

铝合金铸件与型材焊接工艺及性能

吴 玲¹ 赵 磊² 于瑞海² 周 喆² 宋利刚² 于树洪³

(1.燕山大学机械工程学院; 2.中信戴卡股份有限公司; 3.滨州盟威戴卡轮毂有限公司)

摘 要 为了验证 A356 铝合金铸件和 6082 铝合金型材 MIG 焊接工艺,采用试验方法,为焊接工艺的选取提供试验数据。首先,对焊接件进行拉伸和三点弯曲试验,分析不同工艺下焊接件的力学性能和抗弯性;同时,对拉伸断口形貌进行分析,得出焊接电流与气孔数量的关系曲线;其次,对焊接件进行表面和内部 X 射线探伤,分析表面裂纹和内部缺陷。最后,通过观察焊接件的熔深,得出焊接电流与熔深的关系曲线。当焊接电流分别为 140、150 和 160 A 时,其熔深为 0.79、1.47 和 1.85 mm。

关键词 铝合金; MIG 焊接; 工艺参数; 试验方法

中图分类号 TG142.21; TG113.26⁺3

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Welding Process and Performances of Aluminum Alloy Castings and Profiles

Wu Ling¹, Zhao Lei², Yu Ruihai², Zhou Zhe², Song Ligang², Yu Shuhong³

(1.School of Mechanical Engineering, Yanshan University; 2.CITIC Dicastal Co., Ltd.;

3.Binzhou Mengwei Dicastal Wheel Hub Co., Ltd.)

Abstract: In order to verify the MIG welding process of A356 casting and 6082 profiles, experiments were carried out to provide experimental data. Firstly, tensile and three-point bending experiments were conducted to analyze the mechanical properties and bending resistance of welding under different processes. Meanwhile, the relationship between the welding current and welding-microporosity was obtained by tensile fracture analysis. Secondly, external and internal X-ray inspection were adopted to analyze the surface cracks and internal defects. Finally, the relationship between the welding current and the penetration were concluded by observing the penetration, providing quantitative data for the welding process. When the welding currents were 140, 150 and 160 A, respectively, the corresponding penetration depths were 0.79, 1.47 and 1.85 mm.

Key Words: Aluminum Alloy, MIG Welding, Process Parameters, Experimental Methods

铝合金由于其较小的密度和较高的强度,广泛地应用于机电、汽车、航空、航天等领域。因此,铝合金零部件的加工工艺向着轻量化、精密化及整体化方向转变^[1]。

随着国家碳中和、碳达峰要求的提出,在汽车制造工业中,很多大型结构件由传统的黑色金属整体铸造被铝合金、分体式焊接构件所代替^[2]。这是因为焊接零件可以快速地将零散件加工成复杂的结构件,可以显著降低复杂结构件的制造成本;其次,尽管在焊缝处会出现强度软化、存在缺陷等现象^[3],但经过大量的静态疲劳试验及理论验证,焊接件的力学性能优良,完全可以代替复杂整体成形结构件。

是一个体积较大的结构件,以往通过整体铸造成形;随着铝合金焊接工艺的发展,通过焊接,可以将铝合金铸件及型材快速构建成复杂的大型构件,节省制造大型构件的压铸设备及模具,从而使得制造成本大幅降低。



图 1 铝合金焊接件

Fig.1 Aluminum alloy welding components

1 试验方法

图 1 为 A356 铝合金铸件与型材的焊接件。该件

A356 铝合金铸造性能良好,具有较好的强度与机

收稿日期:2021-09-12;修改稿收到日期:2021-11-18

第一作者简介:吴玲,女,1969 年出生,实验师,河北秦皇岛(066000),E-mail:wlqingming@163.com

引用格式:吴玲,赵磊,于瑞海,等. 铝合金铸件与型材焊接工艺及性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(3):371-375.

WU L, ZHAO L, YU R H, et al. Welding process and performances of aluminum alloy castings and profiles[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):371-375.

