

铝合金 T 型接头双侧激光焊接气孔缺陷影响规律研究

杨志斌,李浩哲,王 斌,陈禹昕

(大连交通大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要: 气孔缺陷是铝合金 T 型接头双侧激光焊接面临的主要问题,基于其工艺特点,文中系统研究了表面处理状态、光束入射角度、焊接速度、热输入和光束间距对气孔缺陷的影响规律。研究表明:铝合金表面保留一定厚度的纯铝包覆层才能最大程度地降低气孔缺陷;采用较大的光束入射角度和较高的焊接速度可以有效降低气孔缺陷,主要原因是小孔上方金属流动趋势由对流变为流向小孔内部更有利于气泡的逃逸;降低焊接热输入和增加光束间距均不利于降低气孔缺陷,造成小孔形状和贯通性改变并引起熔池流动行为的改变是其本质原因,保证双侧小孔对称和贯通才能利于气泡逸出并降低气孔缺陷。

关键词: 双侧激光焊接; T 型接头; 铝合金; 气孔缺陷

中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0906004

Study on the influence rule of porosity defects for double-sided laser beam welding of aluminum alloy T-joint

Yang Zhibin, Li Haozhe, Wang Bin, Chen Yuxin

(School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Porosity defect is the main problem for the double-sided laser beam welding of aluminum alloy T-joints. Based on its technology characteristics, the effects of the surface states, laser incident angles, welding speeds, heat inputs and laser distances on the porosity defects were studied in this work. The results indicate that the pure aluminium cladding layer is beneficial for reducing porosity defects. Using larger laser incident angle and welding speed are good for reducing porosity defects, the reason is that the fluid flow changes from convection to toward to keyhole, which can help pores escape from the weld pool. And, reducing heat input and increasing laser distance are bad for reducing porosity defects, the change of the keyhole shape and fluid flow are the essential reasons. It is necessary to ensure keyhole symmetry and pass-through, which can help the pores escape from the weld pool and reduce the number of the porosity defects.

Key words: double-sided laser beam welding; T-joint; aluminum alloy; porosity defect

收稿日期:2018-04-10; 修订日期:2018-05-20

基金项目:中国博士后科学基金(2017M611213);辽宁省教育厅科学研究一般项目(JDL2016009);先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ-M16-05)

作者简介:杨志斌(1985-),男,讲师,博士,主要从事激光焊接及其数值模拟等方面的研究。Email: yangzhibin@djtu.edu.cn

0 引言

在飞机制造领域,采用新型材料和利用先进连接方法是实现机身轻量化制造、提高生产效率和降低制造成本的有效途径。比强度更高、焊接性更优的新型铝合金逐渐成为机身壁板结构轻量化制造的首选材料,铆接是现阶段普遍采用的连接技术。但是,铆接的工艺特点决定了其增加机身质量和制造成本的同时降低生产效率,而且经过长时间的发展其技术提升所面临的难度也极高^[1]。

激光焊接作为一种先进的连接技术^[2-3],国内外研究人员认为双侧激光焊接因为能够获得成形对称且质量可靠的接头,是可以取代传统铆接的潜在技术^[4]。德国空中客车公司创新性地将激光焊接技术最早取代传统的铆接技术应用在铝合金机身壁板结构的生产制造中,实际应用结果表明可以实现减轻质量、降低成本和提高效率的目标^[5]。鉴于该技术的明显优势,相关研究人员开展了大量的研究工作。Oliveira 等^[6]和 Enz 等^[7]对比研究了双侧激光依次焊接与同步焊接的工艺特性,指出与依次焊接相比,同步焊接因为激光同时加载可以获得完全对称的焊缝成形、焊接变形更小,接头性能更高,同时气孔缺陷数量也相对较少,但因特殊的熔池形状致使其气孔缺陷问题突出。Tao 等^[8]研究结果表明采用较小的前置送丝角度,焊丝熔化后以液桥形式过渡时,可在一定程度上减少气孔缺陷数量。从祁俊峰等^[9]和马旭颐等^[10]研究结果可以发现,T型接头因结构特点,焊接参数稍有波动就会严重影响气孔缺陷形成的几率。焊缝内部的气孔缺陷因容易引起应力集中和减小受力面积而直接降低接头性能,因此,为了减少气孔缺陷数量以获得满足要求的接头,明确铝合金 T 型接头双侧激光焊接焊缝内部气孔缺陷的影响规律就显得尤为重要。

现阶段,关于铝合金 T 型接头双侧激光焊接气孔缺陷影响因素及其控制措施的研究报道相对较少。针对这一问题,文中首先分析气孔缺陷的基本特征,然后重点研究母材表面状态、光束入射角度、焊接速度、热输入和光束间距等对气孔缺陷的影响规律,为优化焊接工艺参数实现减少气孔缺陷数量提

