

空间推进系统铝合金组件激光焊阈值特性

宋凡¹ 马纪龙¹ 周宇浩² 曹丹² 林嘉伟²

(1 上海空间推进研究所, 上海 201112)

(2 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

文 摘 为解决空间推进系统直属组件轻量化需求,对新采用的铝合金材料进行了激光焊阈值特性研究。结果表明,铝合金激光焊阈值区间与焊接速度和离焦量的绝对值正相关,但正向变化幅度远低于不锈钢、镍合金和钛合金等材料。对于光束质量不同的激光焊机来说,光束的焦斑直径越小,实焦焊时阈值区间越低;光束的发散角越小,相同离焦量下阈值区间越低。在 $-12^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 内,铝合金激光焊阈值区间与入射角无关。保护气的吹送方向和吹送速度基本不改变铝合金激光焊的阈值区间,此特性与不锈钢等材料略有区别。

关键词 铝合金,激光焊,匙孔,阈值区间,工艺参数

中图分类号: TG456.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.03.010

Characteristics of Threshold of Laser Welding for Aluminum Alloy Components in Space Propulsion System

SONG Fan¹ MA JiLong¹ ZHOU YuHao² CAO Dan² LIN JiaWei²

(1 Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112)

(2 Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112)

Abstract Based on the aluminum alloy components in the space propulsion system, the characteristics of threshold of laser welding are studied. Results show that the threshold interval of laser welding for aluminum alloy is positively correlated with the welding speed and the absolute value of defocus, but the magnitude of the positive change is much lower than that of stainless steel, nickel alloy and titanium alloy. For laser welders with different beam qualities, the smaller the focal spot diameter of the beam, the lower the threshold interval during real-focus welding; the smaller the divergence angle of the beam, the lower the threshold interval under the same defocus amount. In the range of -12° to 12° , the threshold interval of laser welding for aluminum alloy has nothing to do with the incident angle. The blowing direction and blowing speed of shielding gas basically do not change the threshold interval of laser welding for aluminum alloy, which is different from stainless steel.

Key words Aluminum alloy, Laser welding, Keyhole, Threshold interval, Process parameters

0 引言

根据熔池中是否产生了匙孔效应,激光焊可分为热导焊和深熔焊^[1],导致焊接模式转变的特定功率范围称为阈值区间,在此区间内焊接过程非常不稳定,因此必须掌握阈值区间的分布规律,方可在设置焊接参数时得以提前避开。

在减重需求日益迫切的当下,空间推进系统中铝合金组件的占比逐渐增多。此前行业内已对不锈钢、镍合金和钛合金等材料进行了阈值特性研究^[2],但铝合金的激光焊技术仍是当今研究难点和薄弱环节。本文针对铝合金激光焊过程中焊接模式的转变机理进行了研究,达到了量化各类工艺参数对阈值

区间影响规律的目的。

1 实验

实验设备采用两台YAG式激光焊机,型号分别为HL2006D和TruDisk3002,最大功率分别为2和3 kW,光束质量分别为30和8 mm·mrad。

实验件材料为5A06铝镁系铝合金,配合形式为平板对接。实验件焊前进行碱洗、烘干和刮削处理,焊接质量按照航天企业标准Q/RJ71—2000的I级要求进行控制。

2 结果与讨论

2.1 焊接速度的影响规律

将离焦量设为0(即表面焦),保护气种类设为氩

收稿日期:2020-09-19

第一作者简介:宋凡,1989年出生,高工,研究领域为空间推进系统焊接技术。E-mail:songfanfyy@163.com

气,吹送方式设为 45° 旁轴前吹,吹气速度设为 15 L/min ,入射角设为仰 4° (防反射),并固定以上参数不变。以 100 W 为步进增加激光功率(P),分别在4种焊接速度下进行焊缝成形实验,相应的熔深(D)变化曲线见图1(a)。4条曲线都在局部出现了陡升形态,此处即是热导焊向深熔焊进行焊接模式转变的功率阈值区间。考虑到前3条曲线都在 $1500\sim 1600\text{ W}$ 完成了陡升过程,无法区分先后顺序,因此以 50 W 为步进再次进行细化实验,结果见图1(b)。

