

6063/6082铝合金焊接裂纹分析 及其填丝焊改善

朱江, 张生庭, 葛金波, 邹超

欣旺达动力科技股份有限公司 广东深圳 518107

摘要: 以6063/6082铝合金板为母材, 采用环形光斑激光设备进行激光对接焊接, 研究了焊接功率、焊接速度对6063/6082铝合金焊接裂纹的影响, 采用填丝焊工艺对焊接裂纹进行了改善。结果表明: 对于激光自熔焊, 随着焊接功率的增加, 焊接裂纹呈先减少后增加的特点, 焊接功率 $>4800\text{W}$ 后, 熔合区、焊缝中心区均出现了大量河流状裂纹; 随着焊接速度的增加, 焊接裂纹明显增加, 且尺寸变大, 裂纹主要分布在熔合区及热影响区。当焊接功率为 4400W 、焊接速度为 50mm/s 时, 焊缝裂纹相对较少, 但无法完全消除。填丝焊工艺对6063/6082铝合金焊接裂纹起到了很好的抑制作用, 同时提高了焊缝力学性能。添加ER5183焊丝的焊缝成形优异, 未发现明显裂纹存在, 焊缝剪切力达 11260N , 较自熔焊焊缝剪切力(8560N)提高了 31.5% 。填丝焊工艺抑制焊接裂纹形成的主要机制为降低焊缝冷却速度、调控焊缝Mg、Si元素含量、改善焊缝共晶组织的形态及分布。

关键词: 6063/6082铝合金; 焊接裂纹; 激光对接焊; 环形光斑; 填丝焊

Welding crack analysis of 6063/6082 aluminum alloy and its improvement of wire filling welding process

ZHU Jiang, ZHANG Shengting, GE Jinbo, ZOU Chao

Sunwoda Mobility Energy Technology Co., Ltd., Shenzhen 518107, Guangdong, China

Abstract: The effect of welding power and welding speed on the welding crack of 6063/6082 aluminum alloy was studied by using ring spot laser equipment with 6063 and 6082 aluminum alloy plates as base material. The welding cracks were improved by using laser fillet welding (LFW). The results show that for laser self-fusion welding, with the increase of welding power, the welding cracks decrease first and then increase. When the welding power is higher than 4800W , a large number of river-like cracks appear in the fusion zone and the fine crystal zone in the center of the weld. With the increase of welding speed, welding cracks increase obviously, and the size becomes larger, and the cracks are mainly distributed in the fusion zone and the heat affected zone. When the welding power is 4400W and the welding speed is 50mm/s , the weld crack is relatively small, but it cannot be completely eliminated. The LFW process of 6063/6082 aluminum alloy can restrain the welding crack well and improve the mechanical properties of the weld. With the addition of ER5183 welding wire, the weld forming is excellent, no cracks are found in metallography, and the shear force of the weld reaches 11260N , which is 31.5% higher than that of the self-melting welding weld (8560N). The main mechanism of LFW to inhibit the formation of welding cracks is to reduce the cooling rate of weld, regulate the Mg and Si content of weld, and improve the morphology and distribution of weld eutectic structure.

Keywords: 6063/6082 aluminum alloy; welding crack; laser butt welding; ring spot; laser fillet welding

1 序言

Al-Mg-Si合金（又称6系铝合金）具有强度高、密度低、成形性好及导热性优异等特点，在航空航天、汽车工业、新能源动力电池行业应用十分广泛^[1]。激光焊接能量密度高、深宽比大、热影响区小，是中高强铝合金材料最重要的连接方法之一^[2, 3]。然而，铝合金对激光具有极高的反射率，且熔融铝在凝固时收缩率大、易产生共晶组织，使激光焊接铝合金不可避免地产生裂纹、气孔等焊接缺陷^[4]。一直以来，焊接裂纹问题是国内外众多学者研究中高系铝合金的热点之一，迄今仍没有得到很好的解决。