供数据支持和经验借鉴。

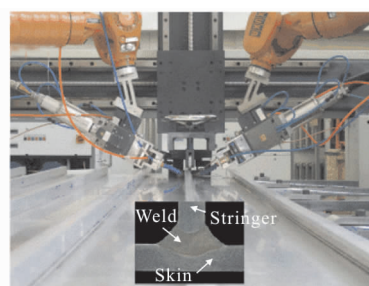
1 试验材料和试验方法

板厚 1.8 mm 的 AA6056 和 AA6156 铝合金作为 T 型接头的蒙皮和桁条母材,直径 1.2 mm 的铝硅焊丝(ER4047)作为填充材料,化学成分如表 1 所示。焊接设备采用 IPG 光纤激光器,波长 1 060 nm,光束半径 0.23 mm,焦距 192 mm,焊接过程中双侧激光束同步实施焊接,为保证焊接过程稳定采用前置送丝方式,且激光束和焊丝在平行于焊接方向的平面内,焊接装置及焊接方法如图 1 所示,采用氩气

表 1 试验母材和焊丝的化学成分(质量分数/%)

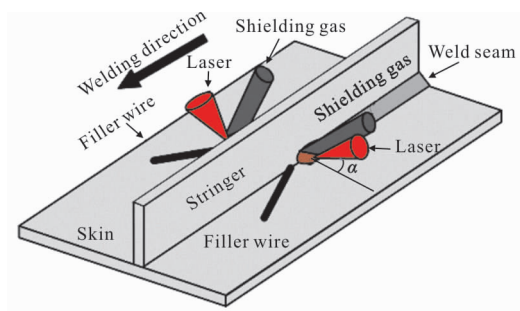
Tab.1 Chemical compositions of the base metals and filler wire(mass fraction/%)

Materials	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Al
AA6056	0.9	1.0	0.9	0.6	-	-	Bal.
AA6156	0.9	1.0	0.8	0.6	0.4	-	Bal.
ER4047	0.01	11.52	<0.01	0.01	0.001	0.2	Bal.



(a) 试验装置

(a) Experimental setup



(b) 焊接方法

(b) Welding method

图 1 试验装置和试验方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup and method

保护熔池,流量为 15 L/min。工艺试验采用的焊接工艺参数如表 2 所示。除研究母材表面状态对气孔缺陷的影响外,其余母材表面在焊前均采用化学清洗的方法处理,目的是去除表面的氧化膜和油污并尽量保留一定厚度的纯铝包覆层。

表 2 工艺试验采用的焊接工艺参数

Tab.2 Welding parameters used in the experimental procedure

Parameter	Symbol	Value
Laser power /kW	P	1.6-3.2
Welding speed/m · min ⁻¹	V_w	3.8-12.0
Wire feeding speed/m · min ⁻¹	V_f	1.5-7.0
Laser incident angle/(°)	α	22-35
Laser distance/mm	D	0-2.0

利用扫描电子显微镜分析气孔缺陷的微观特征,采用 X 射线探伤机检测气孔缺陷数量(焊缝长度 200 mm)。无损检测底片首先经处理转换为电子图像,然后运用 Matlab 软件对图像进行二值化处理,最后提取气孔缺陷的清晰特征。

文中焊接过程流场的数值模拟采用作者前期建立的三维热-流耦合数学模型^[11],该模型综合考虑了表面张力、浮力、中立、反冲压力等驱动力的影响,具体的数学模型、热源模型、控制方程、边界条件、模拟参数和计算方法等参见参考文献[11]。

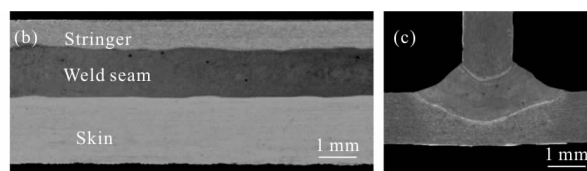
2 试验结果及分析

2.1 气孔缺陷特征

图 2 为铝合金 T 型接头双侧激光焊接焊缝内部气孔缺陷的分布情况。从图中可以看到,焊缝内部的气孔缺陷数量较多,如图 2(a)所示,气孔缺陷大多分布在焊缝上部和中部区域,如图 2(b)和 2(c)所示。从气孔缺陷的尺寸和形状来看,气孔大致可分为两大类:一类是尺寸较小且形状规则(近似于圆形)的气孔,另一类是尺寸较大且形状不规则的气孔。



