

低温风冷辅助激光切割 2024 铝合金工艺研究

王光鹏¹ 吴登杰² 赵乙椤³ 林立¹ 孟强¹

1 重庆交通大学航空学院, 重庆, 400074;

2 中国人民解放军32620部队, 青海西宁, 455001;

3 中航成飞民用飞机有限责任公司, 四川成都, 610031;

摘要: 激光切割铝合金材质时, 切口处都会产生一定宽度的热影响区, 本文针对厚度为2mm的2024铝合金激光切割过程中, 提出一种新型低温风冷辅助方法来降低切割工件的热影响区, 并发现最佳激光工艺参数。实验发现, 设计不同切割参数下, 两种加工方式的热影响区宽度变化规律。在激光功率为2000W~2500W、切割速度为7m/min~9m/min之间时选择-50°C低温冷风时对热影响区宽度抑制更明显; 在激光功率为2500W~3000W、切割速度为5m/min~6m/min之间时选择-60°C低温冷风对热影响区宽度抑制更明显。热影响区宽度最低可达6.5μm。基于正交实验分析热影响区宽度影响因素主次: 激光功率最大, 切割速度次之, 最后是冷却温度。

关键词: 激光切割; 冷风辅助气体; 2024铝合金; 热影响区; 蒙皮加工

DOI: 10.69979/3041-0673.25.10.074

引言

2024铝合金是一种高强度硬铝, 属于Al-Cu-Mg系的铝合金, 主要用于制作各种高负荷的零件和构件, 特别是在航空方面的应用, 可制作飞机蒙皮, 发动机零件等, 应用范围广。相对于其他加工方式, 激光切割是一种比较好的加工方式, 其优点是切割质量好, 激光束聚集后可形成非常小的点, 因此加工的零件切缝非常小, 生产效率高, 切割质量高, 切割速度快, 但由于激光能量高, 在切割工件过程中会造成切缝处热影响区产生, 从而影响了工件的力学性能。国内外学者对激光切割技术产生的热影响区宽度展开了各种研究。吴辰^[1]通过正交实验与响应面法优化预测激光切割最优参数。通过对激光切割钛合金试件进行力学性能分析, 揭示了热影响区对材料抗拉强度、屈服强度和伸长率的影响规律; 通过测量切口深度方向的维氏硬度值, 明确激光切割导致的材料硬度变化及热影响区宽度范围; 通过采用疲劳强度设计方法, 系统研究并实验验证了激光切割工艺对试件疲劳寿命的影响, 最终得出激光切割对疲劳寿命影响的相关结论。沈阳飞机工业集团^[2]通过对不同厚度的TA15钛合金进行切割实验, 揭示了热影响区组织结构从非熔化区域逐步过渡至熔化区域的变化规律, 且伴随热影响区范围的扩大, 其与基体交界处的显微硬度呈现显著递减趋势且实验证实无论何种厚度板材, 下表面的热影

响区深度始终大于上表面。相较于无热影响区的板材, 存在热影响区板材的屈服强度和抗拉强度均有不同程度的降低。Maziar sharif^[3]等针对铝合金材料的激光切割工艺, 系统探讨了包括切割速度、激光功率、板材厚度以及喷嘴间距在内的关键参数对切割区域温度的影响。实验结果显示, 测量切割区温度能有效反映不同切割条件下的性能变化, 其中激光功率被证实是决定切割区温度的关键因素。Beausoleil C^[4]等探讨了激光切割工艺参数对玻璃材料特性产生的影响。研究选取了激光功率、切割速度、辅助气压以及板材厚度作为主要变量, 结果显示: 激光功率对底部热影响区产生作用; 而板材厚度则对顶部热影响区尺寸有直接影响。