目前，关于铝合金焊接裂纹的研究主要包括裂纹形成的理论与预测模型^[5-8]、工艺优化降低裂纹敏感性^[9-11]两大方面。关于铝合金裂纹形成机制较为成熟的理论为晶间液膜理论^[5]，该理论认为，铝合金焊接裂纹主要由凝固过程中晶间液相在收缩拉应力下形成的孔隙未被其余液相及时填充造成的。王小杰^[7]针对Al-Mg-Si合金激光焊接裂纹的形成机制，建立了焊接参数与焊接裂纹敏感性之间定量化的数学预测模型，对于铝合金凝固裂纹的控制具有重要意义。另外，通过焊接参数优化，合理控制熔融铝液的凝固过程，有利用降低裂纹敏感性，减小焊接开裂倾向。赵北明等^[9]研究了激光功率、焊接速度、焊缝位置等因子对焊缝裂纹敏感性的影响，通过响应面优化法建立了裂纹敏感率与影响因子间的数学模型，获得了因子的最优参数，从而有效控制了裂纹的萌生。邵明皓等^[11]以6082-T6 铝合金板为母材、ER9505为焊丝进行激光填丝焊接，研究发现在激光功率为1800W、焊接速度为15mm/s时，焊缝成形较好。但由于填丝焊过程中引入了Zn，因此形成了较多低熔点共晶组织，在热循环作用下焊缝局部液化导致了沿晶开裂。

对于6系与6系铝合金之间对接焊或叠焊的焊接裂纹研究，目前国内外鲜有报道。本文采用环形光斑激光焊接设备，研究了焊接工艺对6063/6082铝合金对接焊焊接裂纹形成的影响。基于优化的最佳焊接参数，采用填丝焊工艺焊接6063/6082铝合金，获得了无焊接裂纹、力学性能优异的焊缝。分析了填丝焊工艺抑制焊接裂纹产生的机制，为激光焊接铝

合金的裂纹控制提供应用参考。

2 试验材料与设备

试验用材料为6063与6082铝合金板（型）材，厚度分别为1.8mm、3.5mm；材料热处理状态为T6，焊接形式为对接焊，焊缝长度40mm，焊接接头如图1所示。填丝焊工艺所用焊丝规格为 ϕ 1.2mm。所用试验材料的化学成分见表1。

试验用设备如图2所示，其主要由深圳联赢激光股份有限公司生产的4000/2000型YLS-AMB环形光斑激光焊接设备（内环功率进行深熔焊接、外环功率进行预热缓冷，配备焊丝送给机构）、德国库卡（KUKA）机器人有限公司生产的六轴焊接机器人及勒斯姆勒激光技术（上海）有限公司生产的OCT焊接熔深监测系统组成。

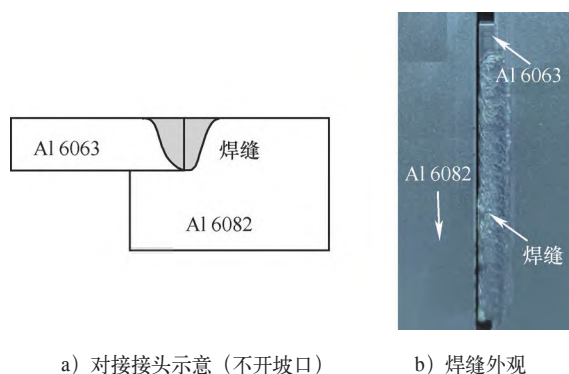


图1 6063/6082铝合金焊接接头

表1 焊接材料及填充焊丝的化学成分（质量分数）（%）

元素	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Al
Al6063	0.660	0.630	0.016	0.110	0.009	0.006	0.009	0.048	余量
Al6082	1.011	1.105	0.625	0.142	0.042	0.016	0.031	0.082	余量
ER4047	0.090	12.215	0.090	0.210	0.012	0.009	0.011	—	余量
ER5183	4.665	0.511	0.788	0.195	0.022	0.062	0.035	0.096	余量

