

# 间隙对 5754 铝合金激光填丝搭接焊气孔的影响

王国振<sup>1</sup> 王春明<sup>1</sup> 王 军<sup>1</sup> 杨上陆<sup>2</sup> 胡席远<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

<sup>2</sup>通用汽车中国科学研究院, 上海 201206

**摘要** 气孔是 5754 铝合金激光搭接焊接过程中经常出现的缺陷,它对焊缝的机械性能有很大的影响。实验采用光纤激光器研究了在搭接铝合金板间设置间隙对气孔的影响及其机理,发现,间隙的设置对气孔的逃逸提供了一个通道,气孔率有明显减小的趋势。当间隙从 0 变化到 0.2 mm 时,由于间隙较小而有毛细现象的发生,搭接间隙气孔的逃逸通道被液态焊缝金属的凝固过程封闭,气孔减小并不明显;当间隙从 0.30 mm 变化到 0.75 mm 时,由于间隙增大,间隙部位的焊缝液态金属发生的毛细现象减弱甚至消失,导致这部分金属距离熔合线很近,表面保持液态,气孔逃逸的通道被打开,气孔有明显减小的变化。实验还发现,随着间隙的增大,搭接焊缝的剪切强度有了很大的提高。

**关键词** 激光技术;激光填丝焊接;铝合金;气孔;间隙

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1203001

## Effects of Gap on Porosity during Laser Lap Welding with Filler Wire of Al 5754 Sheets

Wang Guozhen<sup>1</sup> Wang Chunming<sup>1</sup> Wang Jun<sup>1</sup> Yang Shanglu<sup>2</sup> Hu Xiyuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

<sup>2</sup> GM China Science Laboratory, Shanghai 201206, China

**Abstract** Defect of the porosity always occurs during laser welding of 5754 aluminum alloy and has a lot of bad influence on its mechanical property. Effects of the gap between two lap welding sheets on the porosity have been studied using fiber laser to weld 5754 aluminum alloy. It is found that setting a proper gap between two sheets can provide a passage for the escape of the porosity and decrease the porosity rate. When the gap changes from 0 to 0.2 mm, because of the capillary phenomenon, the escaping passage is closed by the solidification of the liquid weld metal, and the porosity decreases little. When the gap changes from 0.30 mm to 0.75 mm, the capillary phenomenon of the liquid weld metal between the gap weakens. So this part of weld metal is close to the fusion line and keeps liquid state. Then the escaping passage is opened and the porosity decreases obviously. It is also found that as the gap increases, the shear stress increases a lot.

**Key words** laser technology; laser welding with filler wire; aluminum alloy; porosity; gap

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 160.3900

## 1 引 言

采用轻质铝合金材料代替传统钢材使得车身轻量化,是当今世界各大汽车制造商普遍采用的降低油耗、节能减排的方法<sup>[1]</sup>。针对铝合金的焊接,传统

的焊接方式主要为钨极氩弧(TIG)焊、惰性气体熔化极电弧(MIG)焊<sup>[2]</sup>等。这些传统的铝合金焊接方法不仅效率低下,而且所获得的铝合金焊缝接头有大量气孔等缺陷,导致焊接接头质量较低。激光焊

**收稿日期:** 2012-06-07; **收到修改稿日期:** 2012-08-10

**作者简介:** 王国振(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: wangguozhen2046@yahoo.com.cn

**导师简介:** 王春明(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: cmwang@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

接具有焊接速度快、热输入量小、焊接质量高等优点,在欧美国家已经应用于汽车等工业领域<sup>[3~6]</sup>。

气孔是铝合金激光焊接过程中的一个非常严重的问题,它会极大恶化焊缝的机械性能,尤其是拉伸性能,而对这些性能影响最大的是焊接过程中形成的工艺气孔。所谓的工艺气孔,尺寸一般大于1.0 mm,形状不规则,内壁呈粗糙的阶梯状台阶,有明显的机械扰动痕迹,是激光焊接工艺下一种特有的气孔。工艺气孔的形成与熔池中匙孔的稳定性密切相关<sup>[7]</sup>,当熔池剧烈运动,激光所形成的匙孔尖端被熔池的液态金属封闭,被封闭的液态金属中的气体形成气泡,等熔池凝固后便形成工艺气孔。针对如何减小 5000 系铝合金气孔的问题, A. Haboudou 等<sup>[8]</sup>使用脉冲激光焊接,焊前对试样表面进行机械处理、双光束焊接等方法进行堆焊,获得了较低的气孔率;还有学者研究了间隙对铝合金对接气孔的抑