加工性能^[4];6082 铝合金属于 Al-Mg-Si 系,主要适用于板材高温冲压型材。表 1 为 A356、6082、ER5356(焊材)铝合金的化学成分。

表 1 A356、6082 和 ER5356 合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of A356, 6082 and ER5356

aluminum alloy												%
合金	w_B											Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Cr	
A356	6.95	0.13	0.05	0.30	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	余量
6082	1.05	0.40	0.10	0.70	1.40	0.10	0.01	—	—	—	0.10	余量
ER5356	0.25	0.40	0.12	0.10	4.80	0.10	0.20	—	—	—	0.10	余量

通过拉伸试验分析焊接件的强度、伸长率,根据 VDA 238-100 标准,通过三点弯曲试验验证焊接件的弯曲强度。针对焊接件做焊缝表面探伤、内部 X 射线探伤和熔深试验,以得到准确的焊缝试验数据。

2 铝合金 MIG 焊接工艺

2.1 MIG 焊接特点

熔化极惰性气体保护焊(Melt Inert-gas Welding, MIG 焊接)的优点是焊接品质好,因为有保护气体的作用,焊缝品质稳定,焊接件的变形小;MIG 焊接还可以采用大的焊接电流,使得焊丝熔化速度快,得到较好的母材熔深,提高焊接速度。其缺点是没有脱氧去氢,焊缝内部会存在气孔。因此,MIG 焊接对母材及焊丝的洁净度及生产环境要求比较严格^[5]。

2.2 铝合金 MIG 焊接工艺

采用 TPS-4000 型焊机,焊丝直径为 1.2 mm,A356 和 6082 铝合金板材厚度分别为 5 mm 和 3 mm,坡口为 V 型,MIG 焊接电流为 140~160 A,焊接速度为 0.1~0.15 m/s,推进角为 15°。

根据工程经验及文献[6]可知,焊接电流是铝合金 MIG 焊接中最重要的参数。MIG 焊接时,焊接电流一般根据焊件厚度、焊缝位置以及焊丝直径来选择^[7]。当焊丝直径确定后,焊接关键工艺参数还有焊接电流、焊接速度及脉冲强度。因此,设计焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

编号	MIG 电流/A	MIG 速度/(m·s ⁻¹)	脉冲强度/(μV·s)
1	140	0.10	1
2	150	0.15	3
3	160	0.15	1

3 铝合金焊接件的力学性能

3.1 拉伸试验

针对表 2 中的 3 种工艺参数,每种工艺参数各加工

10 个试样。在选择试样时,所有试样均经过加工去除余高,消除焊缝的应力集中影响。

拉伸试样尺寸为 30 mm×3 mm×8 mm,焊缝处进行打磨,见图 2。依据 GB/T 228.1-2010^[8],使用 Z100 型材料试验机在室温下进行拉伸试验,具体试验方法见 GB/T 228B8。

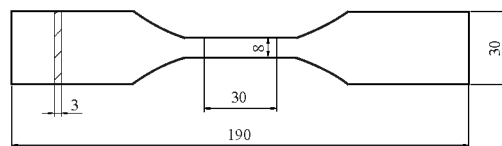


图 2 拉伸试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimens

3.2 三点弯曲试验

将焊接件加工成尺寸为 60 mm×30 mm×3 mm 的试样,保证焊缝在试样中间。使用 Z020 型材料试验机,参照 VDA 238-100 标准^[9],完成三点弯曲试验,并记录试样的 α 角(见图 3),并根据 α 角的大小,对焊接工艺进行评判。

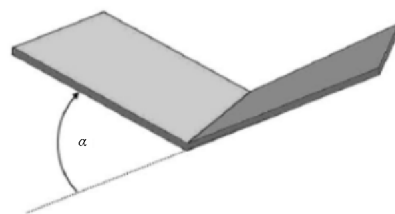


图 3 三点弯曲试验 α 角

Fig.3 α Angle of three point bending testing

4 铝合金焊接件焊缝的质量检测

根据 GB/T 19869.2-2012^[10],铝合金焊接件的焊缝质量检测通常有渗透探伤试验、X 射线试验和焊缝熔深试验。

4.1 表面探伤试验

铝合金焊接时易产生热裂纹,因为所用铝合金属于共晶型合金,遇到焊接热时,在合金元素作用下,会产生三元共晶组织,熔点比二元共晶组织低,而且结晶范围宽,从而会形成大量的结晶裂纹^[11]。因此,针对 3 种不同的焊接电流工艺,通过表面探伤,验证焊接电流对表面裂纹的影响。