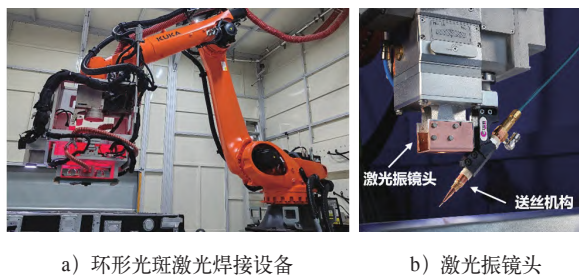


图2 试验设备

3 试验表征方法

焊接试验基本参数为焊接功率4400W、焊接速度50mm/s、送丝速度55mm/s、离焦量0mm、保护气流量8L/min，吹气方式为侧吹氮气；采用不同的焊接功率和焊接速度进行工艺优化试验。基于金相放大镜，将制备的焊件焊缝沿纵截面切开，经打磨、腐蚀后在金相放大镜下观察焊接裂纹情况。采用50000N万能试验机测试焊件的力学性能（剪切力）；采用Image Pro Plus (IPP) 图片处理软件统计焊缝中的金相可观裂纹长度。

4 结果分析与讨论

4.1 6063/6082铝合金激光自熔焊的焊接裂纹分析

在其他参数不变的条件下，研究了焊接功率、焊接速度对6063/6082铝合金对接焊焊接裂纹的影响，分析了不同焊接参数下6063/6082铝合金焊缝的焊接裂纹，讨论了6063/6082铝合金焊缝裂纹的形成原因。

图3所示为不同焊接功率下6063/6082铝合金焊缝的纵截面形貌。由图3可看到，焊接功率对焊缝裂纹的产生有重要影响。随着焊接功率的增加，焊接裂纹呈先减少后增加的特点。在焊接功率为4000W时，焊接可观裂纹相对较少；当焊接功率超过4800W后，焊接裂纹大幅增加。观察焊缝金相图可知，当焊接功率<4400W时，裂纹主要分布在焊缝边缘的熔合区以及热影响区，呈河流状花样分布。当焊接功率>4800W时，裂纹数量大幅增加，除了熔合区分布有裂纹外，焊缝中心区也产生了大量呈排列状的线条裂纹，这些裂纹经扩展后汇聚成尺寸更大的裂纹，会严重损害焊缝的质量和服役性能。相关文献指出^[7]，随着焊接功率的增加，焊缝热输入增加，焊缝熔深和熔宽增大，更多的熔化金属在凝固收缩时产生了较大的应变。同时，随着焊接热输入的增加，熔池金属在高温下的停留时间变长，导致焊缝晶粒变得粗大，增加了焊缝内部的应力集中程度。这些因素共同导致了较大的激光功率带来的较高的裂纹敏感性。

图4所示为不同焊接功率下6063/6082铝合金焊缝的金相可观裂纹总长度。由图4可知，当焊接功率为3600W时，金相可观裂纹总长度为867 μ m，当焊接功率增加到5200W时，金相可观裂纹总长度达