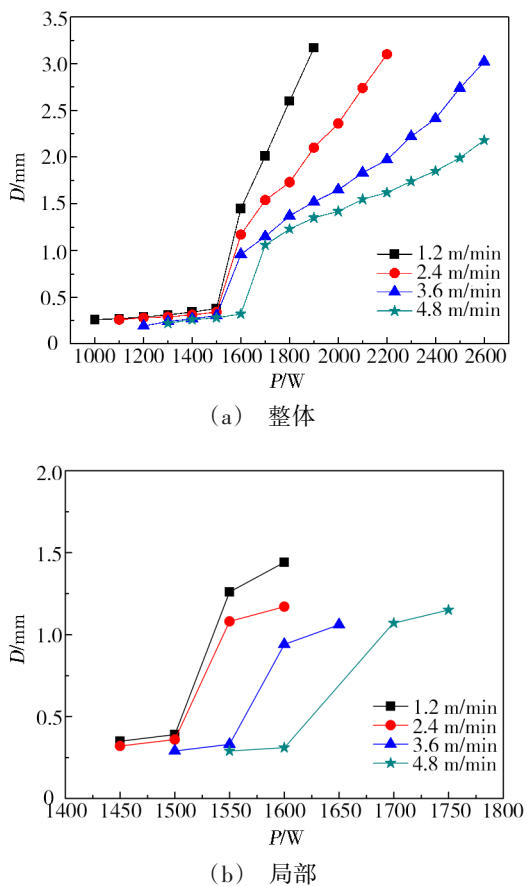


图1 焊接速度对焊缝熔深的影响规律

Fig. 1 Influence of speed on weld penetration

记录汇总阈值区间中值和宽度,可得图2所示的阈值区间(T_h)-焊接速度(v)关系曲线。当焊接速度从 1.2 m/min 增至2倍时,阈值区间的中值和宽度保持不变;当速度增至3倍时,中值增加了约 3.3% ,宽度保持不变;当速度增至4倍时,中值增加了约 8.2% ,宽度从 50 W 增至 100 W 。整体而言,铝合金激光焊阈值区间受焊接速度的影响很小。针对这种现象,有研究^[3-4]模拟得到匙孔深度随时间的变化曲线,结果显示匙孔增长至极限深度的 50% 仅需不到 1 ms ,因此对于常用的焊接速度区间来说,光束移动速度远慢于匙孔成形速度,即焊接速度对匙孔的形成几乎无影响,而工件表面所吸收到的激光功率密度(激光功率/光斑面积)是匙孔成形唯一决定因素。