表面探伤试验时通常采用渗透剂、清洗剂和显像剂完成焊缝的探伤。

4.2 内部 X 射线探伤

内部 X 射线探伤目的是检测焊缝内部的缺陷,如气孔、未焊透和夹杂物等。因为铝合金焊缝结晶组织与

母材相比,焊缝结晶组织具有粗大、缩松的特点,而且还存在明显的柱状晶组织和枝晶偏析现象。焊缝的铸造特征比较明显,表现在大晶粒组织及晶粒组织成分不均匀,因此焊缝内部组织缺陷比较多,需要用X射线观察焊缝内部缺陷。根据GB/T 3323.1-2019^[12],采用X射线检测焊缝内部的缺陷。

4.3 熔深试验

按照表2的工艺对A356铝合金铸件与6082铝合金型材进行焊缝熔深试验,通过检测焊缝熔深,确保焊接工艺参数对两种不同母材均能焊透。试验方法是对焊接后的焊缝,用V8型ZEISS体视金相显微镜观察焊缝熔深。

针对3种工艺参数,直接从焊接结构件上选取熔深试样,取样时避开焊缝起弧与收弧位置。取样完成后,参照标准GB/T 26955-2011^[13]拍摄图片进行分析。

5 试验结果与分析

5.1 拉伸试验结果与分析

在室温下,按工艺1、2、3,各取10个试样;工艺1的试样编号为 L_{1-0} 、 L_{1-1} ...、 L_{1-9} ;工艺2的试样编号为 L_{2-0} 、 L_{2-1} ...、 L_{2-9} ;工艺3的试样编号为 L_{3-0} 、 L_{3-1} ...、 L_{3-9} 。结果见表3,拉伸断裂试样见图4。

表3 拉伸试验结果

Tab.3 Results of tensile test											
编号	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ / %	编号	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ / %	编号	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ / %
L_{1-0}	158	220	2.9	L_{2-0}	163	223	3.1	L_{3-0}	166	225	3.3
L_{1-1}	161	224	3.1	L_{2-1}	165	224	3.3	L_{3-1}	169	227	3.6
L_{1-2}	159	222	3.2	L_{2-2}	168	226	3.4	L_{3-2}	171	229	3.4
L_{1-3}	163	223	3.4	L_{2-3}	162	223	3.0	L_{3-3}	172	231	3.6
L_{1-4}	167	225	3.4	L_{2-4}	167	225	3.3	L_{3-4}	174	234	3.9
L_{1-5}	159	221	3.0	L_{2-5}	166	224	3.3	L_{3-5}	173	233	3.9
L_{1-6}	164	223	3.2	L_{2-6}	164	223	3.2	L_{3-6}	175	235	3.7
L_{1-7}	168	226	3.3	L_{2-7}	165	225	3.3	L_{3-7}	174	236	3.8
L_{1-8}	165	225	3.2	L_{2-8}	164	224	3.2	L_{3-8}	176	237	3.6
L_{1-9}	163	224	3.1	L_{2-9}	163	222	3.2	L_{3-9}	173	235	3.9

从拉伸试验结果可以看出,随着MIG电流从140

A增加至160 A,A356铝合金铸件与6082铝合金型材的力学性能有提高的趋势;因为对焊缝进行了去除余高处理,消除了焊缝处集中应力,所以断裂位置均处于焊缝与母材交汇的边缘,并且靠近焊缝中心位置,而且都在标距范围内,见图4。

另外,从表3可以看出,焊接试样的力学性能与两种母材的力学性能相比呈现出显著下降趋势,软化现象比较明显^[14]。



图4 拉伸断裂试样

Fig.4 Tensile fracture specimens

5.2 拉伸试验断口分析

对焊缝拉伸断口进行金相观察,结果见图5。从图5a可以看出,断口处有大量的亮点存在,而且形貌为圆形,通过辨识可知,采用工艺1的拉伸断口存在大量的气孔,弥散于整个断口表面;从图5b可以看出,气孔多处于试样的内壁边缘处,没有析出状态,断口中心部位气孔较少;从图5c可以看出,少量的气孔集中于内壁处,而断口中心部位的气孔很少。

焊接时,由于高温作用,会使焊接区域空气里的水分溶入液态铝合金中,受电弧及高温的影响,水分被分解成氢气侵入铝液;伴随着焊接快速冷却,铝液凝固时大量氢气未能析出,形成气孔^[15]。

通过拉伸断口的对比可见,当焊接电流较小时,气孔较多;当焊接电流增大后,气孔数量变少,这是因为大电流输入焊缝的焊接热量多,延长了液态铝的冷却时间,为氢气析出创造了有利条件,见图6。