1912 μ m，裂纹总长度随焊接功率的增加先减少后增加，结果与图3所示规律一致。

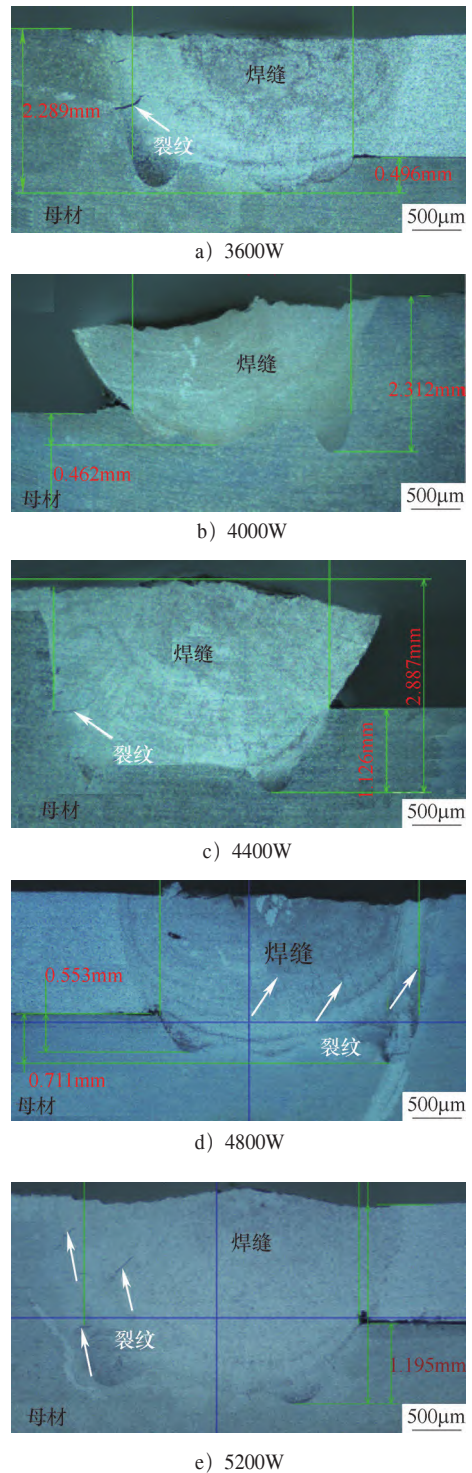


图3 不同焊接功率下6063/6082铝合金焊缝的纵截面形貌

图5所示为不同焊接速度下6063/6082铝合金焊缝的纵截面形貌。由图5可知，随着焊接速度的增加，焊接裂纹明显增加，且裂纹主要分布在熔合区和热影响区。当焊接速度为30mm/s时，焊接裂纹

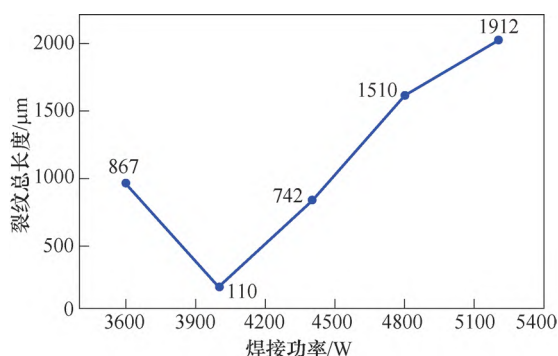


图4 不同焊接功率下6063/6082铝合金焊缝的金相可观裂纹总长度

较少,仅有少量的小尺寸裂纹;当焊接速度增加到70mm/s时,焊接裂纹大幅增加,且裂纹尺寸较大,裂纹之间有汇聚的倾向。结果说明,过快的焊接速度会大幅增加裂纹敏感性和热裂倾向。在焊接速度较快的条件下,焊接温度场梯度较大,焊缝冷却速度增加,焊缝内部累积的应变增加,导致焊缝发生开裂。另外,较快的焊接速度导致熔融金属的凝固过程不充分,凝固收缩率较大(最大可达5%),焊缝内部产生较大应力和变形,液态金属结晶时于晶界形成的低熔点共晶组织在拉应力的作用下形成热裂纹^[7]。

图6所示为不同焊接速度下6063/6082铝合金焊缝的金相可观裂纹总长度。由图6可看到,随着焊接速度从30mm/s提高到70mm/s,焊缝的可观裂纹总长度从95μm增加到2812μm,焊接速度的增加提高了焊缝的裂纹敏感性,结果与图5所示规律一致。

上述结果表明,在激光自熔焊条件下,6系铝合金焊接裂纹的产生无法完全避免,通过参数优化只能尽可能降低开裂倾向。图7所示为高系列铝合金焊缝凝固裂纹形成机理^[6]。在凝固过程后期,焊缝内部由多数的凝固区域和少数的液相区域组成,凝固区的晶粒之间存在少量液相;熔融金属凝固收缩产生的拉应力将晶间液相拉开形成了部分孔隙。随着凝固过程的进行,若其余液相能及时填补孔隙,则不会产生裂纹,若无法填补孔隙,则会导致裂纹的产生^[8]。在实际焊接工况下,焊接熔池温度场存在较大的温度梯度,铝合金液态金属冷却速度快、凝固收缩大,晶间液相回填机制无法完全进行,导致焊接裂纹不可避免地产生。