(a) X 射线检测结果
(a) X-ray test result

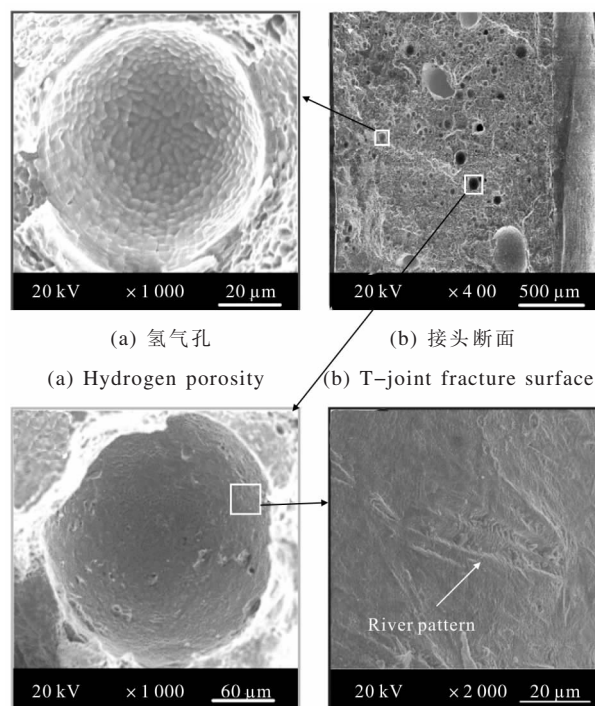


(b) 焊缝纵截面 (b) Lengthwise section
(c) 焊缝横截面 (c) Cross section

图 2 焊缝内部气孔缺陷分布特征

Fig.2 Distribution characteristic of porosity defects in the weld seam

两类气孔缺陷扫描电子显微镜的分析结果如图 3 所示。第一类气孔,在壁面可以看到明显的自由结晶晶胞,如图 3(a)所示,据此判定其为氢气孔,其形成原因主要是因为氢在液态铝中的溶解度远远大于其在固态铝中的溶解度,这导致液态熔池凝固时气泡无法及时逸出形成气孔缺陷^[12-13]。第二类气孔,气孔壁面形成了许多粗糙的阶梯台阶以及少量的不规则凸起,如图 3(c)所示,在局部发现了河流花样的形貌,如图 3(d)所示,这表明气孔的形成受到熔池流



(a) 氢气孔 (a) Hydrogen porosity
(b) 接头断面 (b) T-joint fracture surface
(c) 工艺气孔 (c) Process porosity
(d) 工艺气孔局部特征 (d) Local feature of the process porosity

图 3 气孔缺陷的微观特征

Fig.3 Microstructures of the porosity defects

动扰动的影响明显。第二类气孔的形成原因主要是焊接过程熔池流动剧烈,形成的气泡被禁锢在小孔内无法逃逸,在熔池凝固过程中形成气孔^[14],该类气孔与熔池流动和小孔状态密切相关,文中称之为工艺气孔。这两种气孔缺陷均主要在熔池凝固阶段形成,并受熔池流动状态和小孔形状的影响。

2.2 母材表面状态的影响

为提高铝合金母材适应飞机复杂的飞行环境,其表层包覆了厚约 50 μm 的纯铝,长时间放置其表面存在油污并生成氧化膜。文中采用不同的表面清理方式,去除掉不同厚度的纯铝包覆层,研究包覆层厚度(h)对气孔缺陷的影响规律。在相同工艺条件下: $P=1.8\text{ kW}$ 、 $V_w=3.8\text{ m/min}$ 、 $V_f=2.7\text{ m/min}$ 、 $\alpha=22^\circ$ 、 $d=0\text{ mm}$,母材纯铝包覆层厚度对气孔缺陷的影响如图 4 所示。

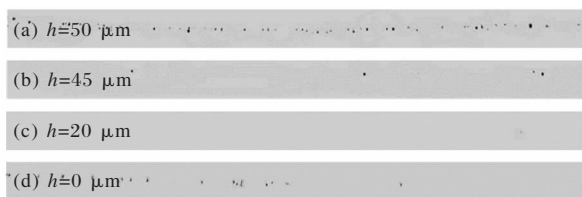


图 4 纯铝包覆层厚度对气孔缺陷的影响

Fig.4 Effects of the pure aluminium cladding layer thicknesses on the porosity defects

从图中可发现,包覆层保持原有状态情况下,气孔缺陷十分严重,并存在生成链状气孔缺陷的风险,如图 4(a)所示,其原因是此时采用的表面处理方式为丙酮擦拭,仅清理了母材表面的油污而氧化膜不能有效去除,氧化膜大大增加了产生气孔缺陷的概率。在去除部分包覆层的情况下,气孔缺陷的数量得到大量的减少甚至完全消除,如图 4(b)和 4(c)所示。而在完全去除包覆层的情况下,气孔缺陷形成的概率又有所增加,如图 4(d)所示,这主要是因为铝合金母材在环境中会再次生成氧化膜,为形成气孔缺陷提供了氢的来源。综上,为抑制气孔缺陷生成的几率,母材表面处理表面油污和氧化膜的同时,不要完全去除纯铝包覆层。

2.3 光束入射角度的影响

文中光束入射角度是指激光束与蒙皮间的夹角,由于受 T 型结构的限制,光束入射角度仅在 $22^\circ\sim 35^\circ$ 之间可调。在相同工艺参数条件下: $P=1.8\text{ kW}$ 、