此前对不锈钢、镍合金和钛合金进行了研究,结果表明三者阈值区间受焊接速度的影响程度可达

$50\% \sim 55\%$,且整体分布在 $500\sim 900\text{ W}$ 的小功率范围内,如图3所示。

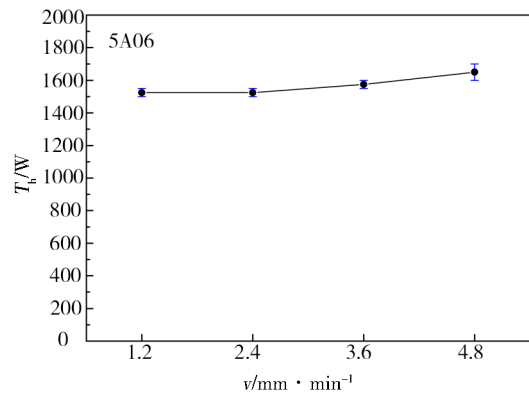


图2 焊接速度对阈值区间的影响规律

Fig. 2 Influence of welding speed on threshold interval

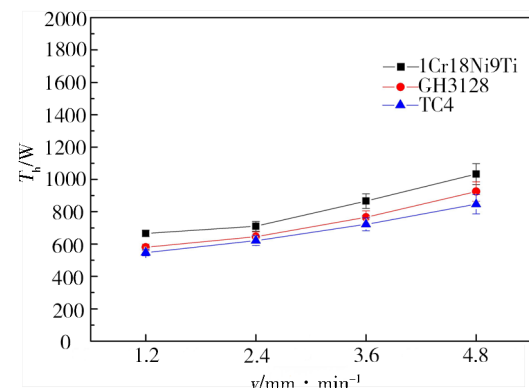


图3 焊接速度对阈值区间的影响规律

Fig. 3 Influence of welding speed on threshold interval

分析认为,形成匙孔所需的能量密度和母材化学元素的沸点负相关^[5]。由于铝的沸点显著低于铁、镍和钛,因此铝合金的阈值区间应较低。但铝对激光的反射率和导热率远高于后三者,导致铝合金母材吸收和存留热量的能力极差,从而使其升温、熔化和汽化过程所需的激光功率显著提高,最终表现为阈值区间高出近3倍。与此同时,有人对匙孔受力模型进行了分析^[6],结果表明金属蒸气逸出时的反冲力 p_v 是产生并维持匙孔的动力(p_v 取决于金属蒸气压),而液态金属的表面张力 p_σ 、静态重力 p_g 和动压力 p_h 是促使匙孔消失的阻力(其中 p_g 、 p_h 远小于 p_v 、 p_σ),当动力和阻力趋向平衡时匙孔形态保持稳定。由于铝的蒸气压远高于铁、镍和钛,而表面张力又显著低于后三者,因此铝合金熔池匙孔的扩展动力远大于闭合阻力,此时即使光束移动速度加快,致使蒸气产生量减少,但剩余蒸气的反冲力仍足够产生并维持匙孔,表现为焊接速度对阈值区间的影响极小。

2.2 离焦量的影响规律

激光束的纵截面形态与双曲线近似,当工件在双曲线束腰附近进行上下移动(即变动离焦量)时,工件表面的光斑面积会按二次曲线的规律变化^[7],最终改变了熔池表面的激光功率密度。

固定其他参数不变,在5种离焦量下变动功率进行焊接实验,所得熔深变化曲线如图4所示。记录汇总阈值区间中值和宽度,可得图5所示的阈值区间-离焦量(Z)关系曲线。

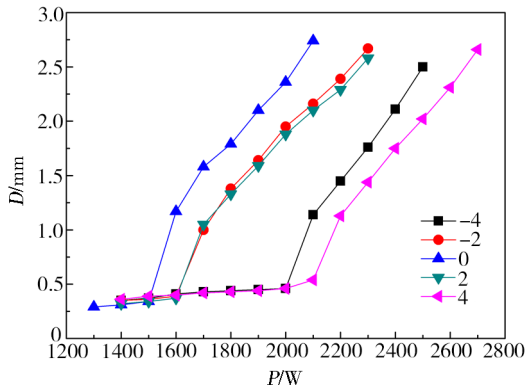


图4 离焦量对焊缝熔深的影响规律

Fig. 4 Influence of defocus on weld penetration

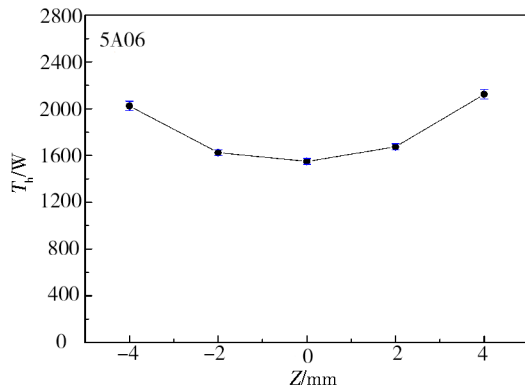


图5 离焦量对阈值区间的影响规律

Fig. 5 Influence of defocus on threshold interval

离焦量为零时阈值区间中值最小,离焦量绝对值越大则阈值区间中值越大;当离焦量增加2 mm时,阈值区间中值增加了6%~8%,当离焦量增加4 mm时,阈值区间中值增加了25%~30%,但阈值区间宽度基本不变。分析认为,离焦量为零时工件表面的光斑面积最小,激光功率密度 E_k 可以达到最大值,熔池金属更快地被加热汽化,从而能更早地产生深熔焊所必需的匙孔。当离焦量往正或负向逐渐增长时,工件表面的光斑面积都相应增大,这必然导致功率密度的同步下降^[8],从而减缓金属汽化以造就匙孔的速度,最终造成深熔转变的阈值区间不断提高。

