焊丝中 Si 元素含量对铝合金接头裂纹 敏感性的影响规律及机理

王俊,李芳,张跃龙,华学明,沈忱

(上海交通大学,上海市激光制造与材料改性重点实验室,上海,200240)

摘要:使用扫描电镜、能谱、温度场实时采集等测试方法,研究了焊丝中 Si 含量对 AA6063 铝合金 GMAW 焊接头 热裂纹敏感性的影响规律及机理.结果表明,当焊丝为纯铝时,鱼骨试样的焊缝中心会出现细长的焊接裂纹;当焊 丝中的 Si 含量为 4.5%~6% 时,裂纹的长度变短,但是开裂距离明显增加;当焊丝中的 Si 含量达到 11%~ 13% 时,试样焊缝无裂纹出现.随着 Si 含量的不断提高,合金易出现裂纹的凝固温度区间先增大后减小;焊丝中 Si 含量的不同还会影响凝固后期金属液的流动性,使得焊缝晶界处的物相成分和形态都有明显的区别;同时,Si 含 量的提高会使得接头的冷却速度先增加后减小,从而导致应力状态改变,热裂纹敏感性先升高后降低. 关键词: Si 含量;铝合金;熔化极氩弧焊;裂纹敏感性

中图分类号: TG 442 文献标识码: A doi: 10.12073/j. hjxb. 20190827001

0 序言

6000系列的铝合金综合力学性能优异,具有成 形性良好、中等强度等优点,是目前应用最广泛的铝 合金之一[1-6]. 但是由于铝合金具有熔点较低, 热膨 胀系数较大等特点,其焊接难度大大增加,且焊接接 头容易出现裂纹等缺陷^[7]. 6xxxx 系铝合金为共晶合 金,在焊接过程中容易出现热裂纹^[8-12].热裂纹的存 在大大降低了铝合金和高强匹配焊丝焊接件的可用 性. 冯时^[6]的研究表明, 铝合金焊接热裂纹的形成受 诸多因素的影响,包括凝固温度区间的宽度、温度、 凝固速度、合金的原始化学组成和凝固过程中的冶 金反应等等. 农琪等人[13]对 6061 铝合金的裂纹敏 感性进行了探究,用"液膜理论"解释了凝固裂纹的 产生机理,指出通过调节合金元素的含量、减少焊接 过程中的热输入、降低冷却速度等方式可以有效控 制焊接裂纹的产生.齐振余^[14]采用惰性气体保护的 脉冲 MIG 焊进行鱼骨状试件焊接裂纹试验, 研究 Al-12.7Si-0.7Mg 合金的焊接裂纹倾向性, 通过对焊 接接头的熔合区观察发现并未出现裂纹,证明了 Si 含量的增加对焊接裂纹的控制有明显影响. 汪认^[15] 选取 A6N01S-T5(Al-0.57Si-0.61Mg-1.51Fe) 铝合

收稿日期:2019-08-27

金为研究对象,分别使用低强匹配焊丝 (ER4043、纯 铝)和高强匹配焊丝 (ER5356, ER4047)进行 TIG焊,发现添加 ER4043、纯铝焊丝比 ER5356, ER4047 焊丝具有更加明显的开裂现象.以上这些研 究极大地丰富了铝合金焊接热裂纹的理论,使铝合 金在各领域的应用变得更为广泛.但是对于影响铝 合金热裂纹的因素,产生的机理以及相应的分析等 研究仍有较大的研究空间.研究焊丝中 Si 元素的含 量对铝合金接头热裂纹敏感性的影响规律及机理有 着重要的理论和现实意义.文中综合采用扫描电 镜、能谱、温度场实时采集等测试方法,详细论述了 焊丝中 Si 含量对 AA6063 铝合金 GMAW 焊接头热 裂纹敏感性的影响规律及机理.