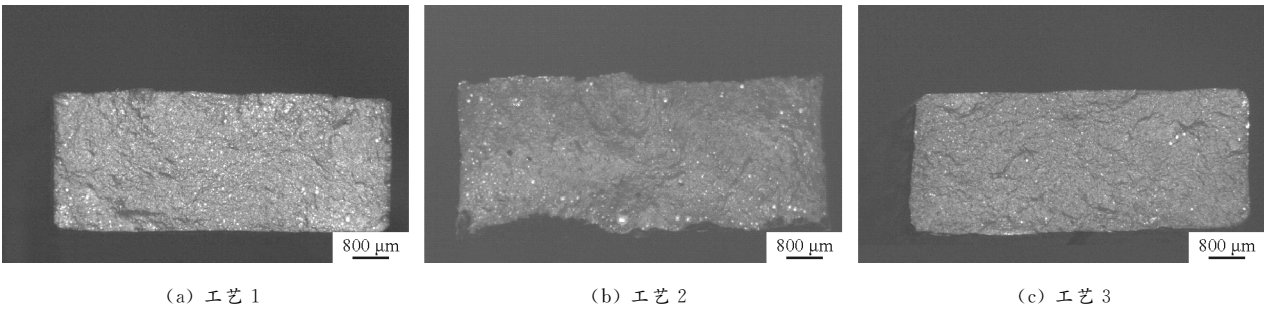


图5 不同工艺下的断口形貌

Fig.5 Fracture of different parameters

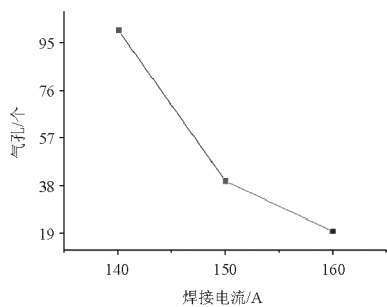


图 6 焊接电流与气孔关系曲线

Fig.6 The curve of welding current and welding microporosity

5.3 三点弯曲试验结果与分析

三点弯曲试验结果见表 4。从表 4 可以看出,3 种工艺下 α 角的梯度性明显,工艺 2 的试样 α 角大小及波动范围普遍高于工艺 1 和工艺 3,说明工艺 2 的焊接件抗弯性能较好。根据 α 角的数据,可以发现,适当快的焊接速度及较大的脉冲强度,可以显著地提高焊缝的抗弯强度。脉冲强度增加可以使熔滴以射流的方式过渡;同时,较大的脉冲强度和较快的焊接速度,可以准确的控制焊接热输入,延缓焊缝冷却时间,从而获得较好的焊缝质量,减少出现焊缝裂纹的现象^[16]。

表 4 三点弯曲测试的 α 角

Tab.4 α angle of three point bending testing (°)

编号	工艺 1	工艺 2	工艺 3
1	8.52	9.56	7.74
2	8.76	9.48	7.56
3	8.93	9.69	7.89
4	8.65	9.84	8.12
5	8.74	9.45	8.08
6	8.38	9.38	7.68

但是,如果焊接电流增大后,焊缝的 α 角反而出现下降,这是因为出现了熔滴过渡不良,导致熔池形状不一致,从而影响焊缝的抗弯性能。

5.4 表面探伤试验结果与分析

图 7 为 3 种工艺下试样表面探伤结果。通过表面探伤可知,工艺 1 的焊缝表面品质不合格,在显像剂的作用下,焊缝出现明显的表面裂纹。工艺 2 和工艺 3 的焊缝品质合格。这是因为较小的焊接电流,加快了熔滴的冷却速度,导致出现表面裂纹。因此,焊缝表面品质的优劣,焊接电流的大小是关键因素,焊接速度是次要因素;通常,为了获得好的焊缝表面质量,要选择大的焊接电流,保证焊接热充足,减少产生冷却裂纹。