此前对不锈钢进行了相同类型的研究,结果显示离焦量对阈值区间的影响规律与铝合金高度相似,区别是不锈钢的变化相对幅度较大,在离焦2/4 mm时阈值区间中值分别提高15%~20%/45%~80%(图6)。

分析认为,匙孔主要依靠逆韧致吸收和菲涅尔吸收这两种机制来吸收激光能量以维持存在,逆韧致吸收指激光能量被匙孔内喷出的金属蒸气及其电离出的等离子体吸收,菲涅尔吸收指激光能量在匙孔内多次反射时被孔壁的液态金属吸收。有研究^[9]

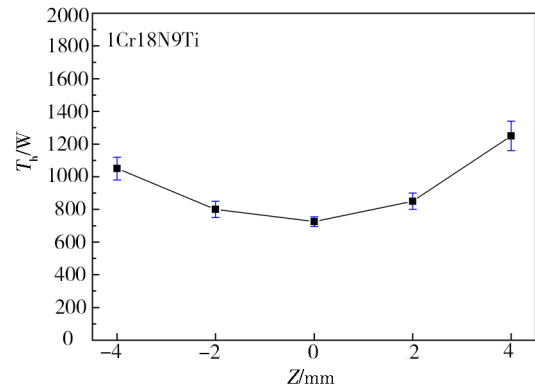


图6 离焦量对阈值区间的影响规律

Fig. 6 Influence of defocus on threshold interval

称在铝合金激光深熔焊时逆韧致吸收比菲涅尔吸收更有效,这与不锈钢和镍合金等材料正好相反。一般来说,逆韧致吸收主要发生在匙孔口位置,与光束的反射路径基本无关;而菲涅尔吸收则依赖于光束的反射路径,且发生在孔口以下的一定距离,因此以逆韧致吸收为主的铝合金匙孔受离焦量变化的影响更小,表现为阈值区间在离焦量改变2 mm时仅提高6%~8%左右。

除此之外,5A06铝合金中含有约7%的Mg、Zn低沸点合金元素,当铝合金母材受到激光加热时,一旦表面温度超过了Mg、Zn的沸点,这两种合金元素就会立即汽化,在铝合金表面形成初始的匙孔坑,有利于最终匙孔的快速成形。在离焦量发生改变时,激光束的能量密度明显减小,其汽化高沸点元素(如Fe、Ni)的能力明显下降,但汽化低沸点元素(如Mg、Zn)的能力基本不变,导致铝合金初始成孔所需的激光功率密度很容易达到,最终表现为阈值区间受离焦量的影响很小。

2.3 光束质量的影响规律

光束质量的细分指标包括焦点光斑直径(D_0)和远场发散角(θ_0)两类,已有两台焊机(HL2006D/TruDisk3002)的焦点光斑直径和远场发散角分别为0.45、0.54 mm和267、59 mrad,即前者较为发散但焦斑面积略小,后者较为平直但焦斑面积略大。

前两节数据为TruDisk3002焊机所得,现固定其他参数不变,在HL2006D焊机上同样以5种离焦量进行焊缝成形实验,相应的熔深变化曲线如图7所示。记录汇总此时的阈值区间中值和宽度,可得如图8所示的阈值区间-离焦量关系曲线。

对比图4、图5、图7、图8可知,实焦焊模式下HL2006D焊机阈值区间更靠近低功率区;虚焦焊模式下TruDisk3002焊机阈值区间更靠近低功率区。分析认为,在实焦焊模式下,由于HL2006D焊机的焦点光斑面积更小,因此在达到同等功率密度时所需的激光功率更小,即阈值区间稍低。在虚焦焊模式下,由于TruDisk3002焊机的光束发散角更小,因此

