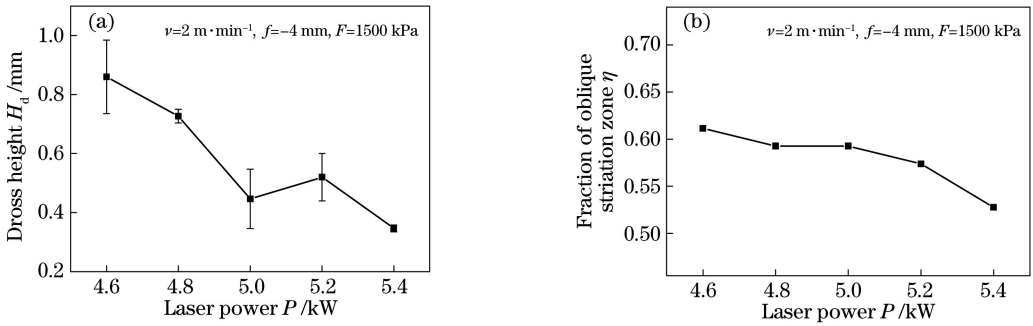


图 4 功率对切缝质量的影响。(a)挂渣高度;(b)倾斜条纹占板厚比例

Fig. 4 Effect of laser power on kerf quality. (a) Dross height; (b) fraction of oblique striation zone

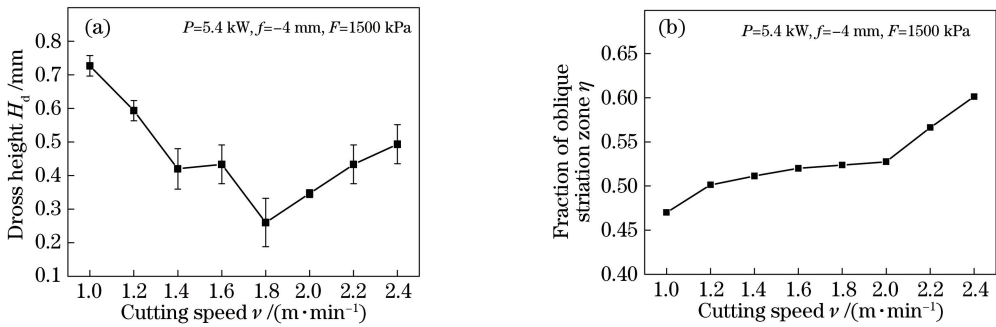


图 5 切割速度对切缝质量的影响。(a)挂渣高度;(b)倾斜条纹占板厚比例

Fig. 5 Effect of cutting speed on kerf quality. (a) Dross height; (b) fraction of oblique striation zone

3) 离焦量的影响

离焦量对挂渣高度和倾斜条纹所占比重的影响如图 6 所示。图 6(a)中,随着离焦量逐渐增加,挂渣高度增大,即焦点位置越靠近工件底部,根部挂渣高度越小。当离焦量小于 -3 mm 时,继续减小离焦量,根部挂渣变化较小。经分析,当焦点位置越靠近工件底部,工件下部分的温度越高,熔化金属黏度

降低,有利于排除熔化金属,减小根部挂渣倾向。

如图 6(b)所示,随着离焦量的增加,倾斜条纹所占比重大,即当焦点位置越靠近工件底部,倾斜条纹区域越窄。因为焦点位置功率密度高,当焦点在工件下部分时,切缝根部熔化金属仍具有很高的温度,黏度小,在辅助气流的作用下能够轻易排出,从而形成较窄的倾斜条纹区域。