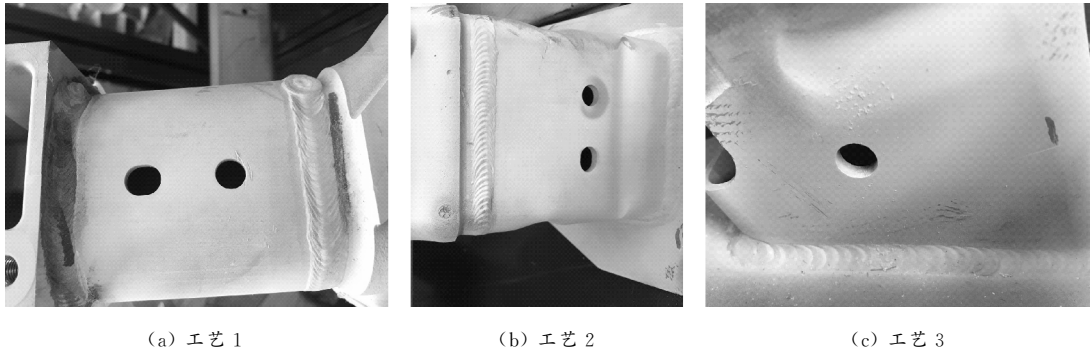


图 7 不同工艺下的试样焊缝探伤

Fig.7 Weld joint under different processing parameters

5.5 内部 X 射线探伤结果与分析

图 8 为不同工艺下的试样 X 射线内部探伤图。从图 8a 中可以看见明显的圆形黑色斑点,这表明,焊接电

流小,焊缝处会出现内部缺陷,比如气孔、夹渣等。图 8b 和图 8c 的焊缝内部在 X 射线作用下,未发现黑色斑点存在,这说明焊接电流大,会减少焊缝内部缺陷。

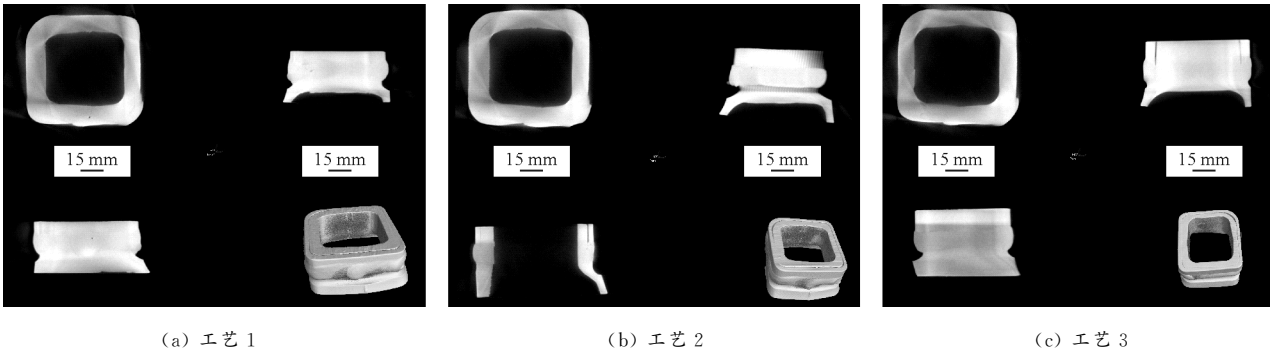


图 8 不同工艺下的 X 射线检测

Fig.8 X-ray inspection under different processing parameters

5.6 熔深试验结果与分析

对3种工艺参数焊接后的焊缝进行熔深试验,见图9。通过试验对比,3种试验工艺参数获得的焊缝熔深,均满足GB/T 26955-2011的要求。可以看出,即便是

最小的焊接电流,也可以将两种母材焊透,并且在焊缝处,焊丝完全填满了母材坡口,母材与焊丝、焊丝与母材焊缝处的过渡结合较好,没有出现裂纹及孔穴等焊接缺陷。

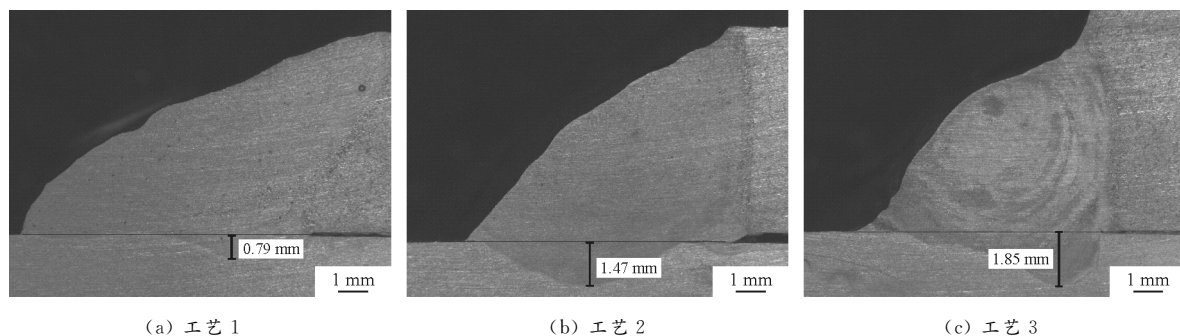


图9 不同工艺下的试样熔深

Fig.9 Penetration under different processes

另外,随着焊接电流增加,熔深有增加的趋势,表明焊接电流的大小会影响焊缝的熔深,由此引申到焊接工件时,对于异形过渡区,母材不均匀处,可以适当增加焊接电流,以保证母材之间可以焊透,减少焊缝处的焊接缺陷。

通过熔深宏观组织可以发现,A356 铝合金铸件与6082 铝合金型材经过3个工艺焊接后,均满足标准GB/T 26955-2011的要求;随着焊接电流的增加,熔深呈现出增加的趋势,见图10。

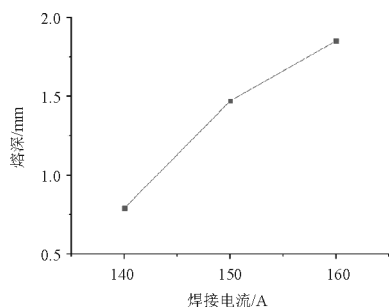


图10 焊接电流与熔深曲线

Fig.10 Variation curve of welding current with penetration

6 结 论

(1)A356 铝合金铸件与6082 铝合金型材 MIG 焊接时,随着焊接电流增加,焊缝的力学性能明显提高。这是因为焊接电流越大,断口上的气孔数量越少;适当的焊接电流和较快的焊接速度,在较高的脉冲强度作用下,会得到较好的抗弯性能。

(2)A356 铝合金铸件与6082 铝合金型材 MIG 焊接时,较大的焊接电流下焊缝的表面品质好,没有出现裂纹,而且内部组织较好,缺陷少;同时,随着焊接电流增加,熔深也会增加。

参 考 文 献

- [1] 赵雨. 汽车轻量化材料及制造工艺分析[J]. 内燃机与配件, 2021 (16): 44-45.