$V_w=3.8\text{ m/min}$ 、 $V_f=2.7\text{ m/min}$ 、 $d=0\text{ mm}$,光束入射角度对气孔缺陷的影响如图 5 所示。无损检测结果表明,采用较大的光束入射角度更加有利于降低气孔缺陷。分析认为是由熔池和小孔的形状特征决定的,焊接过程中形成了倾斜的熔池和小孔,导致液态金属容易出现塌陷导致小孔出现闭合的概率大大增加,同时气泡在浮力作用下的上浮方向与经熔池和小孔的逸出方向存在夹角,这都大大增加了气泡逸出的难度,并且光束入射角度越小难度越大。因此,随着光束入射角度的增加,气孔缺陷的数量逐渐减少,如图 5(a)~(c)所示。

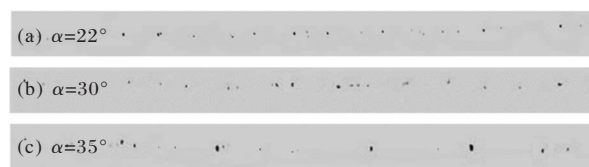
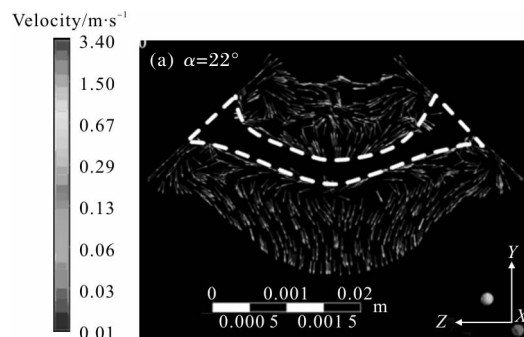


图 5 光束入射角度对气孔缺陷的影响

Fig.5 Effects of the laser incident angles on the porosity defects

不同光束入射角度条件下的熔池横截面的流动行为如图 6 所示,图中矢量表示液态金属流动的方向,虚线表示小孔的几何形状。模拟结果表明,随着光束入射角度的增加,小孔上方液态金属的流动趋势发生了明显的变化。当入射角度 $\alpha=22^\circ$ 时,小孔上方液态金属为对流流动,如图 6(a)所示,而当入射角度 $\alpha=35^\circ$ 时,小孔上方的液态金属最终全部流向小孔位置,如图 6(b)所示,这种改变有利于小孔上方液态金属内的气泡进入小孔,使其经小孔气态通道逸出熔池的可能性大幅度增加。综上,在满足接头成形和结构限制的前提下,应尽可能地采用较大光束入射角度以降低气孔缺陷的数量。



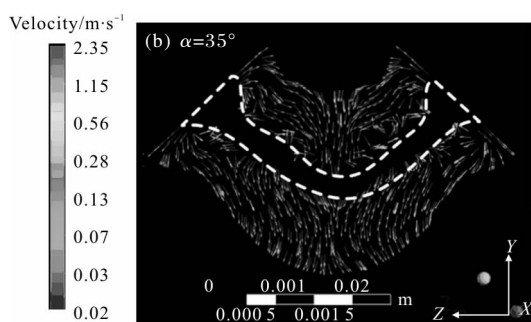


图 6 不同光束入射角度条件下的熔池横截面流动行为
Fig.6 Flow behaviors of cross section with different laser incident angles

2.4 焊接速度的影响

光束入射角度 $\alpha=22^\circ$ 、光束间距 $D=0$ mm 时,焊接速度对气孔缺陷的影响如图 7 所示。从图中可以发现,采用较低的焊接速度时,气孔缺陷比较突出,如图 7(a)所示,当采用中等的焊接速度时,气孔缺陷的数量出现了明显的减少,如图 7(b)所示,当采用较

高的焊接速度时,焊缝内部的气孔缺陷数量最少,在长达 200 mm 的焊缝长度内仅出现 2 个左右的气孔,如图 7(c)所示。这表明,提高焊接速度可以实现有效降低气孔缺陷的目的。