制作用<sup>[9]</sup>。在汽车制造行业中,车身、车门等结构件中搭接接头应用非常广泛,搭接接头中存在间隙是一个很难避免的问题,但是间隙对铝合金搭接焊缝的影响国内却未见报道。本实验采用 4 kW 的 YLR-4000 光纤激光器,选择成分与母材接近的 ER5356 焊丝,研究了不同间隙对 2 mm 厚铝合金激光填丝搭接气孔的影响,并对得到的气孔率变化的机理进行了解释。

## 2 实验准备及方法

### 2.1 实验准备

选用 2 mm 的 5754 铝镁合金板,试样尺寸为 100 mm × 50 mm。填充焊丝为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝。5754 铝合金及焊丝主要化学成分见表 1。

表 1 5754 铝镁合金及 ER5356 焊丝的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 5754 alloy and ER5356 wire (mass fraction, %)

	Mg	Si	Cu	Mn	Ti	Fe	Zn	Cr	Al
5754 / %	2.6~3.6	0.4	0.1	0.5	0.15	\	0.2	0.3	Bal.
ER5356 / %	4.50~5.50	0.25	0.1	0.05~5.50	\	0.4	0.1	0.05~0.20	Bal.

激光器为额定功率 4 kW 的 YLR-4000 光纤激光器,光斑直径为 0.3 mm,功率密度为  $5.66 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ 。光纤激光器激光波长  $1.07 \mu\text{m}$ ,相比气体激光器和其他固体激光器来说波长更短,激光能量更为集中,且更容易被铝合金吸收。送丝设备为 Fronius 公司生产的专用送丝系统,机器人为 ABB IRB4400 专用焊接机器人。焊接过程采用前置送丝,焊丝与试板保持  $30^\circ$  夹角;保护气体为纯氩气,气嘴与试板保持  $45^\circ$  夹角,与试板的距离为 5 mm;激光离焦量为 0,见图 1。

实验试板采用 NaOH 溶液清洗以除去表面的氧化膜,然后用  $\text{HNO}_3$  中和碱液,清水清洗,之后放入烘干炉中烘干,焊前取出,用丙酮进行清洗。实验过程中,焊丝的干伸长度(焊丝伸出送丝枪的长度  $L_s$ )小于 14 mm,激光光斑中心与焊丝末端中心在焊接方向上的距离( $W_x$ )为  $0.45 \sim 0.75 \text{ mm}$ [(焊丝半径)加/减(光斑半径)],以保持焊丝与光束的部分重合,见图 2。

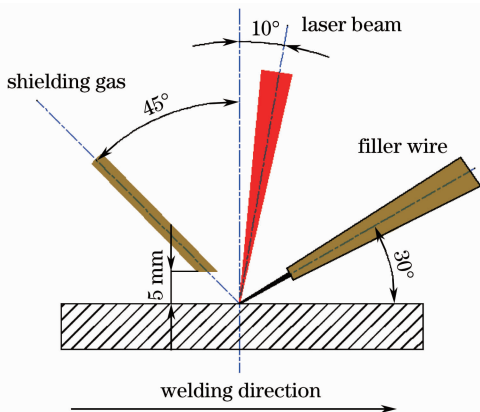


图 1 激光填丝焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser welding with filler wire

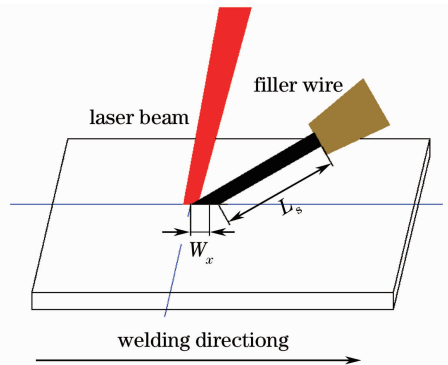


图 2 光纤位置示意图

Fig. 2 Schematic of laser and the filler wire position

### 2.2 实验方法

实验采用搭接的焊接形式,所选焊接参数见表 2。如图 3 所示,在箭头指示处使用塞尺设置间隙,分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.75 mm。将