4.2 基于填丝焊工艺的凝固裂纹改善

图8所示为在相同的激光焊接参数下,采用不

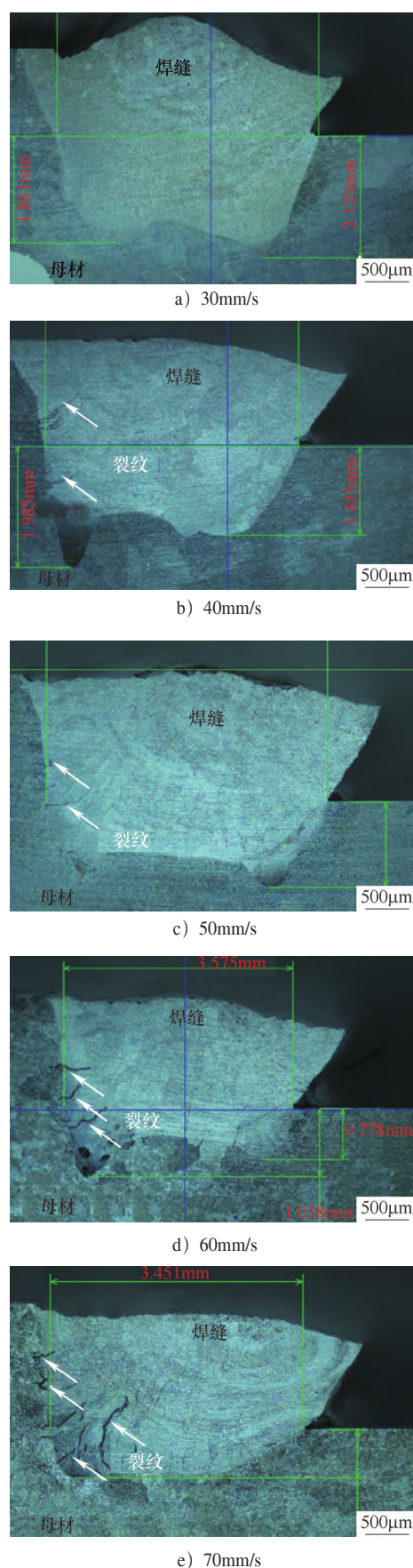


图5 不同焊接速度下6063/6082铝合金焊缝的纵截面形貌

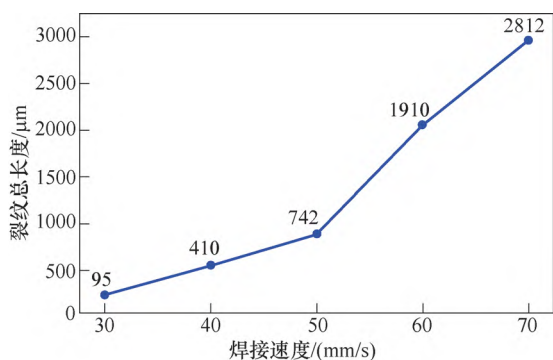


图6 不同焊接速度下6063/6082铝合金焊缝的金相可见裂纹总长度

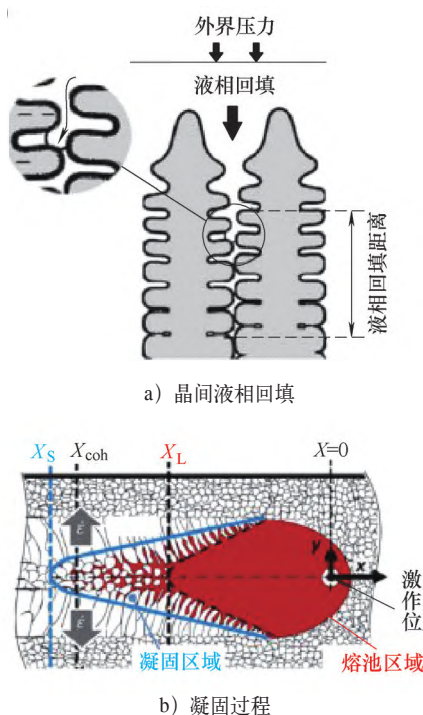
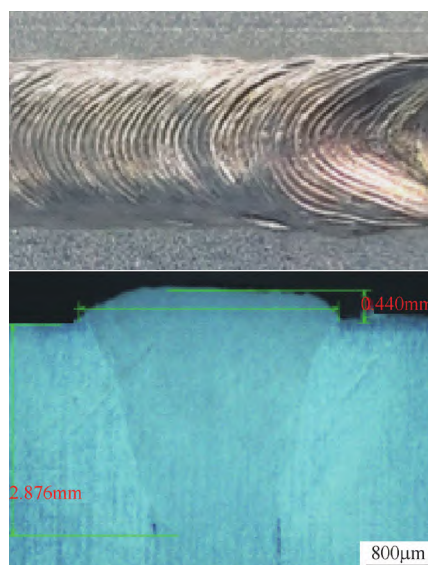