鉴于铝合金优异的热学性能, 激光切割后热影响区以往只是通过改变工艺参数降低热影响区带来的影响, 但不能同时兼顾激光切割工件的表面质量优势且工艺参数较多^[5-7]。因此, 本文提出一种新的实验方法, 在激光切割过程中, 同时使用辅助冷风来冷却加工处的温度, 最终达到降低铝合金工件的热影响区宽度, 提高切割质量, 并研究不同的工艺参数对工件热影响区宽度影响。

1 实验方案

1.1 实验材料

本实验材料为厚度2mm的2024铝合金, 其化学成分和力学性能指标见表1。

表1 2024铝合金化学成分 (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.5	0.5	4.3	0.6	1.5	0.1	0.25	0.15	余量

1.2 实验设计

实验设备采用实验设备为大族激光光纤激光切割机-G3015PRO，最大输出功率为3000W。所用气体为99.999%空气，操作环境温度为10~50℃，环境湿度10~95%，实验装置如图1所示，切割参数如表2所示。

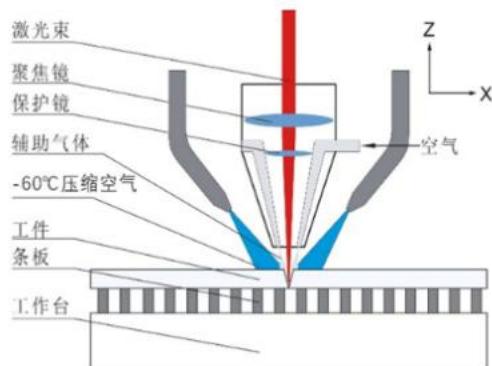


图1 实验装置示意图



图2 加工现场图

表2 激光参数工艺变化范围

加工因素	加工参数
激光功率 (W)	2000; 2250; 2500; 2750; 3000
切割速度 (m/min)	5; 6; 7; 8; 9
板材厚度 (mm)	2
冷却方式温度 (℃)	-50; -60; 常温取 30
焦点位置 (mm)	-2
辅助气体	空气

辅助气体压力 (bar)	10
冷却气体	空气
冷却气体压力 (bar)	2
喷嘴高度 (mm)	0.6

切割样件尺寸规格如图3所示，包含了1个锐角，1个钝角，两个直角以及2个圆，涵盖了激光飞机蒙皮的切割路径。

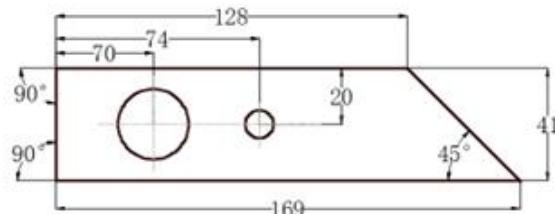


图3 激光切割样件

在完成激光切割取样后，对样品进行一系列制备过程，包括取样、镶嵌、研磨、抛光及腐蚀等步骤，以便于在显微镜下清晰显现其内部微观结构。使用凯勒试剂进行5~12秒腐蚀，用无水乙醇擦拭试样表面。使用AxioVision蔡司光学显微镜，同时使用500X观察金相试样。选取区域差异较大的四个值，求平均值为热影响区宽度。

2 实验结果分析

2.1 不同冷却温度下激光功率对热影响区宽度的影响

激光切割2024铝合金时，保持其他激光切割参数不变，只改变激光功率和冷却方式温度进行厚度为2mm的2024铝合金传统激光切割实验和低温冷风辅助激光切割实验。分别进行切割速度V为9m/min、8m/min、7m/min、6m/min、5m/min时的激光功率和冷却方式温度对热影响区宽度的实验加工。图4分别为切割速度V为9m/min、8m/min、7m/min时，2024铝合金热影响区宽度均值与激光功率、冷却方式温度的关系曲线。