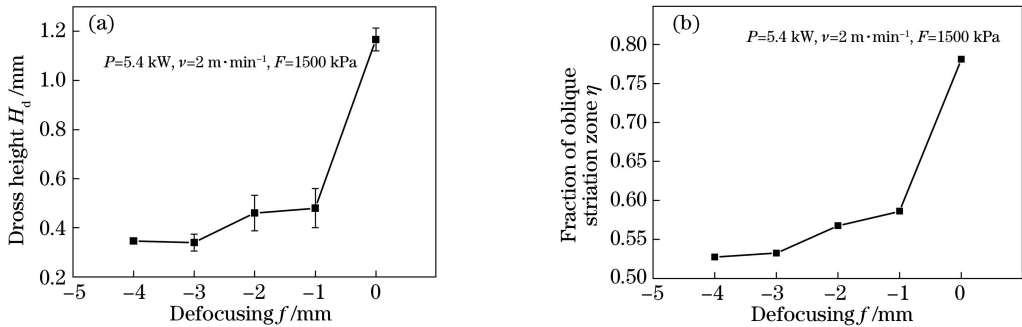


图 6 离焦量对切缝质量的影响。(a)挂渣高度;(b)倾斜条纹占板厚比例

Fig. 6 Effect of defocusing distance on kerf quality. (a) Dross height; (b) fraction of oblique striation zone

4) 气压大小的影响

辅助气压对挂渣高度和倾斜条纹所占比重的影响如图 7 所示。图 7(a)中,当辅助气压增大

时,挂渣高度先减小后增大,当辅助气压小于 1100 kPa 时,切缝根部挂渣较多。气压在 $1100 \sim 1500 \text{ kPa}$ 范围内变化时,切缝挂渣最少,为

0.35 mm。而当气压大于 1500 kPa 后,继续增大辅助气压,切缝根部挂渣急剧增多。这是因为气压较小时的气流排渣能力较弱,而过大的气压会在锥形喷嘴出口下方形成阻碍气流的马赫盘,并产生正激波,使气体流速迅速降低,严重影响气流稳定性,进而减弱气流的排渣能力^[15-17]。

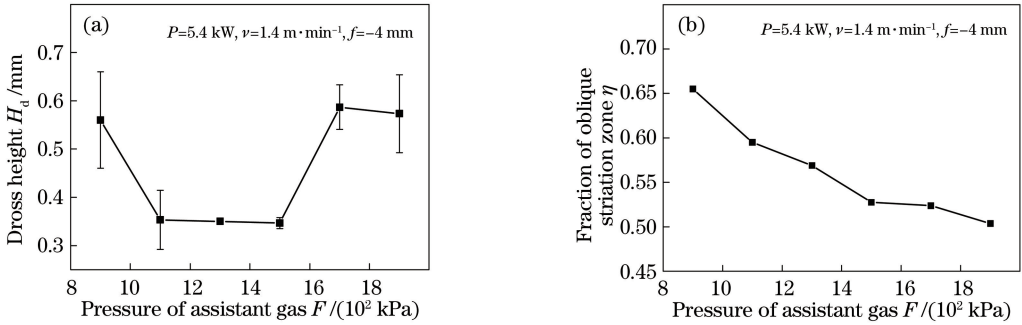


图 7 气压大小对切缝质量的影响。(a)挂渣高度;(b)倾斜条纹占板厚比例

Fig. 7 Effect of gas pressure on kerf quality. (a) Dross height; (b) fraction of oblique striation zone

3.3 喷嘴优化

通过上述分析可知,为了提高切缝表面质量和减少挂渣高度,需要较大的激光功率和辅助气压,然而激光切割头能够承受的最大激光功率为 5.4 kW,能够承受的最大压力为 2000 kPa。针对锥形喷嘴在高气压下气流紊乱进而影响到切缝表面质量的问题,根据空气动力学原理,在提高喷嘴压力的前提下

如图 7(b)所示,随着辅助气压的增大,倾斜条纹所占板厚比例逐渐减小。气压增大,气流推力也随之增大,熔化金属能够轻易地流动到切缝下部,从而倾斜条纹区域的范围减小,切缝表面质量得到提高,且增大辅助气压,能够大幅度地提高切缝表面质量。

不产生正激波,设计一种缩放型喷嘴,即 Laval 喷嘴。标准的 Laval 喷嘴内部为复杂曲线,喷嘴内部的复杂结构使该喷嘴难以加工,且加工出来的喷嘴的精度不高。为了方便制造,将 Laval 喷嘴的收缩段和扩张段曲线设计成直线段,根据实验所用的激光器和切割头技术参数,设计出如图 8 所示的简易 Laval 喷嘴。

