

热输入对铝合金双脉冲 MIG 焊气孔缺陷的影响

黄绍服¹, 曹鑫¹, 茅卫东², 李盛良², 李君¹

(1. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 奇瑞新能源汽车股份有限公司, 安徽 芜湖 241009)

摘要:焊接气孔作为一种典型的焊接冶金缺陷, 为研究热输入对焊缝气孔缺陷生成的影响, 采用双脉冲 MIG 焊技对厚度为 3mm 的 6082 铝合金薄板进行对接连接, 并基于 ANSYS 软件平台对焊接温度场进行非线性分析与模拟。研究表明, 铝合金双脉冲 MIG 焊所生成的气孔缺陷主要聚集在熔合线以及中心线附近; 且在一定热输入范围内, 随着焊接热输入的增大, 最高加热温度与熔池熔点温度以上停留时间相应增加, 一方面促进了气泡逃逸, 另一方面减少外部杂质气孔在焊缝中残留的可能性, 抑制气孔缺陷的形成。

关键词:铝合金薄板; 双脉冲 MIG 焊; 热输入; 温度场模拟; 气孔缺陷

中图分类号: TG44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2020)05-0008-05

Effect of Heat Input on the Formation of Pore Defects in Aluminum Alloy Dual-pulse MIG Welding

HUANG Shao Fu¹, CAO Xin¹, MAO Weidong², LI Shengliang², LI Jun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Chery New Energy Automobile Co., Ltd., Wuhu Anhui 241009, China)

Abstract: To study the influence of heat input on welding porosity, a typical welding metallurgical defect, the dual-pulse MIG welding technology is used to connect the 6082 aluminum alloy sheet with a thickness of 3mm, and the non-linear analysis and simulation of the welding temperature field are performed based on the ANSYS software platform. The results show that the pore defects generated by dual-pulse MIG welding of aluminum alloys are mainly concentrated near the fusion line and the center line, and the residence time of maximum heating temperature above the melting point of the melting pool increases with the welding heat input quantity in a certain range, which promotes the escape of bubbles and reduces the possibility of external impurities and pores remaining in the weld, inhibiting the formation of pore defects.

Key words: aluminum alloy sheet; dual-pulse MIG welding; heat Input; temperature field simulation; pore defect

6082 铝合金属于可热处理强化的变形铝合金, 经轧制加工而成, 因其密度小且具有中等强度、优良的力学性能、较好的焊接性及良好的耐腐蚀性而成为目前我国新能源汽车实现材料轻量化的主要选材之一。但由于铝合金极易氧化且导

热率和受热变形量大, 焊接时气孔敏感性高, 采用传统熔焊工艺极易产生气孔等焊接缺陷。双脉冲 MIG 焊作为一种较新的焊接方法通过在较低的基值电流上, 周期性地叠加高低脉冲群的脉冲电流, 可实现稳定持续的可靠热输入。且具有阴极

清理作用能显著提高铝合金焊接质量和效率,缝晶粒细化和气孔敏感性较低等特点。目前该焊接技术在汽车、高铁、船舶等领域已经得到了一定的应用^[1-6]。

焊接数值模拟在经过了数十年的发展,在单热源模拟的研究方面已经比较成熟,例如采用高斯分布热源应用于熔深较浅焊接温度场以及焊接热循环曲线,也可采用双椭球热源模型得出熔深较深的焊接温度场以及热循环曲线^[7]。目前针对热输入对双脉冲 MIG 焊焊接缺陷的影响研究较少且方法单一主要以试验为主^[8-10],本文采用数值模拟与试验结论相结合的方法,从而得出焊接热输入对双脉冲 MIG 焊气孔缺陷形成的影响。

1 试验方法

试验采用基体材料为 Al-Mg-Si 系的 6082 铝合金,板厚 3mm;焊接设备采用松下公司的自动化焊接机器人,焊接过程采用平焊的焊接姿势,接头形式为对接,试件坡口为 I 型,无间隙;焊接前先用不锈钢丝球清除坡口氧化膜,试验基体与焊接方向如图 1 所示。

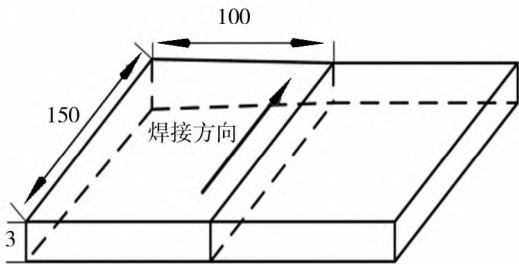


图 1 试验基体与焊接方向示意图(单位:mm)