所得到的试样沿焊缝纵向一边切割,之后用水磨砂纸预磨到焊缝中心,进行抛光、腐蚀,得到如图 4 所示的焊缝纵截面图,对得到的焊缝纵切面图片进行处理,使用软件计算出焊缝中熔深区域面积和工艺气孔面积。研究中,衡量焊缝气孔含量多少采用的是计算中心气孔率(以下简称气孔率)的方法,即纵向焊缝中心截面位置处气孔面积与焊缝熔深面积的比率。本次研究的气孔属于工艺气孔,它的特点是尺寸较大(一般直径大于 1.0 mm),形状不规则,这类气孔相对于尺寸较小的冶金气孔(直径小于 1.0 mm),会影响焊缝的性能。

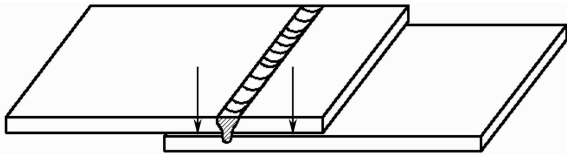


图 3 间隙设置示意图

Fig. 3 Schematic of the gap

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

Power /kW	Welding speed / (m/min)	Filler wire speed / (m/min)	Shielding gas / (L/min)
3.5	2.0	3.0	16.7

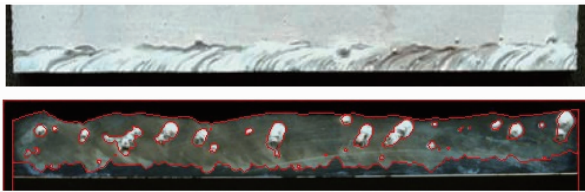


图 4 气孔率的计算方法

Fig. 4 Calculation method of the porosity rate

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 间隙对气孔率的影响

根据上述的实验参数、间隙设置形式以及处理方法,得到在不同间隙条件下 5754 铝合金激光填丝搭接焊缝的纵截面和气孔率间隙关系,分别如表 3 和图 5 所示。

从表 3 可以直观地看出,当间隙从 0 变化到 0.2 mm 时,焊缝中有很多尺寸较大(大于 1.0 mm)的工艺气孔,形状不规则,接近椭圆形,可能是由于此时焊缝中产生的气孔较多,两个或以上的单个气孔在熔池中发生机械扰动碰撞结合而成。当间隙从 0.3 mm 变化到 0.5 mm 时,不规则椭圆形大气孔的数量大幅减小,气孔形状更接近于圆形。当间隙进

一步增加,间隙为 0.75 mm 时,可以明显看出,气孔数量大大减小。从图 5 的间隙-气孔率关系中可以看出,间隙在 0~0.2 mm 时,气孔率维持在 20% 左右;在 0.3~0.5 mm 变化时,气孔率为 10% 左右,降低了一半;间隙进一步增大,气孔率降至 5% 以下。由于工艺气孔的形成主要与工艺参数有关<sup>[9]</sup>,在保证工艺参数,如激光功率、焊接速度、送丝速度等不变的情况下,气泡的产生数量是一样的,因此设置间隙让熔池中产生的大量气泡在熔池凝固前逃逸。由此可以得出,间隙从 0.2 mm 变化到 0.3 mm 时,气泡从间隙逃逸的形式发生了变化。