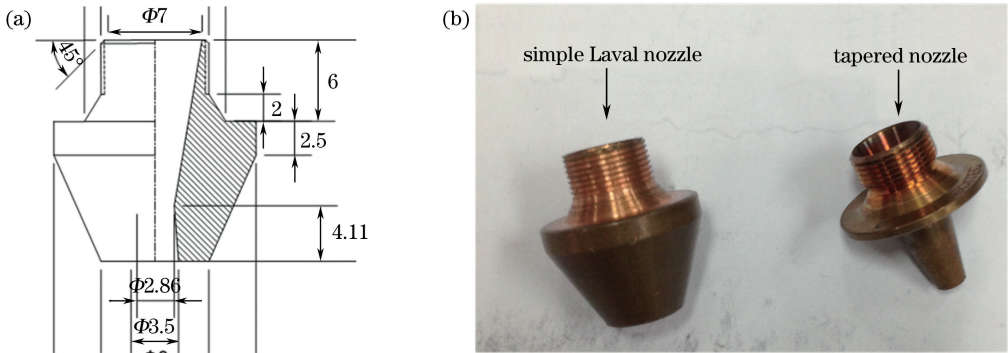


图 8 简易 Laval 喷嘴。(a)设计图;(b)实物图

Fig. 8 Simple Laval nozzle. (a) Design drawing; (b) physical map

为了验证所设计的简易 Laval 喷嘴的气流形态,采用 Fluent 软件模拟喷嘴出口气流形态。基于有限体积法对控制方程进行离散,采用耦合式求解器求解,利用 SIMPLEC 算法解决速度与压力的耦合问题进而对流场进行数值计算。采用标准壁面函数法对近壁区进行处理。计算域的入口取在喷嘴的上游,网格采用三角形非结构网格,对喷嘴出口附近网格进行加密。计算域入口采用入流条件,给定总压为 900 kPa,总温为室温,速度方向与喷嘴轴线一

致。出口采用出流条件,给定环境压力为 101.325 kPa。喷嘴轴线处采用轴对称条件。人工边界采用无反射边界条件。计算得到的结果如图 9 所示。

由图 9(a)可知,普通锥形喷嘴在喷嘴下方具有最大速度 $655 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但是范围较窄,约在喷嘴出口下方 2 mm 处。随着与喷嘴出口之间的距离增大,气体流速急剧降低,从图 9(a)中可以看出流速迅速降至约 $426 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且气流迅速膨胀,不利于排渣。

图 9(b)和 9(c)分别为简易 Laval 喷嘴和标准 Laval 喷嘴的气体流速分布,相比之下,这两种喷嘴的最大速度低于锥形喷嘴的最大速度,而且在距离喷嘴出口较远的位置,气体流速仍高达 $545 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且气流并没有发生膨胀,具有良好的稳定性。因此,Laval

喷嘴可以更好地保护透镜,提高切缝质量。虽然所设计的简易 Laval 喷嘴在喷嘴出口下方的气体流速略低于标准 Laval 喷嘴,但也能获得良好相近的气流形态,尤其 Laval 喷嘴的简易化大幅度降低了喷嘴加工制造难度,因此,它具有更广的实用性。

