

气孔对不同 MIG 焊铝镁合金焊缝凝固裂纹敏感性的影响

陈 毓, 张天理, 于 航, 陈浩欣, 武 雯, 王伟光

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要:为研究铝镁合金焊缝内部气孔对不同 MIG 焊焊缝凝固裂纹敏感性的影响,使用鱼骨型试板测试了 8 种焊接工艺下的焊缝凝固裂纹长度,并分别对焊缝区的微观气孔进行观察。结果表明:双脉冲 MIG 焊焊缝凝固裂纹敏感性普遍大于单脉冲 MIG 焊的,但其焊缝气孔数量却比单脉冲 MIG 焊的少;双脉冲 MIG 焊焊缝凝固裂纹敏感性增大的原因是双脉冲电流的振荡作用使气孔聚集,导致气孔内部气压增大,阻碍了低熔点液相向微观热裂纹的填充。

关键词:铝镁合金; MIG 焊; 焊接工艺; 凝固裂纹; 气孔

中图分类号: TG441.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-4012(2021)05-0031-04

Effect of Porosity on Solidification Crack Sensitivity of Different MIG Welding Al-Mg Alloy Weld Seam

CHEN Yu, ZHANG Tianli, YU Hang, CHEN Haoxin, WU Wen, WANG Weiguang

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the effects of porosity in different MIG welding Al-Mg alloy weld seam on the sensitivity of solidification crack, the lengths of weld seam solidification cracks in 8 welding processes were measured by using fishbone test plate, and the micro porosity in weld zone were observed. The results show that the weld seam solidification crack sensitivity of double pulse MIG welding is generally higher than that of single pulse MIG welding, but the number of weld porosities is less than that of single pulse MIG welding. The reason for the increase of weld seam solidification crack sensitivity in double pulse MIG welding is that the oscillation of double pulse current makes the porosities gather, which leads to the increase of gas pressure in the porosities and hinders the filling of low melting point liquid phase to micro hot cracks.

Keywords: Al-Mg alloy; MIG welding; welding process; solidification crack; porosity

铝合金具有耐腐蚀性能好、力学性能优和密度小等特点,铝合金全焊接结构车体被广泛应用于铁路车辆动车组制造业及城市轨道交通设备制造业中^[1-2]。近些年随着高性能数字处理芯片被用于焊接电源功率的控制中,铝合金焊接电源的性能显著提高^[3],铝合金熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)电源所允许的焊接接头间隙范围也逐渐增大^[4]。在铝合金属脉冲 MIG 焊中,带有脉冲电源的高频脉冲能击

碎铝合金表面的氧化膜,进而减少焊缝中的气孔数量^[5],如在 7A52 铝合金 MIG 焊中,双脉冲接头截面的气孔密度小于 2 个·cm⁻²,而单脉冲接头截面的气孔密度达到 60 个·cm⁻²^[6]。由于铝合金焊缝中的氢原子在熔融态熔池和固态熔池中的溶解度差异较大,氢气孔通常难以避免。

此外,MIG 焊焊缝凝固裂纹敏感性较高也是影响铝合金焊缝质量的主要原因之一^[7-10]。凝固收缩理论认为,随着熔敷金属温度降低,焊缝凝固过程中产生的残余应力不断增大,横向拉伸应变随距焊缝中心距离的增大而减小,并在焊缝中心附近有较大的应力集中,因此在焊接结束后,焊缝中心线区域会立即产生凝固裂纹^[11];CONIGLIO N 等^[12]基于气孔形核理论提出了一种基于气孔的裂纹萌生模

收稿日期: 2021-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51804196)