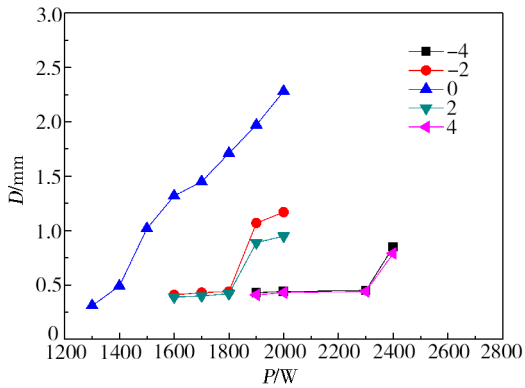


图7 离焦量对焊缝熔深的影响规律

Fig. 7 Influence of defocus on weld penetration

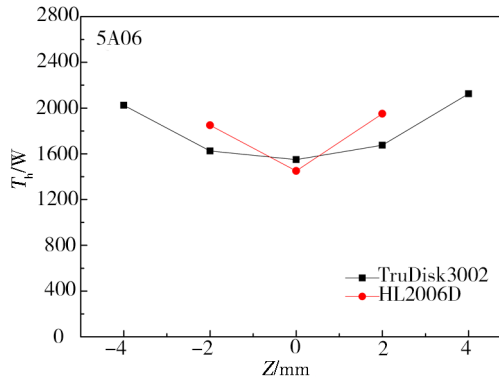


图8 离焦量对阈值区间的影响规律

Fig. 8 Influence of defocus on threshold interval

当两者的离焦量相同时,其作用于工件表面的光斑面积更小,故阈值区间更低。

此前对不锈钢进行了相同类型的研究,结果显示光束质量对阈值区间的影响规律与铝合金大致相似,区别是前者的变化幅度稍大,在相同离焦 2 mm 时阈值区间中值相差约 26%,相较而言铝合金相差约 16%,如图 9 所示。

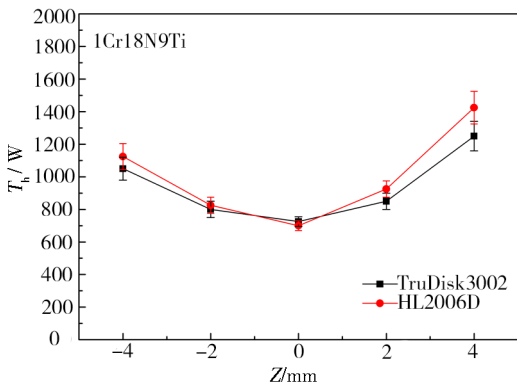


图9 离焦量对阈值区间的影响规律

Fig. 9 Influence of defocus on threshold interval

2.4 入射角的影响规律

光束入射角定义为入射光轴线与工件表面法线的夹角,即光束垂直入射到工件表面时入射角为 0° 。若定义光束前倾时入射角为正(俯角),则光束后仰时入射角为负(仰角)。固定其他参数不变,以 4° 为步进改变入