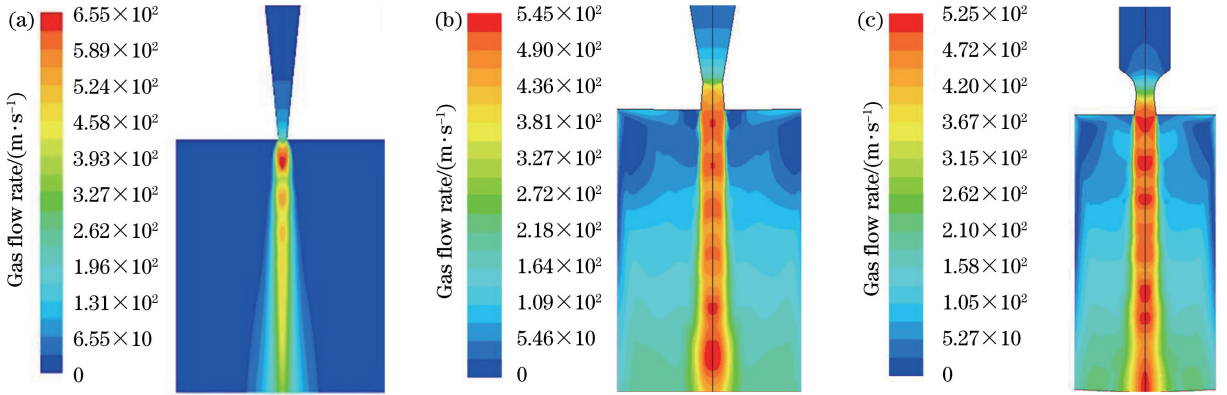


图 9 喷嘴气流的流速分布。(a)锥形喷嘴;(b)简易 Laval 喷嘴;(c)标准 Laval 喷嘴

Fig. 9 Gas flow rate distribution of nozzle. (a) Tapered nozzle; (b) simple Laval nozzle; (c) standard Laval nozzle

采用所设计的简易 Laval 喷嘴进行切割实验,得到的切缝表面形貌如图 10 所示。由图 10 可得,在相同的参数下,应用简易 Laval 喷嘴切割得到的切缝表面几乎没有倾斜条纹,表面质量得到大幅度提高,但是根部挂渣的高度只是略有降低。为了更好地证明该喷嘴的气流形态优于普通锥形喷嘴,开展实验并分析分别应用两类喷嘴时切割速度对挂渣高度和倾斜条纹占板厚比例的影响情况,所得切割形貌的对比图如图 11 所示。采用简

易 Laval 喷嘴切割得到的切缝挂渣比锥形喷嘴切割得到的挂渣略有增多,主要是设计的喷嘴气体流速快,对熔化金属的推力增大,但是冷却作用也相应增强,因而在切缝根部,挂渣反而有增高的趋势。同时,由于气体流速快,熔化金属快速流动到切缝底部,从而表面倾斜条纹区域窄,表面质量好,如图 11(b)所示,锥形喷嘴切割得到的倾斜条纹所占比板厚比例始终高于 0.5,而采用简易 Laval 喷嘴切割所得的对应值则低于 0.1。

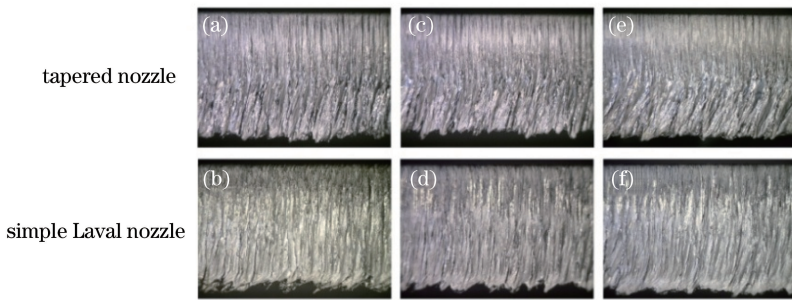


图 10 不同切割速度下锥形喷嘴与简易 Laval 喷嘴的切缝形貌对比图。

(a)(b) $1.2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (c)(d) $1.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (e)(f) $2.0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 10 Comparison of kerf morphologies of tapered nozzle and simple Laval nozzle under different cutting speeds.

(a)(b) $1.2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (c)(d) $1.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (e)(f) $2.0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

4 结 论

增大激光功率和辅助气压,同时选择适当的切割速度有利于提高激光切缝表面质量,减少根部挂渣。实验得到的激光切割 8 mm 铝合金优化的工艺

参数范围如下:激光功率为 5.4 kW,切割速度为 $1.6\sim 2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,离焦量为 $-4\sim -3 \text{ mm}$,辅助气压为 $1100\sim 1500 \text{ kPa}$,采用该工艺参数能够得到切缝挂渣少、表面条纹较细的切缝。而当辅助气压增大至 1900 kPa 时,切缝表面质量最优。