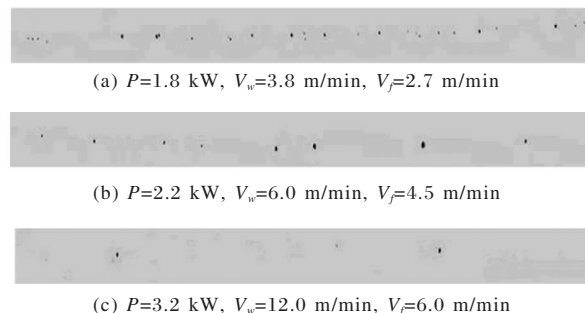


图 7 焊接速度对气孔缺陷的影响
Fig.7 Effects of the welding speeds on the porosity defects

不同焊接速度条件的小孔和熔池流动行为如图 8 所示。可以发现随着焊接速度的提高,小孔壁面的流动变得越来越具有规律性,这表明小孔的稳定性将

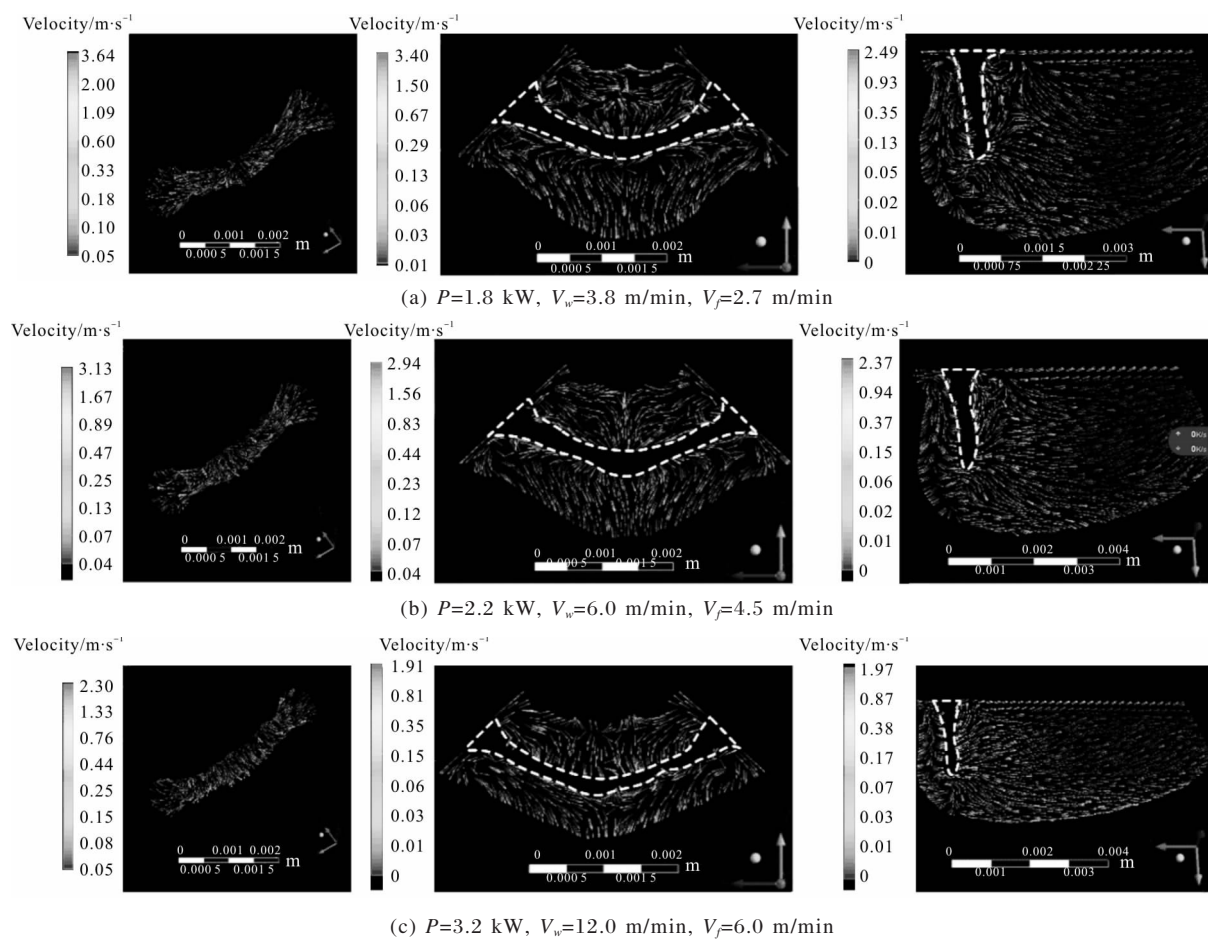


图 8 不同焊接速度条件下的小孔和熔池流动行为

Fig.8 Flow behaviors of the keyhole and weld pool with different welding speeds

会逐渐提高,在横截面上小孔上方对流的流动趋势逐渐转变为流向小孔内部,在纵截面上熔池尾部液态金属的流动趋势由流向熔池底部逐渐向流向熔池表面转变,如图 8(a)~(c)所示。上述因素均有利于液态金属内部的气泡逃逸,减小凝固过程中形成气孔缺陷的几率。提高焊接速度导致小孔稳定性和熔池流动行为的改变,是降低气孔缺陷的根本原因。

2.5 热输入的影响

机身壁板要求背部焊接热影响尽可能的低以保证外观成形美观,因此需要尽可能地采用小焊接热输入。试验发现,在保证光束入射角度 $\alpha=22^\circ$ 、光束间距 $D=0$ mm 的情况下,不同的焊接热输入会对气孔缺陷带来严重的影响,如图 9 所示。从图中可以发现,随着焊接热输入的降低,焊缝内部气孔缺陷的数量增多,严重时会出现链状气孔,这表明焊接热输入

对气孔缺陷的影响要比其他因素更加强烈,如图 9(a)~(c)所示。

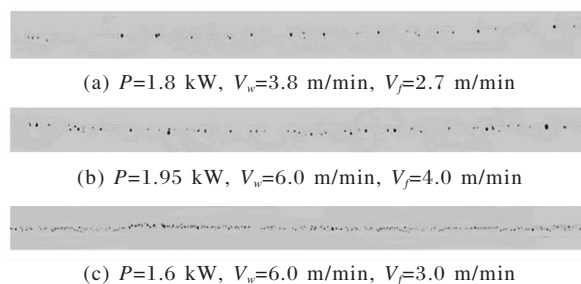


图 9 热输入对气孔缺陷的影响

Fig.9 Effects of the heat input on the porosity defects

不同热输入条件的小孔和熔池流动行为如图 10 所示。计算结果表明,随着热输入的降低,双侧小孔的贯通性变得越来越差,热输入过小时甚至出现了完全分离的小孔状态,小孔尖端的更加容易闭合,且