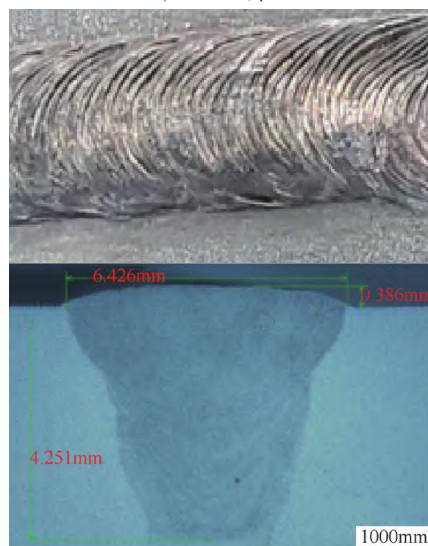
图7 高系列铝合金焊缝凝固裂纹形成机理^[6, 8]

同的填丝焊工艺得到的6063/6082铝合金焊缝外观及其纵截面形貌。对比图8中不同填丝焊工艺的焊缝外观可发现，经激光填丝焊接后，焊缝成形优异，焊接外观良好；未填丝的激光自熔焊焊缝成形较差，焊缝表面可见大量裂纹。由图8中不同填丝焊工艺的纵截面形貌可知，在焊缝内部，添加ER5183、ER4047焊丝的焊缝未见明显的裂纹，而未添加焊丝的自熔焊在焊缝熔合区发现较多呈河流状的细条裂纹。结果说明，激光填丝焊工艺对6063/6082铝合金焊缝凝固裂纹的抑制作用较为显著。

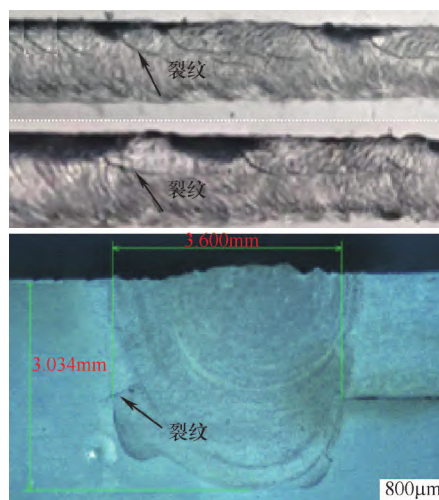
不同填丝焊工艺6063/6082铝合金焊缝的裂纹长度及力学性能见表2。由表2可看到，添加ER5183焊丝可以避免焊接裂纹的产生，添加ER4047焊丝的



a) ER5183焊丝



b) ER4047焊丝



c) 未填丝

图8 不同填丝焊工艺6063/6082铝合金焊缝外观（上侧）及其纵截面形貌（下侧）

焊缝裂纹长度很小（仅20 μm ），而未添加焊丝的激光自熔焊焊接裂纹长度为742 μm ，结果与图8所示规律一致。同时，填丝焊工艺提高了焊缝力学性能，添加ER5183、ER4047焊丝的焊缝剪切力分别为11260N、10622N，较未添加焊丝的自熔焊焊缝剪切力（8560N）分别提高了31.5%、24.1%。