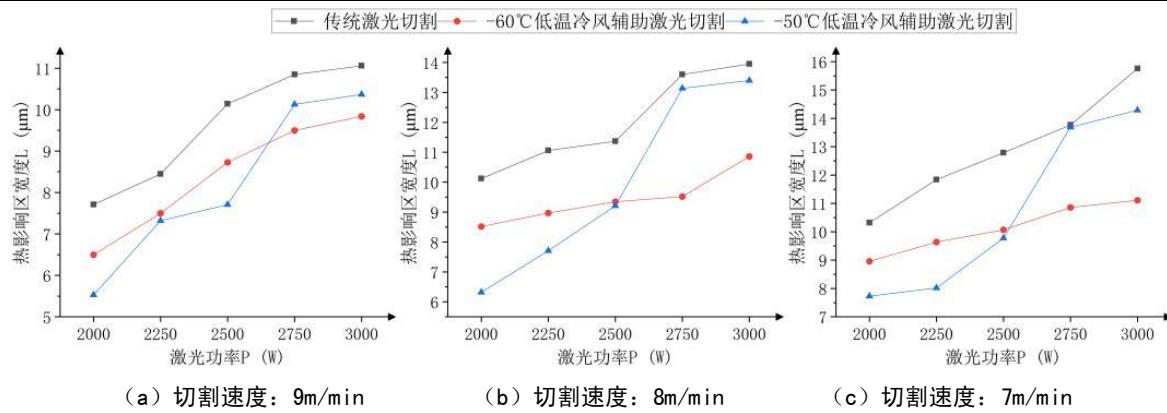


图4 热影响区宽度与激光功率、冷却方式温度变化曲线

在2024铝合金切割过程中,当使用低温冷风辅助时,不同温度条件下的热影响区宽度呈现出显著差异。在2000W~2500W的较低激光功率区间内,若冷风温度设定为-50℃,其产生的热影响区宽度相较于-60℃时更窄。然而,在激光功率提升至2750W~3000W的较高区间时,情况则相反,即-50℃条件下形成的热影响区宽度会大于-60℃的情况,这揭示了随着激光功率增大,更低的冷却温度对减小热影响区宽度更为有利。

在不同的激光功率下,不论何种切割速度,低温冷风都能有效地降低铝板切割过程中的热影响区宽度。在9m/min的切割速度下,当激光功率为2000W且冷风温度为-50℃时,热影响区宽度最大可减少28.3%,同样条件下,当激光功率提高到3000W时,最低可减小6.2%热影

响区宽度;在切割速度为8m/min时,热影响区宽度降幅最为显著的是在使用2000W激光功率与-50℃冷风辅助组合的情况下,降幅高达37.6%,而在2750W激光功率下,即便使用-50℃冷风辅助,热影响区宽度最小仅能降低3.4%;当切割速度为7m/min时,最大热影响区宽度减少是使用2250W激光功率和-50℃冷风辅助时,达到32.3%的降幅;在相同冷却温度但激光功率升至2750W时,热影响区宽度最小减少为0.6%。

图5(a)、(b)分别为切割速度为6m/min、5m/min时,2024铝合金热影响区宽度均值与激光功率、冷却方式温度的关系曲线。由图5可得,在固定切割速度条件下,热影响区宽度会随着激光功率的增大而增加。