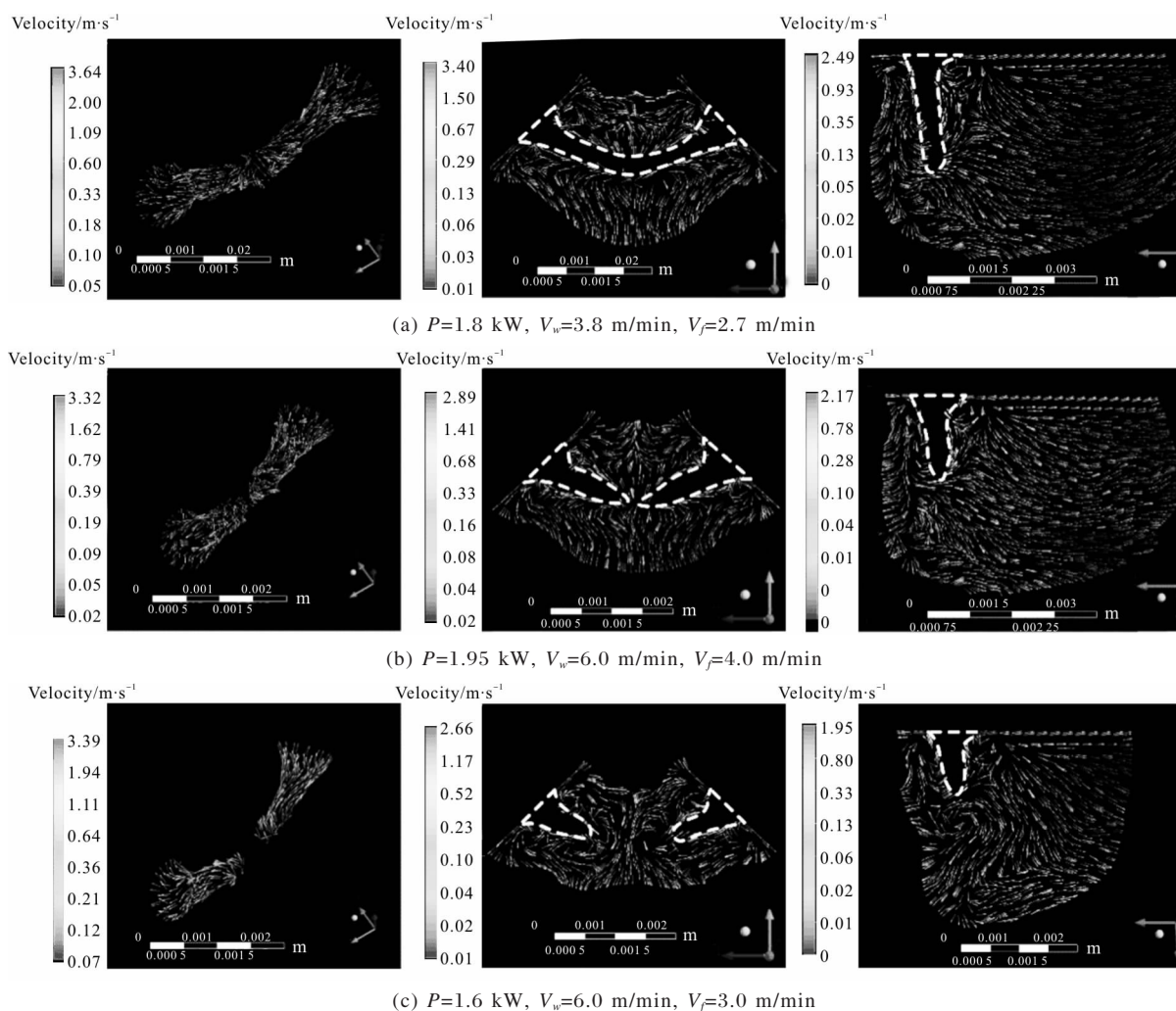


图 10 不同焊接热输入条件下的匙孔和熔池流动行为

Fig.10 Flow behaviors of the keyhole and weld pool with different heat inputs

小孔通道消失,如图 10(a)~(c)所示;熔池横截面的流动行为表明在双侧小孔即将分开的状态时,小孔上方的流动由对流变为完全流向熔池上方,这极大地增加了气泡停留在熔池上方的几率,如图 10(b)所示,当双侧小孔完全分离的状态时,熔池中心出现了强烈的紊流,致使气泡难以逃逸,同时纵截面小孔底部的涡流也变得更加剧烈,如图 10(c)所示,这都是导致热输入降低导致气孔缺陷增加的本质原因。因此,为了降低气孔缺陷,在确定焊接热输入的时候,必须要保证双侧小孔贯通。