表 3 焊缝纵截面气孔分布

Table 3 Distribution of the porosity on bead vertical section

Gap /mm	Lengthwise section
0	
0.1	
0.2	
0.3	
0.4	
0.5	
0.75	

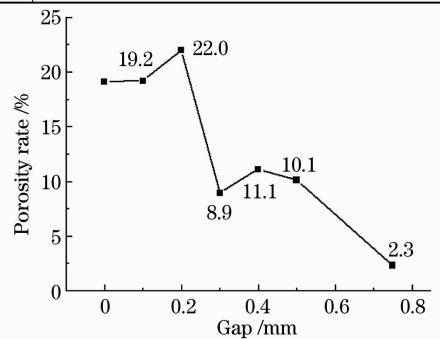


图 5 间隙-气孔率关系

Fig. 5 Relationship between gap and porosity rate

#### 3.2 间隙对气孔率影响的机理

对焊缝进行横截面处理,间隙为 0、0.1、0.2 mm 时的焊缝横截面宏观形貌如图 6(a)~(c)所示,由于焊丝的加入,将激光焊接时焊缝表面烧损的金属填充上,焊缝表面呈上凸起形状。对方框内间隙部分进行微观观察得到图 6(d)~(f),在间隙为 0 时,焊缝在两试板间接触的部分被封闭,焊接过程中液态

焊缝金属和气泡均不能从这个位置逸出；间隙增加到 0.1、0.2 mm 时，焊缝在两试板间接触的部分有一个较小的通道打开，从图 6(e)、(f) 可以看到，在小间隙条件下，焊缝液态金属发生了毛细现象，有一部

分液态金属从焊缝中流出，流出的液态金属由于距离焊缝熔合线较远，温度急剧降低，表面率先凝固，从而将这个通道封闭，阻止了气泡进一步从这部分液态金属中逸出。

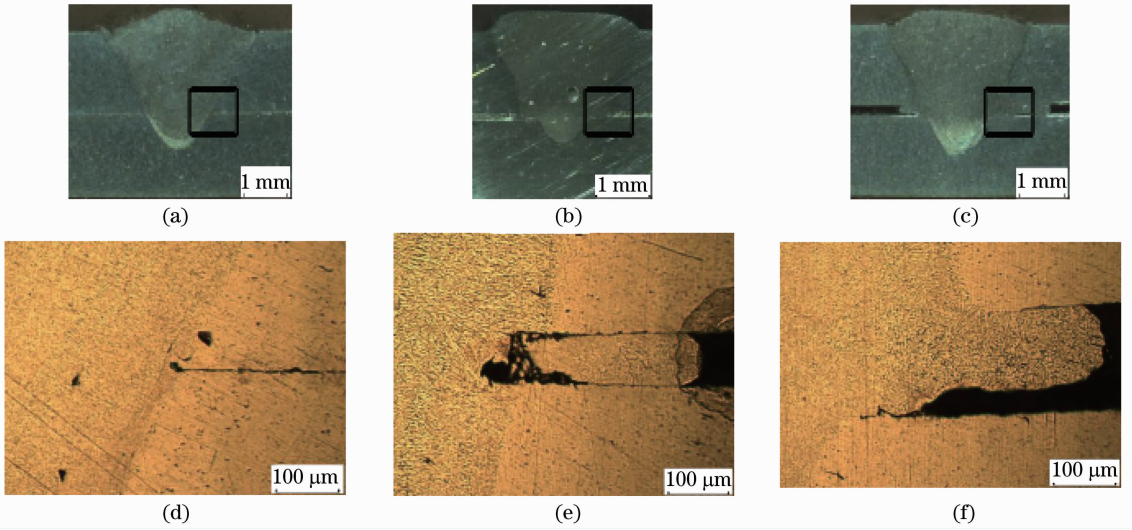


图 6 焊缝横截面形貌。间隙分别为(a),(d) 0; (b),(e) 0.1 mm; (c),(f) 0.2 mm

Fig. 6 Morphology of the bead cross section. The gaps are (a), (d) 0; (b), (e) 0.1 mm; (c), (f) 0.2 mm respectively

间隙为 0.3、0.4、0.75 mm 时焊缝横截面宏观形貌如图 7(a)~(c) 所示，由于间隙进一步的增大，可以观察到焊缝表面开始有下凹的趋势，这会对焊缝表面成形造成不良影响，形成咬边，如图 7(c) 所示。观察焊缝间隙处的微观形貌可以看出，在 0.3 mm 间隙时，虽然焊缝在两试板间的接触部分仍有液态金属逸出，但是由于间隙的增加，间隙中的这部分液态金属毛细现象开始减弱，再加上大量空气