作者简介: 陈 毓(1994—),男,硕士研究生,主要从事铝合金焊接性及焊接工艺的研究工作,chenyu_weld@163.com

通信作者: 张天理(1985—),男,博士,主要从事焊接冶金及焊接性、焊接材料及工艺、高能束增材制造等工作,zhangtianli925@163.com

型,该模型表明,当气孔内部压力远大于外部熔融铝液的压力时,气孔会导致该处熔融铝液塌陷形成微观热裂纹。

气孔和凝固裂纹是铝合金焊接中常见的缺陷,其中,气孔常被认为与氢原子溶解度有关,凝固裂纹通常被认为仅与焊缝冷却过程产生的凝固收缩有关。而铝镁合金作为广泛应用于汽车车身零件制造的铝合金材料,其焊后产生的凝固裂纹会严重降低汽车的使用性能,因此,笔者以 5052 铝镁合金为研究对象,使用鱼骨型试板测试了 8 种焊接工艺下的焊缝凝固裂纹长度,然后结合焊缝内部微观热裂纹形貌特征对不同焊接热输入(电流)下焊缝的气孔数量进行了分析,最后从气孔形核机理角度分析了气孔在 5052 铝镁合金焊缝凝固裂纹开裂过程中所起的重要作用,研究了铝镁合金 MIG 焊焊缝内部气孔

对凝固裂纹的影响。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

使用 $\phi 1.2\text{ mm}$ 的 ER5356 铝镁合金焊丝焊接 5052 铝镁合金鱼骨型试板,焊丝与试板的化学成分分别符合 GB/T 10858—2008《铝及铝合金焊丝》和 GB/T 3190—2020《变形铝及铝合金化学成分》的技术要求,其化学成分如表 1 和表 2 所示。焊接设备为 YD-550FD 焊机,焊接保护气采用质量分数为 100% 的氩气,单脉冲 MIG 焊焊接参数如表 3 所示。双脉冲 MIG 焊是在单脉冲电流基础上添加一组比单脉冲焊接电流小 60 A 的低脉冲电流,此时单脉冲电流成为双脉冲电流中高脉冲电流,高脉冲电流(单脉冲电流)与低脉冲电流的交换频率为 2 Hz,占空比为 0.5。

表 1 ER5356 铝镁合金焊丝的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical compositions of ER5356 Al-Mg alloy welding wire (mass fraction)											%
元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Zr	Al
标准值	≤0.25	≤0.40	≤0.10	0.05~0.20	4.50~5.50	0.05~0.25	≤0.10	0.06~0.20	≤0.000 3	—	余量
实测值	0.02	0.15	0.01	0.13	5.23	0.11	0.01	0.15	0.010 0	0.01	94.17

表 2 鱼骨型试板的化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical compositions of fishbone test plate (mass fraction)											%
元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Zr	Al
标准值	≤0.25	≤0.40	≤0.10	≤0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	≤0.10	—	—	—	余量
实测值	0.05	0.12	0.01	0.05	2.5	0.27	0.01	0.06	—	—	96.93

表 3 单脉冲 MIG 焊焊接工艺参数

Tab.3 Welding parameters of single pulse MIG welding			
焊接电流/A	焊接速度/ (cm·min ⁻¹)	气体流量/ (L·min ⁻¹)	电流 极性
130	55	16	直流反接(DCEP)
160			
190			
220			

1.2 焊缝凝固裂纹敏感性测试

焊缝凝固裂纹敏感性采用鱼骨型试板进行测试。鱼骨型试板是利用试板上不同长度沟槽形成的不同最大拉应力来测试铝镁合金的凝固裂纹敏感性,鱼骨型试板尺寸示意图如图 1 所示。使用角磨机对试板表面进行打磨,然后将鱼骨型试板固定在如图 2 所示的夹持装置中,对试板进行焊接,焊接后将鱼骨型试板冷却至室温后取出,之后采用渗透探伤法测试焊缝凝固裂纹的长度。焊接时焊接热源在试板上移动,由于熔池凝固产生的热应力会使纵向裂纹沿焊缝中心萌生、扩展,随着焊缝逐渐向纵向沟槽靠近,裂纹会止裂,此时裂纹的总长度便可作为裂