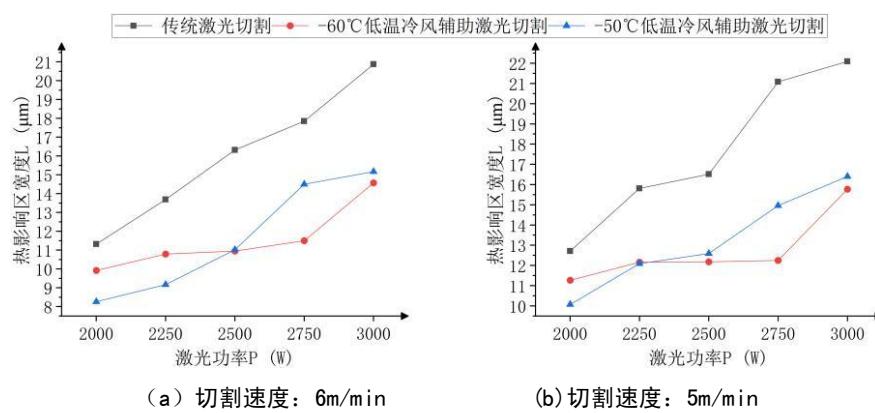


图5 热影响区宽度与激光功率、冷却温度变化曲线

在-50℃的低温冷风设置下,当激光功率为2000W~2250W时,热影响区宽度比在-60℃冷风温度下的更低。当激光功率提升至2500W和3000W时,-50℃冷风条件下产生的热影响区宽度大于-60℃,表示在高功率激光

切割时,更低的冷风温度对减小热影响区宽度更为有利。

不同的激光功率下,低温冷风辅助切割铝板的热影响区宽度均得到降低。当切割速度为6m/min时,热影响区宽度最大降低为35.6%(激光功率为2750W,冷却

温度为-60℃），最小降低12.4%（激光功率为2000W，冷却温度为-60℃）；当切割速度为5m/min时，热影响区宽度最大降低为41.9%（激光功率为2750W，冷却温度为-60℃），最小降低11.3%（激光功率为2000W，冷却温度为-60℃）。

由图4和图5可得，在激光切割过程中，当激光功率较低时，切割区域单位时间内吸收的热量相对较少，从而导致热影响区的宽度较小。当激光功率逐渐增大，单位时间内的热量输入量增加，更多的热量传导到周边区域，使得热影响区的宽度扩大。由此可得，在激光切割工艺中，选用的激光功率越小，所对应的热影响区宽度便会越小；而激光功率越高，则相应产生的热影响区

宽度则会越大。

2.2 不同冷却温度下切割速度对热影响区宽度的影响

在激光切割铝板时，保持其他激光切割参数不变，只改变切割速度和冷却方式温度进行厚度为2mm的2024铝合金常温激光切割实验和低温冷风辅助激光切割实验。分别进行激光功率为2000W、2250W、2500W、2750W、3000W时的切割速度和冷却温度对热影响区宽度的影响。

图6（a）、（b）分别为激光功率2000W、2250W时，2024铝合金热影响区宽度与切割速度、冷却方式温度的关系图。

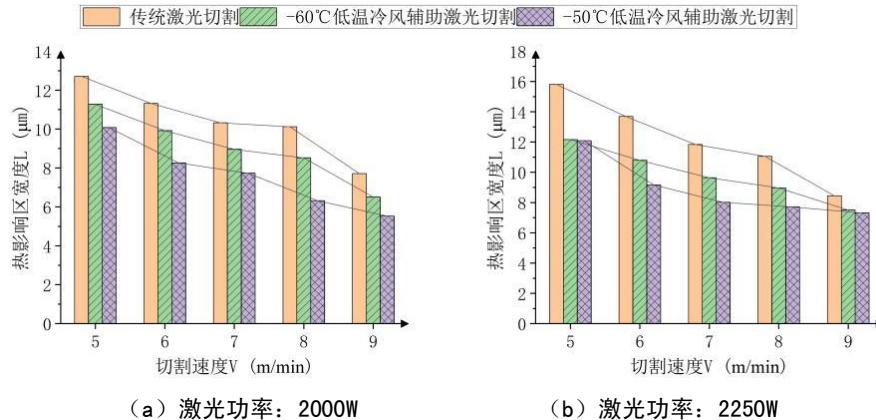


图6 热影响区宽度与切割速度、冷却方式温度变化曲线

由图6可得，当激光功率固定时，热影响区宽度随切割速度的增大而减小。

当激光功率分别为2000W、2250W时，-50℃低温冷风的热影响区宽度在切割速度5m/min~9m/min之间全部低于-60℃低温冷风的热影响区宽度。

不同的切割速度下，低温冷风辅助切割2024铝合金蒙皮的热影响区宽度均降低。当激光功率为2000W时，热影响区宽度最大降低37.6%（切割速度为8m/min，冷却温度为-50℃），最小降低11.3%（切割速度为5m/min，冷却温度为-60℃）；当激光功率为2250W时，热影响区宽度最大降低为33.0%（切割速度为6m/min，冷却温度为-50℃），最小降低11.2%（切割速度为9m/min，冷却温度为-60℃）。