进入这个通道，使得一部分液态焊缝金属被烧损，在下方出现了一个小通道，如图 7(d) 所示；当间隙进一步增加，如图 7(e)、(f) 所示，毛细现象进一步减弱甚至消失，使得在焊接过程中，间隙中的这部分液态金属保持在焊缝熔合线的附近，金属表面保持液体状态，气泡运动到靠近间隙的位置时，就会在内部压力的作用下冲开液体表面张力的束缚发生逃逸，从而使得搭接焊缝的气孔率大大减少。

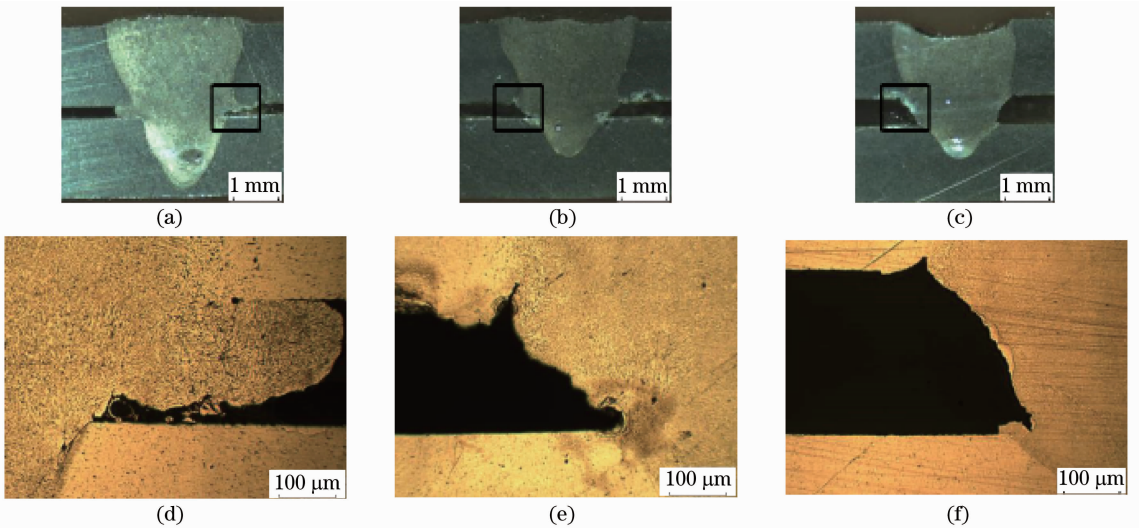


图 7 焊缝横截面形貌。间隙分别为(a),(d) 0.3 mm; (b),(e) 0.4 mm; (c),(f) 0.75 mm

Fig. 7 Morphology of the bead cross section. The gaps are (a), (d) 0.3 mm; (b), (e) 0.4 mm; (c), (f) 0.75 mm, respectively