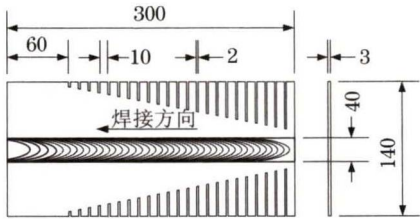


图 1 鱼骨型试板尺寸示意图

Fig.1 Size diagram of fishbone test plate

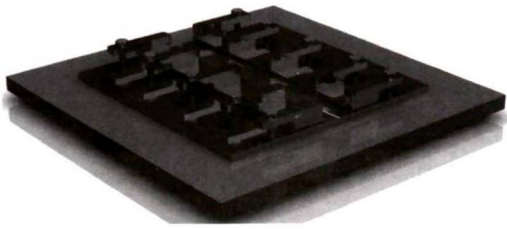


图 2 鱼骨型试板的夹持装置

Fig.2 Clamping device of fishbone test plate

纹敏感性的指标进行测试与统计^[13]。

1.3 金相检验

采用 200,400,800,1 200,2 000 目砂纸对焊接

后鱼骨型试板的焊缝截面进行粗抛,然后使用三酸电解液进行抛光,三酸电解液成分及其含量为 9 g CrO_3 + 75 mL H_3PO_4 + 15 mL H_2SO_4 + 20 mL H_2O ,电解电压为 24 V,抛光时间为 15~30 s,之后采用光学显微镜对不同焊接工艺下的焊缝截面进行观察。

2 结果与讨论

2.1 焊接工艺对焊缝凝固裂纹敏感性的影响

图 3 为不同焊接工艺下焊缝凝固裂纹长度的测试结果,可见单脉冲 MIG 焊和双脉冲 MIG 焊焊缝凝固裂纹长度均随热输入的增加而增大。这是由于热输入增加会使焊缝晶粒尺寸增大,单位体积内的晶界总长度减小,导致焊缝强度降低,晶粒与晶粒之间在相同的拉应力下更容易沿晶界开裂形成凝固裂纹。

降低焊缝单位长度的热输入可以降低焊缝凝固裂纹的敏感性,然而在单脉冲电流基础上添加小电流形成的双脉冲电流却使得焊缝凝固裂纹敏感性升高了。

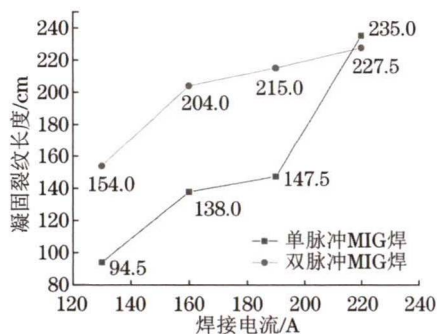


图 3 不同焊接工艺下的焊缝凝固裂纹长度

Fig.3 Weld seam solidification crack lengths under different welding processes

2.2 焊接工艺对焊缝气孔的影响

不同焊接工艺的单脉冲 MIG 焊焊缝显微组织形貌如图 4 所示,可见随着单脉冲电流热输入(电流)的增加,焊缝内部的气孔尺寸增大。因为随热输入增加,液态熔池最高温度升高,初始氢溶解度会增大,导致单脉冲 MIG 焊焊缝内部的气孔变得越来越大。图 5 是不同焊接工艺的双脉冲电流焊接后焊缝显微组织形貌,可见采用通过在单脉冲电流基础上添加低脉冲电流形成的双脉冲电流进行焊接,其焊缝中气孔数量相对比单脉冲电流焊缝的少,这是由于双脉冲电流可以减少单位焊缝长度的热量输入,降低焊缝初始氢溶解度,同时双脉冲电流对液态熔池具有振荡作用,使得形成的氢气更充分地逸出熔池,进而减少焊缝内部气孔的数量。