表2 不同填丝焊工艺6063/6082铝合金焊缝裂纹与力学性能

填丝类型	金相可观测裂纹长度/ μm	焊缝剪切力/N
未填丝	742	8560
ER4047焊丝	20	10622
ER5183焊丝	0	11260

4.3 填丝焊工艺抑制裂纹的机制分析

激光填丝焊显著改善了6063/6082铝合金自熔焊时的开裂现象，提高了6063/6082铝合金的焊接性和焊缝力学性能。研究发现，填丝焊工艺抑制裂纹产生的机制主要包括降低焊缝冷却速度、调控焊缝合金元素含量、改善焊缝共晶组织形态及分布等。

（1）减缓冷却速度 未添加焊丝激光自熔焊的熔池热量集中，焊接过程中的升温速率和降温速率很大，导致焊缝区凝固组织的应变速率高、开裂倾向大。对于激光填丝焊工艺，室温的焊丝向高温熔池不断伸进，一定程度上降低了焊接熔池的温度梯度，减缓了熔池冷却速度；同时，焊丝的熔化需要吸收熔池区域部分热量，这也降低了熔池的能量梯度，有利于减缓冷却速率。岳考捷^[12]研究了填充板条对超高强铝合金焊接裂纹敏感性的影响。结果同样表明，与自熔焊相比，填充高度为1.9mm的板条后，焊接熔池的平均冷却速度降低了70%。熔池冷却速度的降低有利于液态金属的充分凝固，降低凝固组织的应变速率，减少裂纹的萌生和扩展。

（2）调控Mg、Si含量 图9所示为不同填丝焊工艺6063/6082铝合金焊缝的Mg、Si元素名义含量。由图9可知，对于6063/6082铝合金的激光穿透焊，未填丝自熔焊的Mg、Si元素名义含量（质量分数，下同）分别为1.671%、1.735%，而添加ER5183焊丝的Mg、Si元素名义含量分别为6.336%、2.246%。填丝焊工艺焊缝的合金元素含量处于裂纹敏感性较低的范围（高系铝合金裂纹敏感

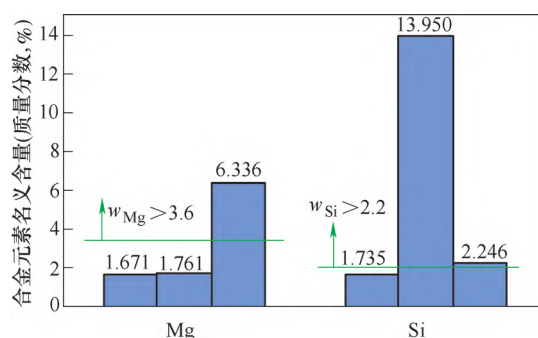


图9 不同填丝焊工艺6063/6082铝合金焊缝的合金元素名义含量

性降低条件^[13]： $w_{\text{Mg}} > 3.6\%$ ， $w_{\text{Si}} > 2.2\%$ ）。

高系铝合金中Mg、Si元素含量对其焊接裂纹敏感性有重要影响。相关文献指出^[14]，6系铝合金（Al-Si-Mg）属于中高强铝合金，合金元素含量较多，导致其凝固温度区间较大，在冷却收缩时有较大的裂纹倾向。6082铝合金的Mg、Si含量（各约1%）处于裂纹敏感性较高的区间，在激光自熔焊下极易产生裂纹。填丝焊工艺可以调控铝合金焊缝中的Mg、Si含量，使之达到较低的裂纹敏感性水平，从而获得无裂纹的优质焊缝。

（3）改善焊缝组织 填丝焊接工艺提高了熔池的搅拌作用和流动性，减缓了液态金属的凝固速度，改善了焊缝组织^[15]，焊缝中心和边缘熔合区的晶粒尺寸均有所增大。因此，整个焊缝组织的晶界数量减少，尤其是三角晶界大幅减少，在一定程度上减少了裂纹的萌生源。同时，由于搅拌作用和流动性的提高，位于晶界处的共晶组织数量减少，其形态由原来的细长连续的条状变为短小的点状或棒状；共晶组织的分布也趋于弥散，显著减少了裂纹源，破坏了裂纹扩展路径，降低了焊缝开裂倾向。