1 试验方法

试验使用的母材为 6063 的铝合金板材, 铝板 的厚度为 3 mm. 焊丝的牌号为 ER1100, ER4043, ER4047, Si 元素的质量分数依次为 0.06%, 4.5%~ 6%, 11%~13%, 焊丝直径均为 1.2 mm. 6063 铝合 金和 ER1100, ER4043, ER4047 焊丝的化学成分如 表 1 所示. 不同焊丝焊接铝合金的热裂纹敏感性采 用鱼骨试验方法进行评估, 试样具体形状尺寸见图 1. 使用熔化极惰性气体保护焊的方法进行焊接 (MIG),

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (51705318, 51901136)

焊机是福尼斯公司生产的 CMT4000 系列; 机器人 是日本安川公司生产的 MA1400. 在鱼骨试样上进

行堆焊,背板使用铜板,电流模式为脉冲,焊接工艺 参数如表2所示.

	表 1	6063 铝合金-	与 ER1100,	ER4043,	ER4047	′焊丝的化	学成分 (质	量分数,	%)	
Table 1	Cher	nical compositi	ions of 6063	aluminum	alloy an	d ER1100,	ER4043,	ER4047	welding v	vire

材料	Zn	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Cu	Al
6063	0.1	0.45~0.9	0.1	0.35	0.2~0.6	0.06	0.06	余量
ER1100	0.1	_	0.05	0.06	0.06	0.6	4.5~6.0	余量
ER4043	0.1	0.05	0.15	0.6	$4.5 \sim 6.0$	0.8	11.0~13.0	余量
ER4047	0.2	0.1	0.15	0.8	11.0~13.0	0.06	0.06	余量





使用相同参数进行平板焊接,采集使用不同焊 丝时的焊接热循环曲线.使用热电偶进行温度场的 采集,采集点距焊缝中心的距离为8mm,距离焊缝 起点6cm.热电偶的具体采集位置如图2所示.实 时温度采集程序由 LabView 软件编写.

无论焊缝上是否出现裂纹,均对鱼骨试样沿焊 接方向起的第二道处进行取样,若取样处有裂纹, 则将取下来的断口部分立刻密封保存,以防止其被 氧化.其余焊接接头横截面均按照金相制样的标准 流程进行处理,包括打磨、抛光和腐蚀等.先将试样 经水砂纸打磨至 2000 号,再用抛光膏进行抛光处 理,经超声波清洗 20 min 后,在室温条件下采用 Keller(1 mL HF + 1.5 mL HCl + 2.5 mL HNO₃ + 95 mL H₂O)溶液进行腐蚀.采用捷克 TESCAN 公 司生产的 LaB6(六硼化镧) 扫描电子显微镜分析接 头的微观组织形貌;使用 Bruker XFlash6130 能谱 仪分析焊接接头的化学成分.

表 2 焊接工艺参数 Table 2 Welding process parameters

焊枪角度α/(°)	保护气体	保护气体流量 $Q/(mL \cdot s^{-1})$	焊接速度v/(mm·min ⁻¹)	焊接电流I/A	电弧电压U/V
90	Ar	15	700	152	21



图 2 实时温度曲线采集示意图 (mm)

- Fig. 2 Schematic diagram of fish bone sample temperature curve acquistion on time
- 2 试验结果与讨论
- 2.1 焊丝中 Si 含量对铝合金接头裂纹敏感性影响图 3 是使用 Si 含量分别为 0.06%, 4.5% ~ 6%,

11%~13% 焊丝进行堆焊, 铝合金鱼骨状试样焊缝 表面宏观形貌. 从图 3 可以看出, 裂纹主要出现在 焊缝中心线上, 从起弧处萌生, 沿着焊接方向逐渐 向后扩展, 且随着 Si 含量从 0.06% 上升到 5% 左 右时, 试样的开裂宽度从 0.79 mm 上升到 1.68 mm, 当焊丝中 Si 含量继续上升, 达到 12%, 试样表面并 没有裂纹出现, 材料热裂纹敏感性得到了抑制.

液态金属的凝固是一个涉及相的形成和转变、物质传递以及热量传导等过程的复杂过程.材料的 敏感性与其凝固过程中糊状区的大小直接相关^[16-17]. 对使用三种 Si 的焊丝焊接所得的焊缝进行能谱扫 描,可以发现使用 ER1100 焊丝时,焊缝区域的 Si 含量为 0.07%,使用 ER4043 焊缝区域的 Si 含量为 1.62%;使用 ER4047 焊缝区域的 Si 含量为 5.19%. Al-Si 熔体在凝固的过程中会发生共晶反应,如图 4



图 3 Si 含量对表面形貌的影响 Fig. 3 Effect of Si content on surface morphology. (a) ER1100; (b) ER4043; (c) ER4047