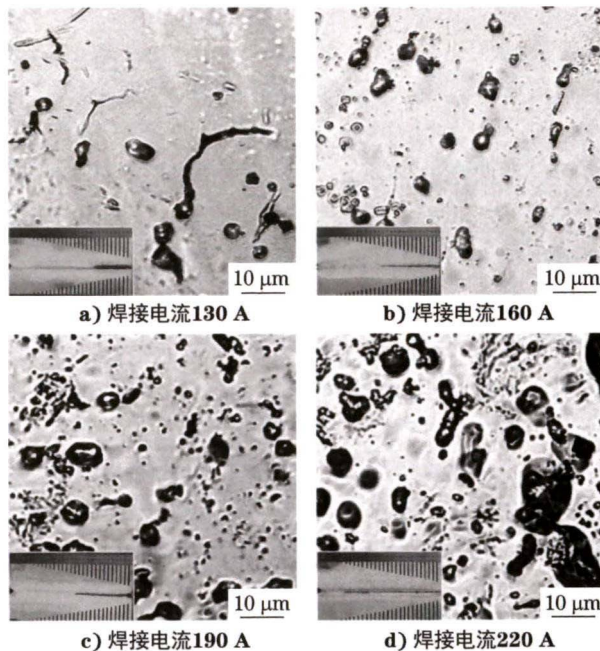


图 4 不同焊接工艺的单脉冲 MIG 焊焊缝显微组织形貌

Fig.4 Microstructure morphology of weld seam of single pulse MIG welding with different welding processes:

- a) welding current 130 A; b) welding current 160 A;
c) welding current 190 A; d) welding current 220 A

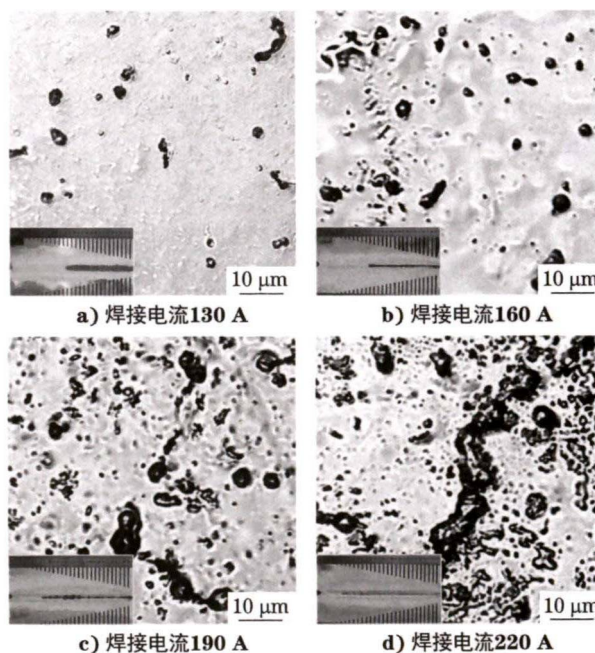


图 5 不同焊接工艺的双脉冲 MIG 焊焊缝显微组织形貌

Fig.5 Microstructure morphology of weld seam of double pulse MIG welding with different welding processes:

- a) welding current 130 A; b) welding current 160 A;
c) welding current 190 A; d) welding current 220 A

2.3 气孔与凝固裂纹的关系

从图 4a)可以明显地看到微观热裂纹伴随着气

孔,图 5a)可以看到气孔聚集形成微观热裂纹,该两种现象均表明凝固裂纹与气孔有一定关系,因此基于气孔形核理论,结合焊缝内部的气孔形貌,对气孔与凝固裂纹之间的关系进一步分析。由于微观热裂纹是具有曲率或锥度的沟槽,气孔形核所需的形核功小于平坦界面沟槽的^[14],因此裂纹尖端优先形成气孔并长大,然后裂纹中间位置出现气孔,最后晶体平面出现气孔。图 4a)中明显可见气孔产生于裂纹尖端,图 5c)和图 5d)中可见裂纹尖端和裂纹中部也分布有气孔,因此判断焊缝微观热裂纹促进了气孔的产生,导致焊缝中气孔数量的增加。

双脉冲 MIG 焊的振荡作用使气孔具有聚集到微观热裂纹附近的效果,气孔长大使裂纹边缘由平直线变为如图 5d)中的不同曲率的弧线,此时由于气孔不停聚集,使气孔内部气压大于外部,液态低熔点共晶化合物无法流入枝晶间隙,枝晶间隙持续受到凝固收缩引起的拉应力作用,从而导致双脉冲 MIG 焊焊缝凝固裂纹敏感性大于单脉冲 MIG 焊的。