焊接填充材料为 5356 铝合金焊丝,直径为 $\phi 1.2\text{mm}$,保护气体为纯度 99.99% 的氩气。6082 铝合金和 5356 焊丝的化学成分如表 1 所示,试验参数如表 2 所示。调节焊接速度以改变热输入,两

者关系为

$$E = \eta UI/v \tag{1}$$

式中: E 为热输入; U 为焊接电压; I 为焊接电流; v 为焊接速度; η 为焊接热效率($\eta = 0.9$)。在焊接过程中利用焊接电弧动态小波分析仪对热输入进行实时采集,焊接结束后对焊缝进行 X 射线检测,对探伤胶片按 NB/T47013 标准对气孔等缺陷进行判定。

表 1 合金化学成分(质量分数) %

合金	Si	Mn	Mg	Zn	Ti	Fe	Al
6082	0.97	0.67	1.02	0.06	0.01	0.37	余量
5356	0.05	0.82	4.87	0.01	0.08	0.21	余量

表 2 双脉冲 MIG 焊焊接工艺参数

编号	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$
1	0.6	100	22	2.03
2	0.8	100	22	1.88
3	1.0	100	22	1.67

2 焊接温度场模拟

2.1 材料热物理性能参数

金属材料的物理性能参数如比热容、热导率、弹性模量、屈服应力等一般都随温度的变化而变化。在焊接过程中,焊件局部加热到很高的温度,整个焊件温度变化剧烈,如果不考虑材料的物理性能参数随温度的变化,那么计算结果一定会有很大的偏差。所以在焊接温度场的模拟计算中,一定要给定材料的各项物理性能参数随温度的变化值。

6082 铝合金材料的热物理性能参数如表 3 所示,它们是温度的函数。

表 3 材料的物理及性能参数参数

材料	温度 / $^{\circ}\text{C}$	导热率 / $(W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	比热容 / $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	泊松比
6082	20	119	2.73	947	0.33
	100	133	2.73	987	
	200	159	2.71	1 127	
	300	186	2.71	1 207	
	400	213	2.69	1 227	
	500	233	2.67	1 227	
	600	233	2.67	1 227	

2.2 三维有限元模型的建立

三维非线性瞬态热传导问题的控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q}$$

(2)

式中: ρ 为材料的密度; k,c 为材料的导热系数与比热,它们是温度的函数; $\bar{Q}$ 是内热源强度。

利用所建立的三维焊接热传导过程的数学模型,对 6082 铝合金材料进行了计算分析,模型尺寸与试验板材尺寸相一致,由于焊接是一个温度随着空间和时间都急剧变化的过程,温度梯度很大,因此在网格划分时为了确保计算的准确性故在焊缝区域进行了网格细分,网格划分如图 2 所示。

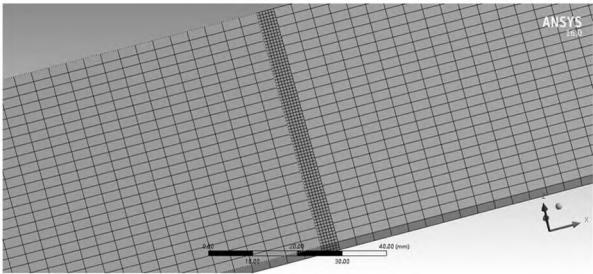


图 2 有限元网格初始划分

2.3 焊接热源

由焊接热源所提供的热能为整个焊接过程提供主要驱动力,焊接热源的不同以及热源所带来的热输入的不同会引发金属相变、热应变、残余应力的变化。在研究焊接热输入的过程中,需要对焊接过程的每个瞬时温度场进行精确计算。本试验选用高斯热源模型进行模拟计算。高斯热源分布是一种比点状热源和线热源更切实际的一种热源分布函数,因为它将热源按高斯函数在一定的范围内分布。高斯模型热流密度为

$$q^* = q_{\max}^* \exp(-cr^2)$$

(3)

式中: q^* 为半径 r 处的表面热流; $q_{\max}^*$ 为加热斑点中心的最大热流; c 是热源集中系数,与焊接方法相关的常数; r 为距热源中心的距离。有关试验研究表明,高斯热源模型能够表征焊接电弧的热流分布特征。

2.4 边界条件

焊件边界与周围介质进行换热,热量的散失主要通过热辐射换热和对流换热方式进行的,高温下散失的热量以辐射为主,低温下以对流为主。在模型的对称面处取绝热边界条件。与此同时为了节约运算时间和资源,需要对焊接模拟过程中的一些不重要运算进行简化,简化如下:

- 1)焊接的初始温度约定为室温 20℃;
- 2)忽略焊接过程中熔滴过渡对熔池的冲击作用和焊接熔池中所发生的化学反应、搅拌作用等;
- 3)焊材与母材各向同性,其热物理参数在材料内部分布均匀,与位置无关,只与温度的变化有关;
- 4)忽略焊接实际所产生的余高,假设熔池表面为平面。

3 温度场与气孔分布关系

铝合金双脉冲 MIG 焊气孔缺陷的形成主要与焊缝中存在的氢有密切联系。氢的溶解度随着温度的下降而剧烈减小,因此在焊缝熔池凝固过程中氢从焊缝中析出形成气泡上浮,当熔池的凝固速度过快,气泡来不及浮出焊缝金属表面时就会形成气孔。表 4 为对焊缝进行 X 射线无损探伤检测得到的试验结果。分别为不同热输入参数下的双脉冲 MIG 焊的焊缝表面气孔分布、熔合线宽度。图 3 为金相显微镜下观察的焊缝横截面气孔分布情况。

表 4 焊缝表面气孔分布及熔合线宽度

热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	焊缝表面气孔分布	熔合线宽度 /mm
1.67		3.22
1.83		3.36
2.03		3.48

从实验结果来看气孔(焊缝中白色不规则球状)出现的位置大多在焊缝熔合线以及焊缝的中心线附近,这两处的气孔数量以及尺寸都较其他位置有明显增多,且随着热输入的增大气孔有明显的减少。

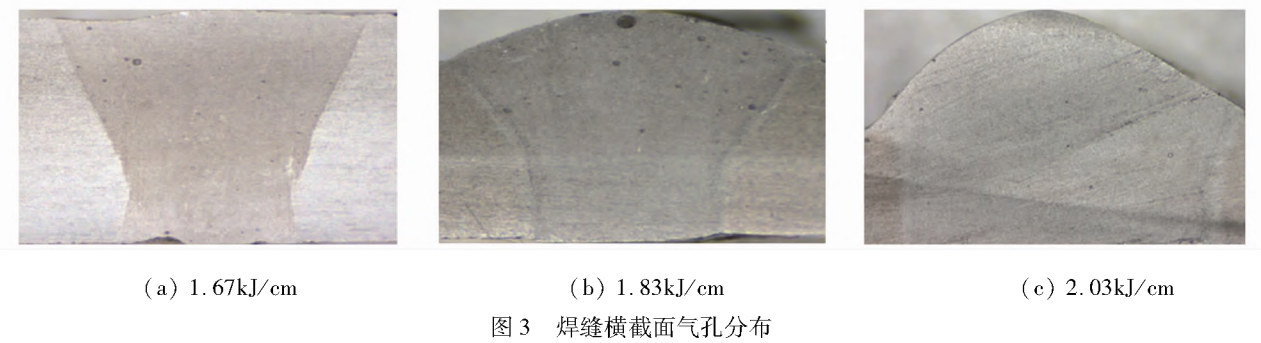


图 3 为焊接过程中的整个温度场的动态变化情况,焊缝中心线和焊缝熔合线附近的温度变化曲线。在该图中,主要体现的参数是高于熔点温度停留时间(熔点为 650℃)和最高加热温度,这两个参数是影响焊接熔池存在与气孔停留时间长短的主要影响因素。可以看出在中间的稳定时刻,等温线分布形状基本上是一样的,只是热源中心位置随着热源的移动有所变化。焊接过程中热源沿焊接方向移动时,焊件上某点的温度由低到高,达到最大值后,又由高到低,随时间而变化。