### 3.3 间隙对搭接焊缝性能的影响

#### 3.3.1 铝合金激光填丝搭接接头的显微硬度

焊缝的显微硬度分布能够为焊接接头的结构变化提供依据,还与焊缝的拉伸性能等有一定的联系。分别沿着焊缝横截面水平和垂直方向测量搭接焊接

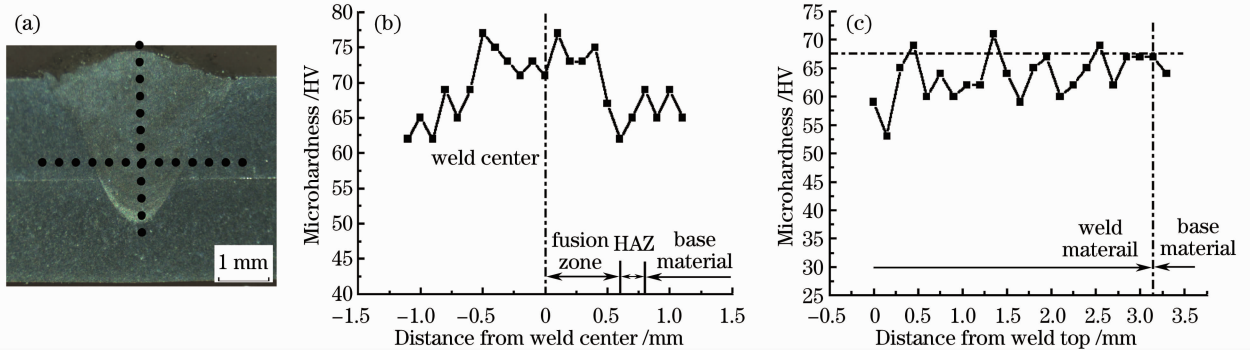


图 8 焊缝显微硬度分布。(a)焊缝截面图;(b)焊缝水平方向显微硬度;(c)焊缝垂直方向显微硬度

Fig. 8 Micro hardness distribution. (a) Section of welding line; (b) microhardness along horizontal direction of welding line; (c) microhardness along vertical direction of welding line

从图 8(b)焊缝水平方向显微硬度可以看出,这个方向上的焊缝显微硬度分布不均匀,最大值(77 HV)出现在焊缝区,最小值(62 HV)出现在热影响区(HAZ),显微硬度由高到低分别为焊缝区、母材区、焊接热影响区。由于激光焊接速度快以及铝合金导热性能较好等原因,焊接热影响区较小,宽度在 0.2 mm 左右,这部分材料发生了软化。而且可以看出,焊缝区沿水平方向分布较为均匀。从图 8(c)焊缝垂直方向显微硬度可以看出,除了焊缝上表面至 0.3 mm 深处的部分材料被软化外,由于焊丝的加入补充了焊接过程中焊缝中容易烧损的 Mg 等元素,使得焊缝上中下各部分的显微硬度分布相对比较均匀。

#### 3.3.2 间隙对搭接焊缝剪切性能的影响

采用 WDW3200 微控电子万能试验机对不同间隙条件下的搭接试样进行剪切实验,实验前将焊接样加工成束腰型剪切样,实验中剪切力与焊缝垂直,如图 9 所示。实验装夹时,在试样两头分别加垫一块 2 mm 厚的试板,使得剪切力与试样能够保持平行,实验结果如图 10 所示。在间隙小于 0.3 mm 时,剪切强度较低;当间隙增加,处于 0.3~0.5 mm 时,剪切强度明显增加,最高可以达到 169 MPa;但是间隙进一步增加后,焊缝强度迅速降低,低于没有间隙时的焊缝强度。从表 4 的断口形貌也可以发现,间隙为 0 和 0.2 mm 时,剪切端口上可以观察到很多工艺气孔,这些工艺气孔直接降低了焊缝的剪切强度;当间隙为 0.3 mm 和 0.75 mm 时,可以发现断口上

接头的显微硬度,如图 8 所示,工艺参数如表 2 所示,间隙为 0,加载载荷为 0.4904 N,保持时间为 10 s。如图 8(a)所示,焊缝水平方向的显微硬度测量位于两试板接触面上方 0.25 mm 处,垂直方向显微硬度位于焊缝中心位置。