3 结论

(1) 5052 铝镁合金脉冲 MIG 焊接时,随单脉冲电流的增加,焊缝凝固裂纹敏感性增大,焊缝区气孔数量由于初始氢溶解度增大而增多;双脉冲 MIG 焊增加了焊缝凝固裂纹敏感性,但焊缝区的气孔数量比单脉冲焊的少。

(2) 双脉冲 MIG 焊焊缝凝固裂纹敏感性比单脉冲 MIG 焊的大,是因为双脉冲电流的振荡作用使气孔更容易移动,使得气孔在微观热裂纹处优先形核和聚集,当微观热裂纹处的气孔不能释放和溢出时,将会导致此处气孔内部气压增大并阻止液态低熔点共晶化合物填充微观热裂纹,导致焊缝凝固裂纹敏感性增大。

参考文献:

- [1] 季小辉,董斌,袁静,等. 6082 T6 铝合金自动焊接工艺参数的选择[J]. 理化检验(物理分册),2011,47(1):15-17.

- [2] 夏晓健,张孔林,林德源. 电流互感器铝合金法兰开裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册),2017,53(10):754-756.
- [3] 古金茂,黄鹏飞,卢振洋,等. 本周期交流短路过渡焊接方法及系统[J]. 焊接学报,2009,30(4):73-76.
- [4] YANG T, XIONG J, CHEN H. Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,84(9/10/11/12):2413-2421.
- [5] 魏波. 铝合金等离子-MIG 复合焊工艺研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [6] 张欣,冯曰海. 双脉冲对 7A52 铝合金 MIG 焊接质量的影响[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):39-41.
- [7] 刘忠杰,高桥宪人,上山智之,等. 直流-交流双脉冲焊接法的开发[J]. 金属加工(热加工),2010(8):22-24.
- [8] 王鹏雁. 脉冲半自动 MIG 焊在 5083 铝镁合金管道焊接中的应用[J]. 金属加工(热加工),2011(12):32-34.
- [9] 邵盈恺,王玉玺,杨志斌,等. 基于焊缝熔深优化的 7075 铝合金等离子-MIG 复合焊接热裂纹敏感性[J]. 金属学报,2018,54(4):547-556.
- [10] 冯艺. 热输入量对车用 6063 铝合金激光-MIG 复合焊接热塑性的影响[J]. 应用激光,2018,38(5):773-776.
- [11] 何宽芳,张卓杰,杨庆. 铝合金焊接热力耦合及凝固热裂纹敏感性分析[J]. 热加工工艺,2015,44(23):183-187.
- [12] CONIGLIO N, CROSS C E. Initiation and growth mechanisms for weld solidification cracking [J]. International Materials Reviews, 2013, 58(7): 375-397.
- [13] MIYAGI M, KAWAHITO Y, WANG H Z, et al. X-ray phase contrast observation of solidification and hot crack propagation in laser spot welding of aluminum alloy[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22626-22636.
- [14] 杨大伟,崔伯永,王鱼赞,等. 6005A-T6 中厚板铝合金焊接气孔形成机理及控制措施研究[J]. 铁路技术创新,2018(6):97-101.

(上接第 30 页)

参考文献:

- [1] 李景新,樊彦强,姜久春,等. 电动汽车绝缘电阻在线监测方法[J]. 汽车工程,2006,28(10):884-887.
- [2] 吴成加. 电动汽车绝缘电阻在线监测方法的研究[J].

客车技术与研究,2015,37(1):26-28.

- [3] PUTTEN A F P V. 电子测量系统——理论与实践[M]. 张伦译. 2 版. 北京:中国计量出版社,2000.
- [4] 姜久春,吴智强,邱瑞昌,等. 电动汽车绝缘电阻在线监测系统的研究[J]. 制造业自动化,2005,27(5):74-77.