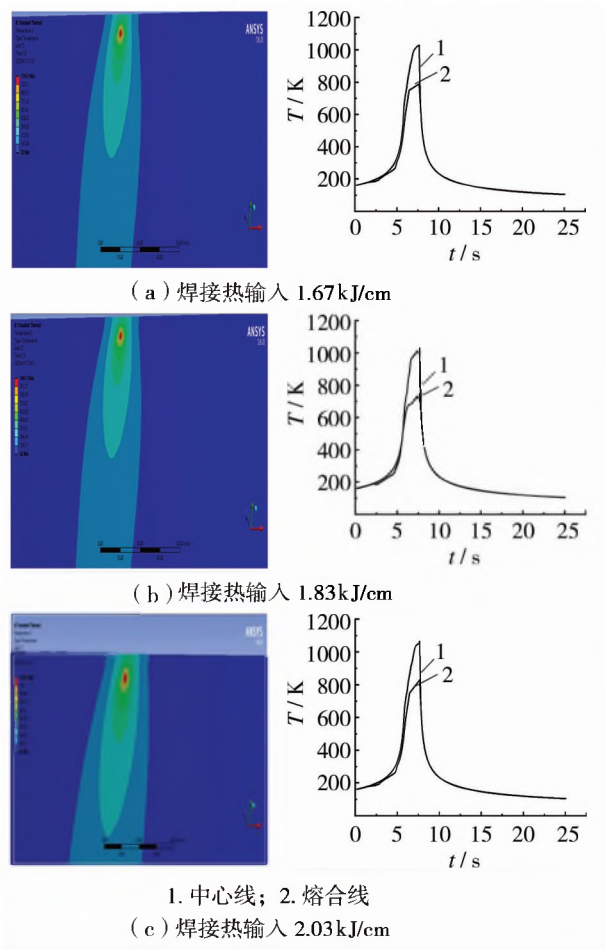
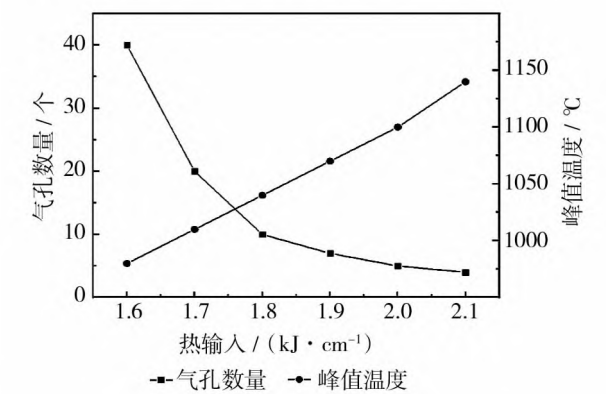


图 4 为结合温度场模拟与试验结果得到的热输入参数与峰值温度、气孔数量之间的关系示意图。



结合以上结论分析可得随着焊接热输入的增加,在焊缝中心处的峰值温度也跟着增加,意味着焊缝中心处的熔池存在时间会增加。熔合线处的模拟情况和焊缝中心的趋势是一致的,区别在于峰值温度和高于熔点温度以上的停留时间,其升温速率和冷却速率略慢于焊缝中心位置,故焊缝中心线处气孔数量相比较熔合线处气孔数量较少。随着时间的增加,熔合线处的高温停留时间明显增长,所以熔合线与焊缝中心的温度变化曲线靠得越紧。焊接速度越小则热输入越高,熔池存在时间增加。在熔合线处,其最高温度随热输入的增加有较大变化,相变温度以上的停留时间也随之增加。在熔池凝固后,冷却速度趋于平缓,其冷却速度对焊缝金属的晶粒大小有影响而对气孔的形成基本无影响,所以不做研究分析。理论上,熔宽越宽则熔合线处的温度就越低,但热输入的增加对其温度的影响会一定程度上弥补距离位置对其温度的影响,故当热输入在一定范围内增加时,气孔率可以降到较低水准,此时的高温熔池既有利于气泡的外逸也能控制

4 结论

(3) 在一定热输入范围内,适当增加焊接热输入,一方面可以促进气泡逃逸,另一方面也减少外部杂质气孔在焊缝中残留的可能性,达到抑制气孔缺陷的形成的效果。

参考文献:

- [4] RIBES H. Aluminum Applications in Lightweight Design for Small Commercial Vehicles and Station Wagons[J]. ATZproduction worldwide, 2019, 6(1): 42-45.
- [5] 许鸿吉, 唐海鹰, 刘志平, 等. 6082 铝合金 MIG 焊焊接接头组织与力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(1): 131-133.
- [6] 周立涛, 王旭友, 王威, 等. 激光扫描焊接工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 65-68.
- [7] 董志波, 魏艳红, 刘仁培, 等. 不锈钢焊接温度场的三维数值模拟[J]. 焊接学报, 2004(2): 9-14.
- [8] 金礼, 徐敏, 薛家祥, 等. 热输入对铝合金双脉冲 MIG 焊接接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 89-92.
- [9] 姚屏, 薛家祥, 蒙万俊, 等. 工艺参数对铝合金双脉冲 MIG 焊焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 69-72.
- [10] 高宝杰, 吉华, 樊云杰, 等. 脉冲 MIG 焊对 7N01 铝合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(15): 146-148.

(责任编辑:李 丽)

关于本刊启用稿件在线处理系统的通知

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况,本刊已开通稿件在线处理系统(http://210.45.144.193/Jweb_aust/),请作者通过在线处理系统进行投稿、查稿。系统设有作者中心、专家中心、编辑中心和主编中心四部分,实现在线投稿、审稿、编辑一条龙处理。首次作者投稿请先注册,并记住注册的用户名和密码。注册登录后就可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请不要重复注册,否则可能导致您信息查询不完整。从即日起不再接受其它方式的投稿。

《安徽理工大学学报》编辑部