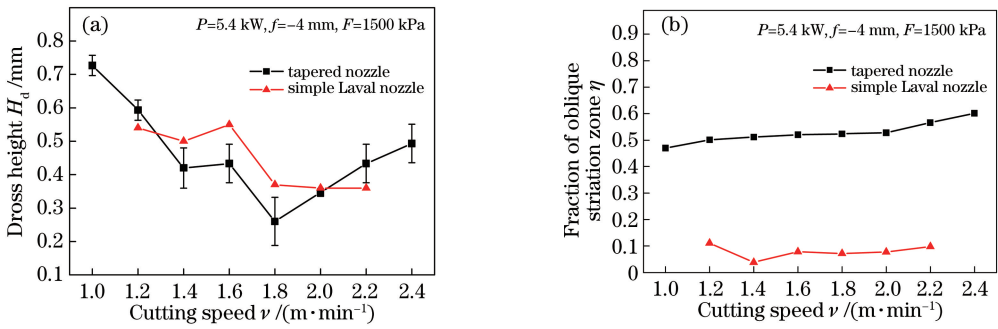


图 11 锥形喷嘴与简易 Laval 喷嘴的切割速度对切缝质量的影响。(a)挂渣高度;(b)倾斜条纹占板厚比例

Fig. 11 Effect of cutting speed on kerf quality for tapered nozzle and simple Laval nozzle.

(a) Dross height; (b) fraction of oblique striation zone

实验提出设计简易 Laval 喷嘴取代普通锥形喷嘴,获得了更好的喷嘴出口气流形态,提高了中厚板铝合金的切割质量。通过对比得出,采用设计的 Laval 喷嘴切割得到的切缝表面倾斜条纹所占比例从 0.5 降为 0.1,表面几乎没有粗大的倾斜条纹。实验结果对提高中厚板铝合金激光切缝质量具有指导意义。

参 考 文 献

[1] Rajaram N, Sheikh-Ahmad J, Cheraghi S H. CO₂ laser cut quality of 4130 steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43 (4): 351-358.

[2] Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, *et al.* The role of the assist gas nature in laser cutting of aluminum alloys[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 548-554.

[3] Yilbas B S. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 2106-2115.

[4] Salem H G, Mansour M S, Badr Y, *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(1/2/3): 64-72.

[5] Arif A F M, Yilbas B S. 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] Stournaras A, Stavropoulos P, Salonitis K, *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] Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, *et al.* Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(9): 1138-1152.

[8] Ge Y Q, Wang W X, Cui Z Q, *et al.* Corresponding experimentation research of aluminium alloy cutting using pulsed solid Nd:YAG laser [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.

[9] Ge Y Q, Wang W X, Cui Z Q, *et al.* Influence of assistant gas during Nd:YAG laser cutting of 5A06 aluminium alloy [J]. Applied Laser, 2008, 28(5): 358-361, 394.
葛亚琼, 王文先, 崔泽琴, 等. 辅助气体对 5A06 铝合金 Nd:YAG 激光切割质量的影响[J]. 应用激光, 2008, 28(5): 358-361, 394.

[10] Dubey A K, Yadava V. Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1/2/3): 412-418.

[11] Scintilla L D, Tricarico L, Wetzig A, *et al.* Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 69: 30-37.

[12] Wandera C, Salminen A, Kujanpaa V. Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser[J]. Journal of Laser Applications, 2009, 21 (3): 154-161.

[13] Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, *et al.* Laser cutting of 2024-T3 aeronautic aluminum alloy [J]. Journal of Laser Applications, 2008, 20 (4): 230-235.

[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] Amara E H, Kheloufi K, Tamsaout T. 2D modeling of surface tension effect during laser metal cutting[C] // 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 6-10, 2013, Miami, FL, USA. 2013: 99-103.
- [16] Duan J, Man H C, Yue T M. Modelling the laser fusion cutting process: II. Distribution of supersonic gas flow field inside the cut kerf [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34 (14): 2135-2142.
- [17] Wee L M, Li L. An analytical model for striation formation in laser cutting [J]. Applied Surface Science, 2005, 247: 277-284.