2.6 光束间距的影响

光束间距是指双侧激光束在焊接方向上的间距。在相同焊接参数下: $P=1.8\text{ kW}$ 、 $V_w=3.8\text{ m/min}$ 、 $V_f=2.7\text{ m/min}$ 、 $\alpha=22^\circ$,光束对称性对气孔缺陷的影响如图 11 所示。检测结果表明,随着光束间距的增加,气孔缺陷数量整体呈现增加的趋势,但是当 $D < 1.1\text{ mm}$ 时,气孔缺陷的数量变化较小,如图 11(a)和

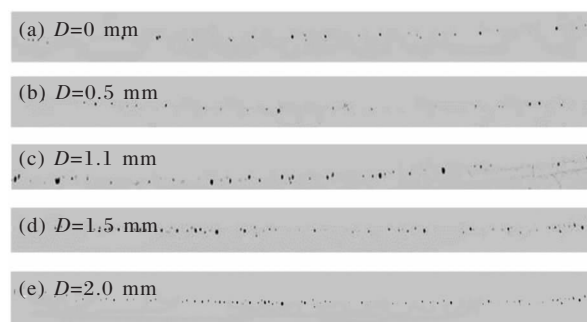


图 11 光束间距对气孔缺陷的影响

Fig.11 Effects of the laser distances on the porosity defects

图 11(b)所示;当 $D > 1.1\text{ mm}$ 时,焊缝内部气孔缺陷的数量呈现出快速增加的趋势,如图 11(c)和图 11(d)所示;当 $D=2.0\text{ mm}$ 时甚至出现了链状气孔的严重情况,如图 11(e)所示。