射角进行焊缝成形实验,相应的熔深变化曲线如图 10 所示。记录汇总此时的阈值区间中值和宽度,可得图 11 所示的阈值区间-入射角(I_A)关系曲线。

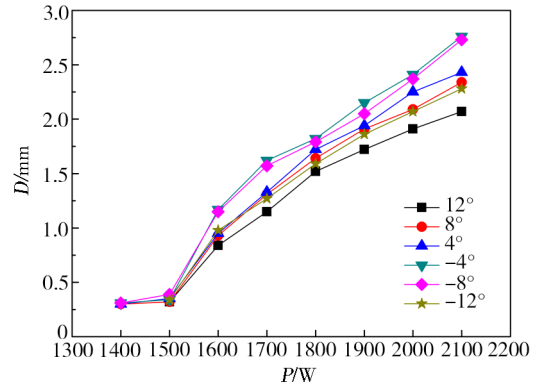


图10 入射角对焊缝熔深的影响规律

Fig. 10 Influence of incident angle on weld penetration

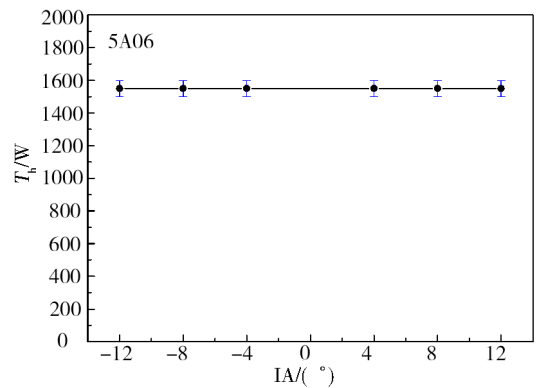


图11 入射角对阈值区间的影响规律

Fig. 11 Influence of incident angle on threshold interval

在 $-12^\circ \sim 12^\circ$ 范围内,阈值区间不受入射角变化的影响。分析认为,仅改变入射角而不改变离焦量时,工件表面的圆形光斑会转变为椭圆形,但当入射角的变化范围较小时,圆形光斑和椭圆形光斑的面积差距极小,基本不影响激光功率密度,因此深熔转变行为不变,即阈值区间保持恒定。

此前对不锈钢进行了相同类型的研究,结果显示入射角对阈值区间的影响规律与铝合金完全相同,见图 12。

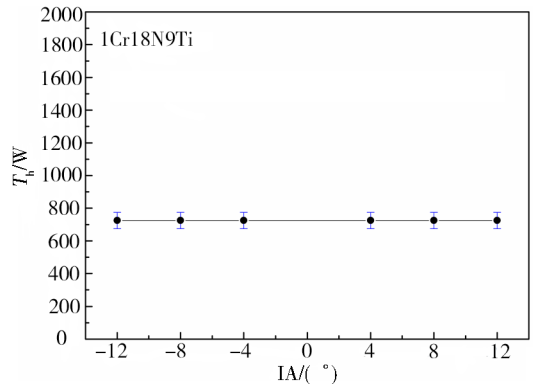


图12 入射角对阈值区间的影响规律

Fig. 12 Influence of incident angle on threshold interval

2.5 保护气的影响规律

对于旁轴保护气,根据喷嘴摆放位置可分为后吹、前吹和侧吹3种吹气方向模式。

选定某种吹气方向,如后吹模式,改变吹气速度进行对比实验,所得焊缝的熔深变化曲线如图13所示。固定吹气速度(15 L/min)和其他工艺参数不变,分别在3种吹气方向下进行对比实验,所得焊缝的熔深变化曲线见图14。记录汇总此时的阈值区间中值和宽度,可得图15、图16所示的阈值区间-吹气速度(F_v)关系曲线和阈值区间-吹气方向关系曲线。