所示. Al 和 Si 的熔点分别是 660 和 1 414 ℃, 共晶 反应温度为 577 ℃, 共晶点成分为 Si 含量 12.6%. 在 共晶温度时, Si 在 Al 中的溶解度最大, 可达 1.65%; 室温下, Si 在 Al 中的溶解度仅为 0.05%. 故而当使 用 ER1100 焊丝时, 焊缝中的 Si 含量很低, 且由于 6063 铝合金本身含有一定量的 Mg 元素, Al 与 Mg₂Si 形成低熔点的伪二元共晶, 提高了材料的热 裂纹敏感性. 使用 ER4043 焊丝时焊缝中的 Si 含量 为 1.62%, 在熔体凝固时处于糊状区的温度区间较 大, 热裂纹敏感性很高. 当使用 ER4047 焊丝时, Si 的含量进一步升高, 向共晶点附近移动, 糊状区 的温度区间变小, 热裂纹敏感性降低.

2.2 焊丝中 Si 含量对焊缝组织与形貌的影响 由图 5 和图 6 可以看出,随着 Si 元素的增加,



图 4 Al-Si 合金平衡结晶相图 Fig. 4 Alpha-Si alloy equilibrium crystal phase diagram

焊缝区域的晶粒界线越发明显(图 5),这是由于在 熔体凝固的过程中,溶质(Si)将发生再分配,溶质 元素将大量的富集于晶粒之间.同时焊缝区域的晶



图 5 Si 元素的分布 Fig. 5 Distribution of Si elements. (a) ER1100; (b) ER4043; (c) ER4047; (d) base metal





Fig. 6 Using different wire grain sizes. (a) ER1100; (b) ER4043; (c) ER4047; (d) base metal

粒大小呈现出先增大, 后减小的趋势 (图 6). 当使 用 ER1100 焊丝时, 焊缝中的 Si 含量仅为 0.07%, Mg 含量为 0.98%, 在 Al-Mg-Si 合金中, Mg 与 Si 会首先形成 Mg₂Si 相, 然后 Mg₂Si 与 Al 形成伪二 元共晶. 剩余的 Mg 元素将以质点的形式弥散于熔 体中, 使得基体晶粒细化, 强度提高; 使用 ER4043 焊丝和 ER4047 焊丝时, Si 元素的含量增加, Si 元 素的熔点为 1 414 ℃, 远高于 6063 铝合金. 在冷却 过程中, Si 元素会优先凝固, 形成大量的晶核, 并成 为形核质点, 为后续合金熔体的非均质形核提供条 件, 故而晶粒得到细化, 焊缝组织的强度提高, 抗裂 性能变好.

图 7 为使用 ER1100 焊丝和 ER4043 焊丝时焊 缝的断口形貌.可以看出,晶粒是完整的,所以裂纹 有沿晶开裂的特点.6063 铝合金在焊接的过程中, 焊缝晶界处形成了低熔点共晶薄膜,低熔点共晶薄 膜在焊接应力的作用下被拉开,形成热裂纹.同时 观察 ER4043 的断口形貌可以发现,焊缝的晶粒间 有大量的针状相存在,针状相与周围的组织的形态 差异较大,使得该小区域物相出现不均匀性,导致 该区域组织结构发生突变,容易产生各种缺陷,同 时这种交错的针状组织会影响凝固后期熔池的流 动性,阻碍液态金属对已有缺陷源的愈合作用.通 过点能谱分析发现,这种针状相中 Si 元素的含量 为 38%. 在凝固后期, Si 元素在晶界处发生偏析,



(a) 使用 ER1100 焊丝的断口形貌



(b) 使用 ER4043 焊丝的断口形貌

图 7 使用不同焊丝时的断口形貌

Fig. 7 Fracture morphology when using different welding wires. (a) using ER1100; (b) using ER4043

与 Al 发生共晶反应, 生成 Al-Si 二元共晶, 其共晶 温度很低, 仅为 577 ℃, 在应力的作用下很容易被 拉裂.