图7为激光功率2500W时，2024铝合金热影响区宽度均值与切割速度、冷却方式温度的关系图。

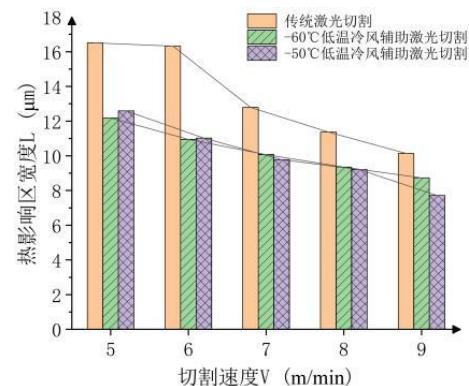


图7 热影响区宽度与切割速度、冷却方式温度变化曲线

由图7可得，当激光功率为2500W时，热影响区宽度随切割速度的增大而减小且当使用低温冷风辅助激光切割时，其热影响区宽度始终低于常温切割下的热影响区宽度。表明当用低温冷风辅助激光切割时能明显降低热影响区宽度。

当激光功率为2500W时，在切割速度7m/min~9m/min

min时,随着切割速度的增大,-50℃低温冷风的热影响区宽度低于-60℃低温冷风的热影响区宽度;在切割速度为5m/min~6m/min时,随着切割速度的增大,-60℃低温冷风的热影响区宽度低于-50℃低温冷风的热影响区宽度。

不同切割速度下,低温冷风辅助切割2024铝合金的热影响区宽度均得到降低。当激光功率为2500W时,

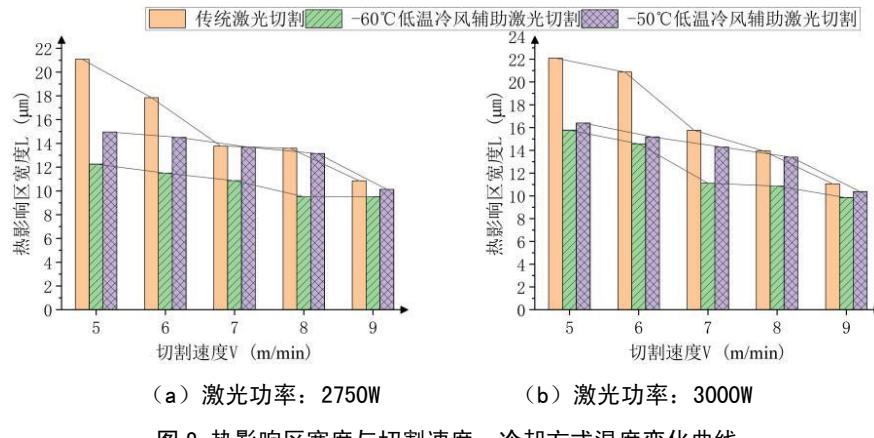


图8 热影响区宽度与切割速度、冷却方式温度变化曲线

由图8可得,当激光功率固定时,热影响区宽度随切割速度的增大而减小且当使用低温冷风辅助激光切割时,其热影响区宽度始终低于常温切割下的热影响区宽度。表明当用低温冷风辅助激光切割时能明显降低热影响区宽度。