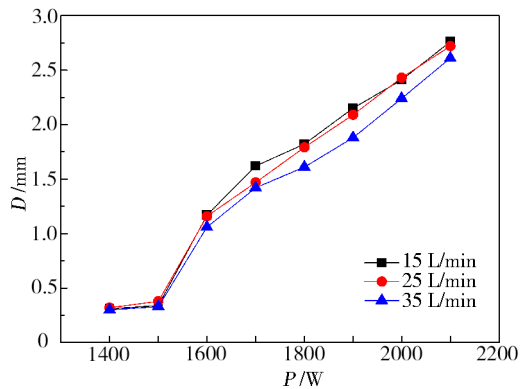


图13 吹气速度对焊缝熔深的影响规律

Fig. 13 Influence of flow velocity on weld penetration

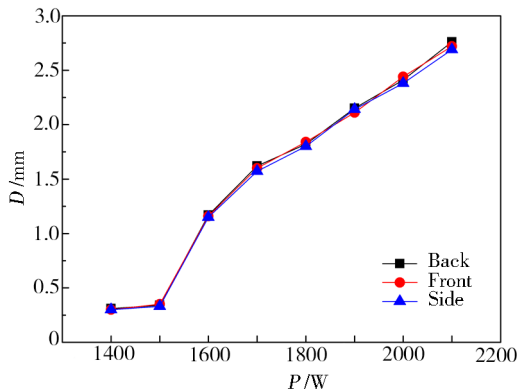


图14 吹气方向对焊缝熔深的影响规律

Fig. 14 Influence of flow direction on weld penetration

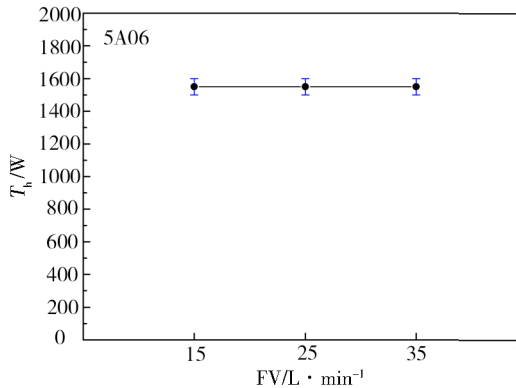


图15 吹气速度对阈值区间的影响规律

Fig. 15 Influence of flow velocity on threshold interval

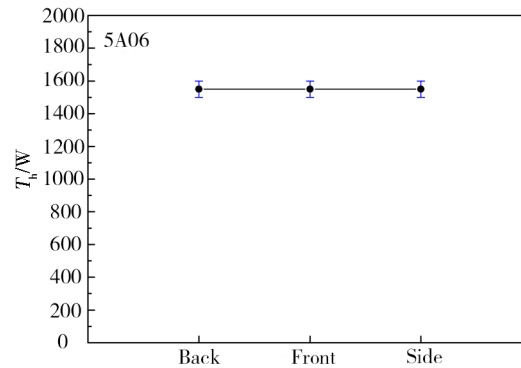


图16 吹气方向对阈值区间的影响规律

Fig. 16 Influence of flow direction on threshold interval

吹气方向和吹气速度对阈值区间无可见影响。分析认为,激光在焊接过程中会持续地电离从熔池内喷出的金属蒸气,此过程会消耗部分的激光能量,且产生的等离子体会同未电离的金属蒸气一起使激光产生散射,导致激光的焊接能力发生一定程度的降低^[10]。当吹气速度逐渐增大时,金属蒸气能被更快地吹走,导致其散射激光的能力逐渐减弱,故应使激光的熔化能力有所加强。但有研究称YAG激光形成等离子体的临界功率密度比CO₂激光高两个数量级,在YAG激光焊接时,熔池区的光谱分布呈连续态,说明此时几乎不产生等离子体^[11],也就是电离耗能和等离子散射的不利影响基本不存在,最终造成值区间与吹气速度基本无关。与此同时,由于工件为平板形,因此吹气方向的变化不会导致气流形态发生改变,不改变熔池内气体的逸出行为,因此阈值区间不受影响。

此前对不锈钢进行了相同类型的研究,结果显示吹气方向同样对阈值区间无影响,但增加吹气速度会降低阈值区间中值,如图17、图18所示。

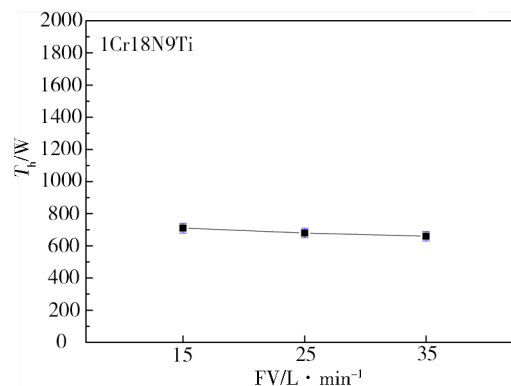


图17 吹气速度对阈值区间的影响规律

Fig. 17 Influence of flow velocity on threshold interval

分析认为,在同样进入最稳定的+3价阳离子模式下,铝元素所需的电离能大约是铁元素的93% (2744 kJ/mol:2957 kJ/mol),即两者在同一激光功率下形成等离子体的程度大致相同。考虑到铝合金深熔

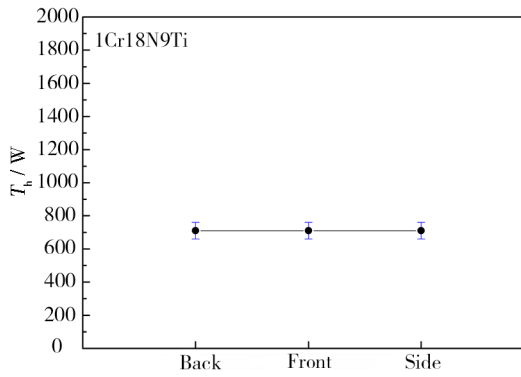


图 18 吹气方向对阈值区间的影响规律

Fig. 18 Influence of flow direction on threshold interval

转变的功率比不锈钢高约 2.5 倍,因此同样处于阈值区间附近时,不锈钢熔池匙孔上方的等离子体显著多于铝合金,故当吹气速度逐渐增大时,不锈钢金属蒸气及等离子体能被更快地吹走,降低了蒸气吸能和等离子体散射的不利影响,最终造成阈值区间与吹气速度呈负相关。