的工艺气孔明显减少,而且尺寸也减小很多,这样就可以提高焊缝的剪切强度。

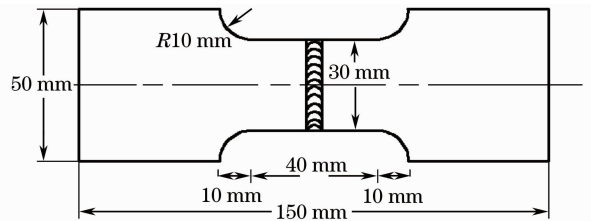


图 9 剪切试样尺寸

Fig. 9 Shear sample size

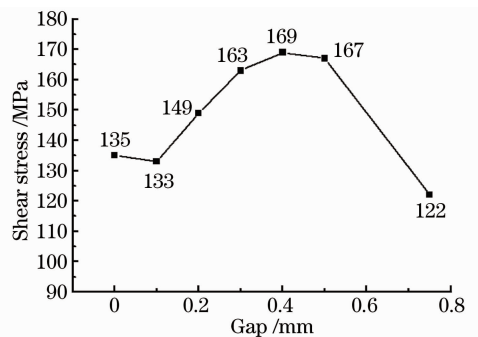


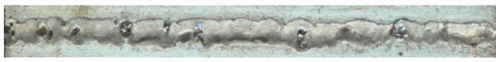



图 10 剪切强度

Fig. 10 Shear stress

从上述分析中可以得出,间隙在 0.5 mm 以下时,剪切强度的结果与气孔率减小的结果有较好的匹配关系,间隙越大,气孔率越小,剪切强度越大。但是当间隙过大,达到 0.75 mm 时,剪切强度只有 122 MPa,低于没有间隙时的焊缝强度。从图 7(c)可以发现,在焊缝间隙为 0.75 mm 时,由于间隙过大,需要有更多的材料来填充两焊接试板之间的空

间,所以即使在填丝的情况下,焊缝上表面仍有下塌咬边的现象。由于在做剪切拉伸实验时,随着试验机向两边不断地施加外力,搭接试样会绕着搭接焊缝位置发生旋转变形,于是产生咬边,这使得此处搭接接头在受力时会产生应力集中,极大地影响了焊缝的力学性能,使焊缝强度降低。另外,当间隙值较大时,由于拉伸实验所垫的 2 mm 板的厚度不够,不能够精确地保证剪切力与试样保持平行,所以此时不是理想的剪切受力状态,这也是影响接头强度的因素之一。

表 4 焊缝断口形貌  
Table 4 Fracture appearance

Gap/mm	Weld fracture
0	
0.2	
0.3	
0.75	

## 4 结 论

主要研究了在搭接焊缝中设置不同的间隙,对焊缝气孔率以及机械性能的影响,并分析了其中的机理,实验发现:

1) 预留一定的间隙有利于减小工艺气孔的形成。当间隙小于 0.3 mm 时,由于焊缝间隙被液态金属的凝固过程封闭,气孔无法逃逸,气孔率较大;当间隙高于 0.3 mm 时,焊缝中气孔可以通过两板间预留的间隙逸出,气孔率明显降低。

2) 预留一定的间隙有利于搭接焊缝剪切强度

的提高。间隙对于焊缝剪切强度的影响与气孔率有较好的匹配关系,间隙越大,气孔率越低,焊缝的剪切强度越高,焊缝的力学性能越好,焊缝强度比不设置间隙时最大提高了 25%;但是当间隙过大,由于出现焊缝成形变差、表面出现咬边等缺陷,使得焊缝力学性能变差。

## 参 考 文 献

- Zhang Mingjun, Chen Genyu, Li Shichun *et al.*. Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603010  
张明军, 陈根余, 李时春 等. 车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603010
- Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min *et al.*. Research on high speed high power CO<sub>2</sub> laser welding of 6061-T6 aluminum with filler wire[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0503001  
翟玉峰, 黄坚, 李敏 等. 6061-T6 铝合金高速高功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊接性的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0503001
- A. F. M. Arif. Effect of input variability on the quality of laser shock processing[J]. *J. Mechanical Science and Technology*, 2009, **23**(10): 2603~2611
- L. Z. Liang, L. J. Hui, S. Y. Sheng *et al.*. Characteristics of complicated AISI316L automobile components manufactured by powder/metallurgy[J]. *J. Mechanical Science and Technology*, 2009, **23**(7): 1924~1931
- L. Quintino, A. Costa, R. Miranda *et al.*. Welding with high power fiber lasers-a preliminary study[J]. *Materials & Design*, 2007, **28**(4): 1231~1237
- T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi *et al.*. A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by process spectroscopic investigation[J]. *Opt. Laser in Engng.*, 2006, **44**(10): 1039~1051
- Y. Yu, C. Wang, X. Hu *et al.*. Porosity in fiber laser formation of 5A06 aluminum alloy [J]. *J. Mechanical Science and Technology*, 2010, **24**(5): 1077~1082
- A. Haboudou, P. Peyre, A. B. Vannes *et al.*. Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, **363**(1-2): 40~52
- Yu Yangchun. Study on the Technology and Filler Wire Melting Dynamics during the Laser Welding with Filler Wire [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010  
余阳春. 激光填丝焊的焊丝熔入行为及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010

栏目编辑: 宋梅梅