- [2] 李怀珠. 大型铝合金构件的焊接工艺设计[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(6): 364-366.
- [3] 胡云端,李鸣申,王留芳,等.快速冷却对6005A 铝合金多次次 MIG 焊接残余应力的影响[J].热加工工艺, 2022, 51(1): 103-106.
- [4] 吕金旗. 低压铸造轮毂缺陷 X 射线检测系统的原理及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(2): 155-156.
- [5] 董力群,梁景恒,毛镇东,等. 6A01 铝合金激光-MIG 复合焊和 MIG 焊接接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2): 60-63.
- [6] 许飞,陈俐,巩水利,等. 焊缝余高对 A5083 铝合金焊接接头低温疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(7): 103-105.
- [7] 段浩伟,田爱琴,马传平,等.不同焊丝对 A7N01 铝合金焊接接头力学性能的影响[J].电焊机, 2017, 47(5): 16-21.
- [8] GB/T228.1-2010 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [9] VDA 238-100 Plate bending test for metallic materials[S]. Verband der Automobilindustrie, 2014.
- [10] GB/T 19869.2-2012 铝及铝合金的焊接工艺评定试验[S].北京:中国标准出版社, 2012.
- [11] 崔云龙,何建英,李帅贞,等. 衬垫对铝合金焊接接头根部裂纹的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50(2): 30-32.
- [12] GB/T 3323.1-2019 焊缝无损检测射线检测标准第1部分[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- [13] GB/T26955-2011 金属材料焊缝破坏性试验焊缝宏观和微观检验[S].北京:中国标准出版社, 2011.
- [14] 连昊,李昭荣. 基于试验分析的铝合金副车架焊接强度研究[J]. 装备制造技术, 2020(6): 96-99.
- [15] 彭勇军. 铝合金 MIG 焊气孔的成因及消除措施[J]. 金属加工(热加工), 2015(12): 58-60.
- [16] 阮野,邢飞,翟晓杰,等. 5083 和 6082 铝合金接头裂纹敏感性分析[J]. 焊接技术, 2019, 48(5): 19-22.

(编辑:栗万仲)