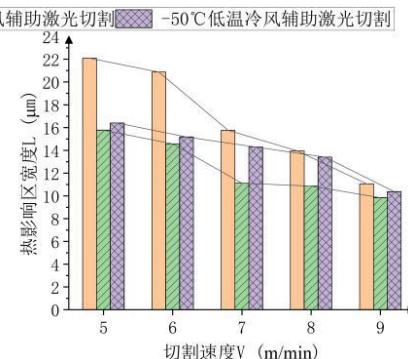
当激光功率分别为2750W、3000W时,随着切割速度的增大,-60℃低温冷风的热影响区宽度在切割速度5m/min~9m/min之间全部低于-50℃低温冷风的热影响区宽度。表明在此种情况下冷却温度越低越好。

不同的切割速度下,低温冷风辅助切割铝板的热影响区宽度均得到降低。当激光功率为2750W时,热影响区宽度最大降低为41.87% (切割速度为5m/min,冷却温度为-60℃),最低降低0.59% (切割速度为7m/min,冷却温度为-50℃);当激光功率为3000W时,热影响区宽度最大降低为30.18% (切割速度为6m/min,冷却温度为-60℃),最低降低3.94% (切割速度为8m/min,冷却温度为-50℃)。

当切割速度较小时,热源在切割区域上作用时间相对较长,导致单位时间内板材吸收的热量增大,继而造成更多的热量向周围区域扩散,所以会增大的热影响区的宽度。随着切割速度的增大,热源作用在切割区域的

热影响区宽度最大降低为32.9% (切割速度为6m/min,冷却温度为-60℃),最低降低13.9% (切割速度为9m/min,冷却温度为-60℃)。

图8(a)、(b)分别为激光功率2750W、3000W时,2024铝合金热影响区宽度均值与切割速度、冷却方式温度的关系图。



时间相对减小,2024铝合金板材单位时间接收到的热量降低,所以向周围传递的热量也会随之降低,故而热影响区的宽度也会降低。

由以上可得:在激光功率为2000W~2500W、切割速度为7m/min~9m/min之间时选择-50℃低温冷风时对热影响区宽度抑制明显;在2500W~3000W、切割速度为5m/min~6m/min之间时选择低温冷风-60℃时对热影响区宽度抑制明显。

2.3 热影响区宽度正交实验研究

利用正交实验法研究激光功率、切割速度和冷却温度对热影响区宽度的影响,用SPSSAU软件设计三因素三水平正交实验,实验参数设计如表3。根据正交实验表设计L9(34)等水平正交表并记录实验结果数据,得到如表4所示的激光切割实验结果。

表3 正交实验参数选取

因素	水平1	水平2	水平3
A:激光功率 P (W)	2000	2500	3000
B:切割速度 V (m/min)	5	7	9
C:冷却温度 T (℃)	常温	-60	-50

表4 正交实验结果

因素 序号	激光功率 P (W)	切割速度 V (m/min)	冷却温度 T (°C)	板材厚度 t (mm)	热影响区宽度 L (μm)
1	2000	5	常温	2	12.71
2	2000	7	-50	2	7.73
3	2000	9	-60	2	6.50
4	2500	5	-50	2	12.59
5	2500	7	-60	2	10.07
6	2500	9	常温	2	10.14
7	3000	5	-60	2	15.77
8	3000	7	常温	2	15.76
9	3000	9	-50	2	10.37

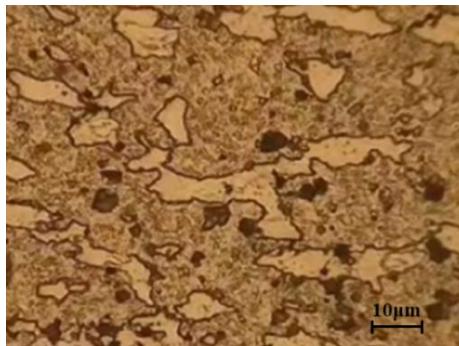
表4中,热影响区宽度最大值为16.40 μm,最小值为6.50 μm,相差2.5倍。

表5为该正交实验的极差分析表格。由表5可得,在热影响区宽度中,激光功率对应的R值最大,切割速度次之,冷却方式的温度最小。故对热影响区宽度工艺影响的主次顺序为ABC。最佳水平组合为A1B3C3。符合上节实验中最小数值。