图 8 是使用 ER4047 焊丝时焊缝中晶界区域的 形貌. 从图片可以看出,随着 Si 含量的提高, Al 基 体晶粒之间的相得到细化, ER4047 焊缝的晶粒之 间存在大量的粒状相, 对晶粒基体和晶间的颗粒相 进行点能谱分析,得到其各种元素含量如表 3 所 示. 通过上面的分析可以知道,这种颗粒状的相也 是 Al-Si 二元共晶相. 这种共晶相有很强的流动 性, 对已有的缺陷源有很好的愈合作用,同时呈细 粒状分布,可以提高组织的强度,使裂纹不易扩展, 最终对裂纹的出现起到很好的抑制作用.



图 8 使用 ER4047 焊丝的焊缝形貌 (未开裂) Fig. 8 Weld morphology using ER4047 wire (uncracked)

表 3	晶粒基体与晶间各元素原子分数 (%)
Table 3	Grain matrix and intergranular content

能谱点	Al	Si
能谱1	98.74	1.26
能谱2	59.40	40.60

2.3 焊丝中 Si 含量对焊接热循环的影响

对于 Al-Mg-Si 合金, Mg, Si 元素的比列不同 会对其熔点热导率等物理性能产生显著的影响. 一 方面, Si 元素的熔点 (1 414 ℃) 远高于 Al 元素的熔 点 (650 ℃), 当 Si 元素增多时, 合金的熔点有所升 高; 另一方面, 当 Mg, Si 元素的含量比逐渐增大 时, 合金的热导率呈现出先升高后降低的趋势^[18-21].

图 9 是使用 Si 含量分别为 0.06%, 4.5% ~ 6%, 11% ~ 13% 的焊丝进行平板堆焊时, 焊接热循环的温度曲线. 从图中可以看出: 当焊丝中的 Si 含量为 0.06% 时, 采集处的最高温度为 298 ℃, 温度降低到 120 ℃ 用时 1.2 s, 冷却速度为 248.33 ℃/s; 当 Si 含量为 4.5% ~ 6% 时, 采集处的最高温度为 357 ℃,温度降低到 120 ℃ 用时 1.3 s,冷却速度为 274.62 ℃/s;当 Si 含量为 11%~13% 时,采集处的 最高温度为 376 ℃,温度降低到 120 ℃ 用时 2.6 s, 冷却速度为 144.62 ℃/s. 在焊接熔池凝固的过程 中,较高的冷却速度会使得熔池在很短的时间内就 会从液体变为固态,对于已经存在的缺陷源,并没 有尚处于的液体金属对其进行愈合;同时较快的凝 固过程会导致热应力大量积聚,对于已有的裂纹源 和尚未完全凝固的晶间液膜,在拉应力的作用下极 易扩展,最终导致宏观裂纹的产生.



图 9 使用不同焊丝时焊缝区域温度场

Fig. 9 Temperature field in the weld zone when using different welding wires

3 结论

(1) 随焊缝 Si 含量的增大, 铝合金接头中心会 出现结晶裂纹, 且敏感性逐渐先升高后降低.

(2)随着焊缝 Si 含量的增大,焊缝金属在凝固 过程中停留在糊状区温度区间的时间先增大,再减 小,热裂纹的敏感性也随之而变.在这个过程中,焊 缝区晶界间的 Si 偏析逐渐出现,且其形态从针状逐 渐变为粒状,由组织形态导致的物相不均和组织应 力得以消除,从而使得裂纹敏感性先增后减.

(3) 焊缝中 Si 含量的增加, 使得焊缝区晶粒先 有所增加, 后又逐渐细化, 晶粒的细化程度是影响 结晶裂纹敏感性的重要原因. 同时, 焊缝区域的最 高温度随 Si 含量的增加逐渐升高, 但冷却速度呈现 先增加后减小的趋势, 这与结晶裂纹的敏感性变化 一致.

参考文献

automotive lightweight concepts based on material selection and functional integration[C]// TMS World Conference, Cham: Springer, 2018.