基于以上3大主要机制，在激光填丝焊接工艺下，6063/6082铝合金在焊接过程中的裂纹敏感性大幅降低，焊接质量和焊缝力学性能得到明显改善。

5 结束语

1) 焊接功率和焊接速度对6063/6082铝合金焊接裂纹的形成有重要影响。结果表明，随着焊接功率的增加，焊接裂纹呈先减少后增加的特点，裂纹主要分布在熔合区。随着焊接速度的增加，焊接裂纹明显增加，且尺寸变大，裂纹主要分布在熔合区及热影响区。当焊接功率为4400W、焊接速度为50mm/s时，裂纹形成较少，但无法完全消除。

2) 填丝焊工艺对6063/6082铝合金焊接裂纹的抑制作用较为显著。添加ER5183、ER4047焊丝的焊缝成形优异, 外观良好, 焊接金相下未见明显裂纹存在。填丝焊工艺提高了焊缝力学性能, 其中添加ER5183焊丝的焊缝剪切力为11260N, 较未添加焊丝的自熔焊焊缝剪切力(8560N) 提高了31.5%。

3) 填丝焊工艺抑制6063/6082铝合金焊接裂纹形成的机制主要包括降低焊缝冷却速度、调控焊缝Mg、Si合金元素含量、改善焊缝共晶组织的形态及分布。

参考文献:

[1] 张福豹, 许晓静, 罗勇. 6×××系铝合金微合金化的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26 (S1) : 384-388.

[2] 陶武, 杨上陆. 激光合金激光焊接技术应用现状与发展趋势[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (2) : 1-4.

[3] 凌纯, 孟威. 高功率光纤激光焊接研究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (15) : 15-18, 24.

[4] 杨彪, 刘福运, 檀财旺, 等. 动力电池激光焊接技术的应用现状与展望[J]. 焊接, 2022 (9) : 1-9.

[5] SHEIKHI M, MALEK G F, ASSADI H. Prediction of solidification cracking in pulsed laser welding of 2024 aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2015, 82: 491-502.

[6] HAGENLOCHER C, WELLER D, WEBER R, et al. Analytical description of the influence of the welding parameters on the hot cracking susceptibility of laser beam welds in aluminum alloys[J].

Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50 (11) : 5174-5180.

[7] 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.

[8] FEURER U. Influence of alloy composition and solidification conditions on dendrite arm spacing, feeding and hot tearing properties of aluminium alloys: Proceedings of the International Symposium [C]. Holland : Delft, 1977: 131-145.

[9] 赵北明, 王小杰, 韩振宇, 等. AA6013铝合金光纤激光焊凝固裂纹影响因子研究[J]. 焊接技术, 2019, 48 (7) : 11-15, 1.

[10] 吴圣川, 周鑫森, 张卫华, 等. 激光-电弧复合焊接7075-T6铝合金裂纹扩展分析[J]. 焊接学报, 2013, 34 (2) : 5-8, 113.

[11] 邵明皓, 张华, 张健, 等. 6082铝合金激光填丝焊接接头组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (11) : 28-32.

[12] 岳考捷. 超高强铝合金激光焊接工艺与裂纹抑制方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

[13] 吴爱民, 张健, 郭亮, 等. 激光焊接铝合金热裂纹预测数学模型研究[J]. 应用激光, 2013, 33 (2) : 177-180.

[14] 吴圣川, 朱宗涛, 李向伟. 铝合金的激光焊接及性能评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[15] 周金旭, 康铭, 徐玉君, 等. 5052/6005A异种铝合金激光填丝焊接接头组织与力学性能研究[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42 (5) : 46-50.

MW 20240917

《金属加工 (热加工) 》2025 年第 1 期广告目次

单位名称	查询编号	位置
陕西博创电器有限公司	5325	封面
订阅广告	8000	封二
伊达新技术电源 (昆山) 有限公司	1925	封三
北京金威焊材有限公司	1161	封底

单位名称	查询编号	位置
第 23 届北京国际热处理展览会	8000	正文 136