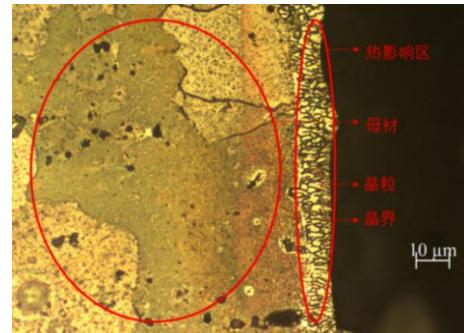
表5 极差分析表格

项	水平	激光功率	切割速度	冷却温度
K值	1	26.94	41.07	38.61
	2	32.80	33.56	32.34
	3	41.90	27.01	30.69
最佳水平		1	3	3
R		4.99	4.69	2.64

2.4 金相组织分析



(a) 200X 母材金相组织



b) 500X 热影响区金相组织

图9 2024铝合金金相组织

激光切割2024铝合金板材后,切口区域原组织 α (Al) + S (Al₂CuMg) + θ (CuAl₂)相发生重熔、凝固过程产生小且细的晶粒,且晶界粗大、密集,这个过程晶核因热源离开而扩展变慢。由于热应力,晶界上产生了热裂纹,这会使铝合金板材有效受力面积减小。当板材受到外力作用时,裂纹附近的区域会出现应力集中的现象,这种现象会使2024铝合金力学性能变差。低温冷风辅助激光切割就是在激光切割过程中,通过冷风带走激光切割完成后剩余的热量,减小重熔区的扩大。这一方式可以有效抑制热传导对热影响区宽度的扩大,进而维持了铝合金板材原有的力学性能。

低温冷风辅助激光切割技术的引入不仅提高了切割质量,还使得铝合金板材在切割后能够保持较高的力学性能。这一技术为2024铝合金板材的加工提供了更为可靠和高效的解决方案,有助于推动相关领域的进一步发展。

3 结论

通过实验探讨了热影响区宽度与激光功率、切割速

度、冷却方式及温度之间规律与影响。在特定的工艺参数范围内,通过调整激光功率和切割速度,同时配合合适的低温冷风辅助,可以有效地抑制热影响区的扩大。在激光功率为2000W~2500W区间时,采用7m/min~9m/min的切割速度,并用-50℃的低温冷风辅助能够显著减少热影响区宽度;而当激光功率提升至2500W~3000W区间,切割速度降至5m/min~6m/min时,选择更低的-60℃冷风温度对抑制热影响区宽度的增大更加明显。

参考文献

- [1] 吴辰. 钛合金蒙皮激光切割质量及力学性能影响分析[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2020.
- [2] 吴睿, 张晓清, 宋体杰, 等. TA15 钛合金激光切割热影响区的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(13): 75-78.
- [3] Sharifi M, Akbari M. Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy[J]. Optik, 2019, 184(06): 457-463.
- [4] Beausoleil C, Sarvestani H Y, Katz Z, et al. Deep and high precision cutting of alumina ceramics by picosecond laser[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 15285-15296.
- [5] 周志超, 崔全法, 杨艳龙, 等. 激光切割热影响区的分析[J]. 物理测试, 2019, 37(01): 14-17.
- [6] 武伟超, 王永军, 张新娟, 等. 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, 58(09): 91-93+97.
- [7] 陈聪, 高明, 王磊, 等. AA6061 铝合金薄板光纤激光切割工艺研究[J]. 中国机械工程, 2013, 34(05): 15-19

作者简介: 王光鹏(1999年8月),男,硕士,主要从事航空航天先进制造技术方面的研究。

吴登杰(1984年8月),男,中国人民解放军32620部队工程师,主要从事汽车维修工程、后勤保障管理。孟强(1996年4月),男,硕士,主要从事先进制造技术方面的研究。