3 结论

(1) 与不锈钢、镍合金和钛合金类似,铝合金激光焊阈值区间与焊接速度同样成正向关系,但其区间中值高出前 3 者近 3 倍,且受速度的影响程度仅为前 3 者的 1/6~1/7 左右。

(2) 铝合金激光焊阈值区间与离焦量绝对值呈正相关,但相较于不锈钢、镍合金和钛合金,离焦量的影响程度仅为前 3 者的 1/3~1/4 左右,且正离焦和负离焦的区别很小。

(3) 光束质量影响铝合金激光焊阈值区间,光束的焦斑直径越小,实焦焊时阈值区间中值越小;光束的发散角越小,相同离焦量下阈值区间中值更小。

(4) 在 $-12^\circ \sim 12^\circ$ 范围内,铝合金激光焊阈值区间与入射角无关。

(5) 保护气的吹送方向和流量基本不改变铝合金激光焊阈值区间。

参考文献

[1] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京:科学出版社,2005:64-65.

CHEN Y B. Modern laser welding technology[M]. BeiJing: Science Press, 2005: 64-65.

[2] 宋凡,张祎玲,林嘉伟,等. 空间发动机激光焊功率阈值研究[J]. 火箭推进,2018,44(4):40-46.

SONG F, ZHANG Y L, LIN J W, et al. The studies of power threshold in laser welding for engines in space propulsion [J]. Rocket Propulsion, 2018, 44(4): 40-46.

[3] 庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

Pang S Y. A study on the transient keyhole and moving weld pool behaviors and mechanisms of deep penetration laser welding [D]. WuHan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[4] 陈涛,王智勇,肖荣诗,等. 脉冲激光焊接的数学模型[J]. 焊接学报,2001,22(2):9-14.

CHEN T, WANG Z Y, XIAO R S, et al. Mathematical model of pulsed laser welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2001, 22(2): 9-14.

[5] 杨璟. 铝合金激光深熔焊接过程行为与缺陷控制研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.

YANG J. Study on the process behavior and defects control during laser deep penetration welding of aluminium alloy [D]. BeiJing: BeiJing University of Technology, 2011.

[6] 段爱琴. CO₂激光深熔焊不稳定穿孔过程特征与相关机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

DUAN A Q. A study on the character and mechanism of penetration keyhole instability in co₂ laser welding [D]. WuHan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[7] 韩宁. 激光深熔焊接阈值特性研究[D]. 北京:北京工业大学,2007.

HAN N. The study on the threshold characterization for laser penetration welding [D]. BeiJing: BeiJing University of Technology, 2007.

[8] 陈虹. 激光光束质量对光束传输聚焦和加工质量的影响[D]. 北京:北京工业大学,2006.

CHEN H. Influence of beam quality on propagation and focus of laser beam and quality of laser materials processing [D]. BeiJing: BeiJing University of Technology, 2006.

[9] 程元勇. 激光深熔焊接铝合金孔内等离子体的反韧致辐射吸收研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.

CHENG Y Y. A study on inverse bremsstrahlung absorption of keyhole plasma during deep penetration laser welding of aluminum [D]. ChangSha: University of HuNan, 2012.

[10] 臧昊. 2024 高强铝合金高功率 CO₂ 激光焊接性研究 [D]. 上海:上海交通大学,2013.

ZANG H. Research on the weldability of 2024 high strength aluminum alloy using high power co₂ laser [D]. ShangHai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[11] 金湘中. 激光深熔焊接小孔效应的理论和试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2002.

JIN X Z. A theoretical and experimental investigation on keyhole effects in deep penetration laser welding [D]. ChangSha: University of HuNan, 2002.