- [2] 孙冠男. 汽车轻量化技术 [J]. 汽车工程师, 2017(7): 14-15.
 Sun Guannan. Automotive lightweight technology[J]. Automotive Engineer, 2017(7): 14-15.
- [3] Sun J. Research on situation and application prospect of automotive body sheets Al-Mg-Si based (6000 series) alloy[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, 452(2): 022082.
- [4] Wang G, Zhao Y, Hao Y. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018(1): 73 - 91.
- [5] Chang Yunfeng, Lei Zhen, Wang Xuyou, *et al.* Characteristic of laser-MIG hybrid welding with filling additional cold wire for aluminum alloy[J]. China Welding, 2018, 27(3): 39 – 45.
- [6] 冯时. 6082 铝合金激光填丝焊焊接特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔 滨工业大学, 2018.
- [7] 阮野, 苏金龙, 乔建毅, 等. 湿度对铝合金接头裂纹敏感性的影响规律及机理 [J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 95 99.
 Ruan Ye, Su Jinlong, Qiao Jianyi, *et al.* Effect and mechanism of humidity on crack sensitivity of aluminum alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 95 99.
- [8] Ghaini F M, Sheikhi M, Torkamany M J, et al. The relation between liquation and solidification cracks in pulsed laser welding of 2024 aluminium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 519(1-2): 167 – 171.
- [9] 黄九龄, 孔谅, 王敏, 等. 纯钛 TA2 薄板双钨极氩弧焊焊接工 艺 [J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 14 - 18.
 Huang Jiuling, Kong Liang, Wang Min, *et al.* Double tungsten arc welding process for pure titanium TA2 sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 14 - 18.
- [10] Chen Y, Lei Z K, Bai R X, et al. Study on elastoplastic crack propagation behavior of laser-welded 6061 aluminum alloy using digital image correlation method[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2017, 281(1): 012040.
- [11] Coniglio N, Cross C E. Mechanisms for solidification crack initiation and growth in aluminumwelding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40(11): 2718 – 2728.

- [12] 王小杰. Al-Mg-Si 合金激光焊接凝固裂纹形成机理研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- [13] 农琪, 谢业东, 金长义, 等. Al-Mg-Si 铝合金氩弧焊结晶裂纹形成机理的研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(1): 205 207.
 Nong Qi, Xie Yedong, Jin Changyi, *et al.* Study on the mechanism of crystalline crack formation in argon arc welding of Al-Mg-Si aluminum alloy[J]. Thermal Engineering, 2013, 42(1): 205 207.
- [14] 齐振余. Al-12.7Si-0.7Mg 合金 MIG 焊接工艺和焊后热处理对 接头组织与性能的影响 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [15] 汪认. A6N01S-T5 铝合金焊接热裂纹性能评价优化研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [16] Campbell J. Castings[M]. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [17] Katgerman L, Eskin D G. In search of the prediction of hot cracking in aluminium alloys[M]. Springer: Hot Cracking Phenomena in Welds II, 2008.
- [18] 杨伏良,甘卫平,陈招科. 硅含量对高硅铝合金材料组织及性能的影响 [J]. 材料导报, 2005, 19(2): 98 100.
 Yang Fuliang, Gan Weiping, Chen Zhaoke. Effect of silicon content on microstructure and properties of high silicon aluminum alloy[J]. Materials Guide, 2005, 19(2): 98 100.
- [19] 张建新,高爱华. Si 含量对 6063 铝合金组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2008(5): 74 77.
 Zhang Jianxin, Gao Aihua. Effect of Si content on the structure and properties of 6063 aluminum alloy[J]. Journal of Material Heat Treatment, 2008(5): 74 77.
- [20] 陈定贤. 高导热铝合金设计中亚共晶 Al-Si 合金与共晶 Al-Si 合金的分析研究 [J]. 资源再生, 2019(1): 55 57. Chen Dingxian. Analysis and research of hypoeutectic Al Si alloy and eutectic Al Si alloy in the design of high thermal conductivity aluminum alloy[J]. Resource Regeneration, 2019(1): 55 – 57.
- [21] 杨迎新,张乐平,钟建华.提高 6063 铝合金导热性能的途径探 讨 [J]. 金属功能材料, 2004(3): 23 - 25.

Yang Yingxin, Zhang Leping, Zhong Jianhua. Approach to improving the thermal conductivity of 6063 aluminum alloy[J]. Metal Functional Materials, 2004(3): 23 – 25.

第一作者简介:王俊, 1995年出生, 硕士; 主要从事铝合金焊 接相关研究; Email: junjunwang@sjtu. edu. cn.

通信作者简介:李芳, 副研究员; Email: lifang302@sjtu.edu.cn.

(编辑: 郑红)