不同光束间距条件的小孔和熔池流动行为如图 12 所示。计算结果表明,随着光束间距增加,小孔开口位置产生了新的涡流,这会降低其稳定性并导致小孔

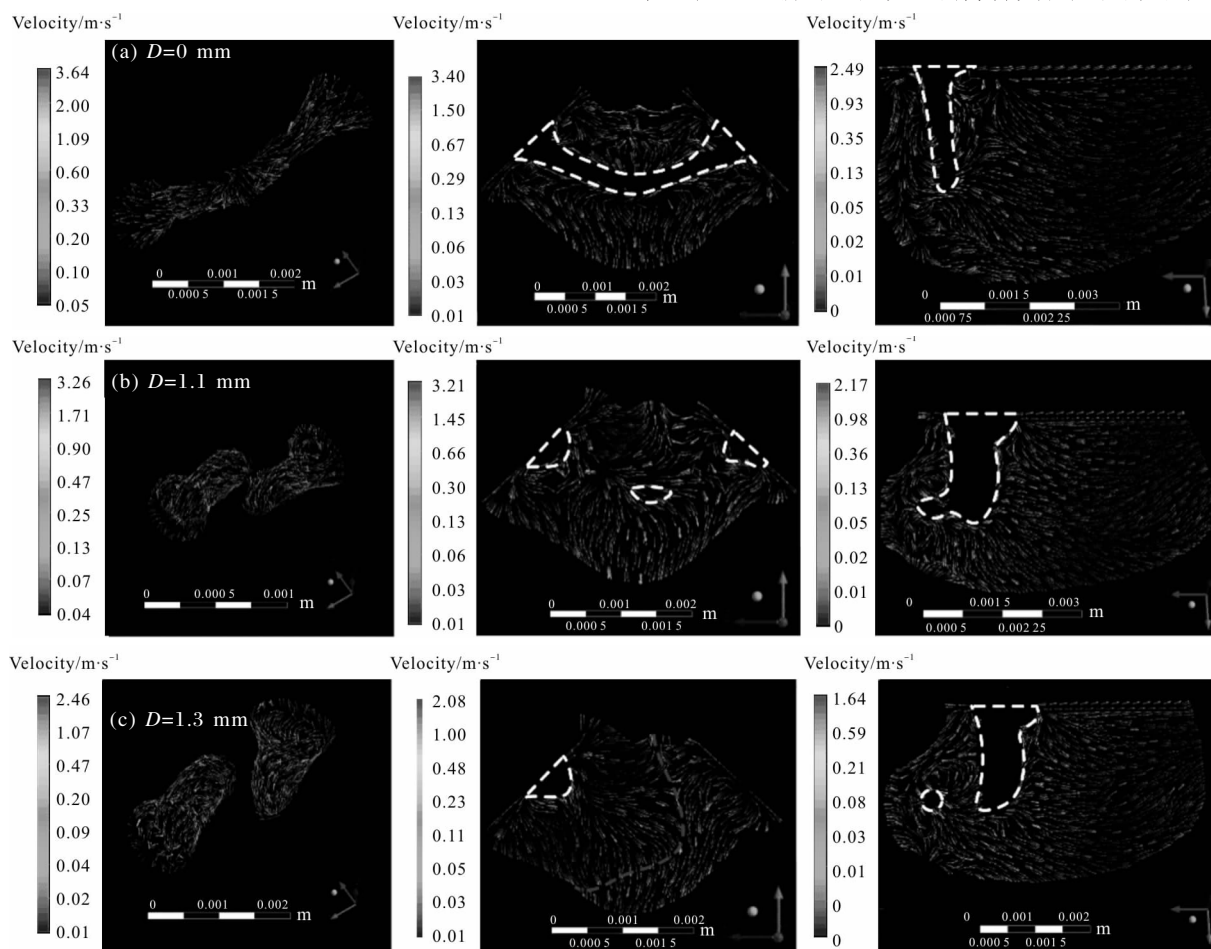


图 12 不同光束间距条件下的小孔和熔池流动行为

Fig.12 Flow behaviors of the keyhole and weld pool with different laser distances

闭合, 双侧小孔完全分离时极度降低气泡通过小孔通道逃逸的可能性, 这将增加气孔缺陷形成的概率; 在截面上还可以发现双侧小孔之间也出现了新的涡流, 光束间距也使气态小孔通道发生弯曲变形甚至完全分离, 如图 12(a)~(c)所示, 这也是将使气泡通过小孔逸出的路径增加和时间增长, 大大增加气泡逃逸的难度。因此, 为了最大可能地降低气孔缺陷数量, 必须严格控制光束间距, 也就是要保证双侧激光束的对称性, 本质上是保证双侧小孔不能完全分离。

3 结论

(1) 铝合金 T 型接头双侧激光焊接的气孔缺陷分为氢气孔和工艺气孔两种, 均受熔池流动和小孔形状的影响。

(2) 采用较大的光束入射角度有利于降低气孔缺陷, 主要原因是小孔上方液态金属的流动趋势由对流变为流向小孔内部。

(3) 提高焊接可有效降低气孔缺陷, 主要原因是提高焊接速度, 小孔变得更加稳定且熔池的流动趋势更有利于液态金属内部气泡的逃逸。

(4) 降低焊接热输入导致双侧小孔不贯通将极大增加气孔缺陷数量, 主要原因是小孔更易闭合, 流动行为更紊乱, 同时气泡无法经小孔逸出。

(5) 光束间距增加致使气孔缺陷数量明显增加, 主要原因是对称性降低使小孔开口和交汇位置出现涡流, 小孔弯曲变形增加气泡的逃逸距离和时间, 加大了气泡禁锢在熔池内的倾向。

致谢:

感谢哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室提供的设备支持。

参考文献:

[1] Siqueira R H M, Capella A, Riva R, et al. Comparing mechanical behavior of aluminum welds produced by Laser Beam Welding (LBW), Friction Stir Welding (FSW) and riveting for aeronautic structures [J]. *Welding International*, 2016, 19: 1-7.

[2] Peng Jin, Zhang Wenjie, Wang Xingxing, et al. Numerical simulation of effect of filler wire melting and filling mode on molten pool in laser welding [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2018, 47(3): 0306005. (in Chinese)

[3] Zhang Xinge, Li Liqun, Chen Yanbin, et al. Process and mechanical properties of laser-resistance hybrid welding for aluminum alloy T-joint [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 138-142. (in Chinese)

[4] Sun Z Q, Chen R, Wu A R. New materials and technology of Chinese civil aircraft [C]//Proc ICAMCS, 2016: 926-930.

[5] Janasekaran S, Jamaludin M F, Muhamad M R, et al. Autogenous double-sided T-joint welding on aluminum alloys using low power fiber laser [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90: 3497-3505.

[6] Oliveira A C, Siqueira R H M, Riva R, et al. One-sided laser beam welding of autogenous T-joints for 6013-T4 aluminium alloy [J]. *Material and Design*, 2015, 65: 726-736.

[7] Enz J, Khomenko V, Riekehr S, et al. Single-sided laser beam welding of a dissimilar AA2024-AA7050 T-joint [J]. *Mater Des*, 2015, 76: 110-116.

[8] Tao W, Yang Z B, Chen Y B, et al. Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects [J]. *Opt Laser Technol*, 2013, 52: 1-9.

[9] Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun, et al. Control of shaping of welds for CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 297-302. (in Chinese)

[10] Ma Xuyi, Gong Shuili, Zhang Jiuxing, et al. Influence of the welding conditions on weld defects in double-sided laser beam welded T-joints of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0203006. (in Chinese)

[11] Yang Z B, Tao W, Li L Q, et al. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during double-sided laser beam welding of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels [J]. *Opt Laser Technol*, 2017, 91: 120-129.

[12] Chen Kai, Yang Wuxiong, Huang Rui, et al. Porosity control of 1420 Al-Li alloy by dual-beam laser welding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 133-137. (in Chinese)

[13] Ma Yanan, Tao Wang, Chen Yanbin. Laser spot welding of LF6 aluminum with double laser beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 707-711. (in Chinese)

[14] Lin R, Wang H P, Lu F, et al. Numerical study of keyhole dynamics and keyhole-induced porosity formation in remote laser welding of Al alloys [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 244-256.