

T6 热处理与焊接顺序对 A356 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响^①

吴嘉¹, 杨昭¹, 范纲銜², 路建琦¹, 李一凡¹, 谭力笏¹

(1.中南大学材料科学与工程学院,湖南长沙 410083; 2.昆山六丰机械工业有限公司,江苏昆山 215300)

摘要:研究了 A356 铝合金在 T6 热处理后进行搅拌摩擦焊 (T6-FSW) 和搅拌摩擦焊后进行 T6 热处理 (FSW-T6) 2 种不同工艺下的接头组织及力学性能。结果表明, T6-FSW 接头的焊核区由细小的动态再结晶晶粒构成, 但析出相发生溶解或粗化, 接头横向拉伸时抗拉强度和延伸率分别为 214 MPa 和 5.3%, 平均硬度为 76HV_{0.5}, 焊核区抗拉强度和延伸率分别为 236 MPa 和 12.5%, 接头冲击韧性为 12.10 J; FSW-T6 接头的焊核区发生异常晶粒长大, 但具有高密度的细小析出相, 接头横向拉伸的抗拉强度和延伸率分别为 254 MPa 和 8.5%, 平均硬度为 96HV_{0.5}, 焊核区抗拉强度和延伸率分别为 297 MPa 和 7.0%, 接头冲击韧性为 8.23 J。

关键词: A356 铝合金; 搅拌摩擦焊; T6 热处理; 析出相; 异常晶粒长大; 焊接接头; 接头组织

中图分类号: TG453.9

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.034

文章编号: 0253-6099(2023)06-0157-05

Effect of Sequence of T6 Heat Treatment and Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding Joints of A356 Al Alloy

WU Jia¹, YANG Zhao¹, FAN Gangxian², LU Jianqi¹, LI Yifan¹, TAN Lijia¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Kunshan Liufeng Machinery Industry Co Ltd, Kunshan 215300, Jiangsu, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy joints were studied after they were processed with technique of T6 heat treatment followed by friction stir welding (T6-FSW) and technique of friction stir welding followed by T6 heat treatment (FSW-T6) respectively. It is found that the nugget zone of T6-FSW joint is composed of dynamically recrystallized fine-grains, but the precipitates are dissolved or coarsened. The transverse tensile strength and elongation of T6-FSW joint are 214 MPa and 5.3% respectively, and an average hardness is 76HV_{0.5}. The tensile strength and elongation of the nugget zone are 236 MPa and 12.5% respectively, and the impact toughness of the joint is 12.10 J. Abnormal grain growth occurs in the nugget zone of FSW-T6 joint, where fine precipitates with high density are formed. The transverse tensile strength and elongation of FSW-T6 joint are 254 MPa and 8.5% respectively, and an average hardness is 96HV_{0.5}. The tensile strength and elongation of the nugget zone are 297 MPa and 7.0% respectively, and the impact toughness of the joint is 8.23 J.

Key words: A356 Al alloy; friction stir welding; T6 heat treatment; precipitate; abnormal grain growth; welding joints; microstructure of joint

A356 铝合金因为具有优异的比强度、铸造性和耐腐蚀性而被广泛应用于汽车部件的生产, 如制备轮毂、转向节、控制臂等^[1-3]。随着近年来新能源汽车的迅速发展, 搅拌摩擦焊 (FSW) 技术在汽车轻量化领域逐渐受到关注^[4]。T6 热处理 (固溶处理+人工时效) 是

A356 铸件生产过程中的必需工艺。对 A356 铸件进行 FSW 时, T6 热处理与焊接的顺序成为必须评估的问题。

A356 合金属于 Al-Si 系铸造铝合金, 工业应用中通过 T6 热处理来获得理想的强度, 其热处理析出序列为 SSSS→clusters→GP zones→β''→β'→β (Mg₂Si), 其

① 收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 湖南省自然科学基金 (2019JJ40382); 国家重点研发计划 (2016YFB0300905)

作者简介: 吴嘉 (1998—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事铝合金铸造与焊接技术研究。

中, β'' 对强度贡献最大, 峰值时效状态的合金中含有大量的 β'' 析出相^[5-7]。目前 Al-Mg-Si 合金的搅拌摩擦焊研究表明, FSW 的接头强度相对母材会有不同程度的降低, 这与 FSW 过程中析出相 β'' 粗化或者溶解有关^[8-9]。相关研究人员为了解决 FSW 导致的接头软化问题, 对接头组织进行了焊后热处理研究, 结果表明焊后热处理可以恢复热影响区中损失的强度, 但焊核区的再结晶组织会发生异常晶粒长大^[10-13]。因此, T6 热处理与 FSW 的顺序对铝合金接头组织具有重要的影响, 本文旨在探明不同 T6 热处理与 FSW 顺序下 A356 合金接头的微观组织和力学性能, 从而指导 A356 合金搅拌摩擦焊接的工业应用。

1 实验材料与方法

实验所用材料为重力铸造制得的 10 mm × 60 mm × 500 mm A356 铝合金板材, 其化学成分如表 1 所示。搅拌摩擦焊所用设备为小型龙门式搅拌摩擦焊接机, 焊接参数如下: 前进速度 120 mm/min, 旋转速度 1 350 r/min, 轴向压力 3 kN, 倾角 2.5°。FSW 的示意图如图 1(a) 所示, 搅拌针的形状和尺寸如图 1(b) 所示。T6 热处理工艺为: 固溶处理 535 °C/6 h, 室温水淬; 人工时效, 135 °C/5 h。

表 1 A356 铝合金化学成分(质量分数) %

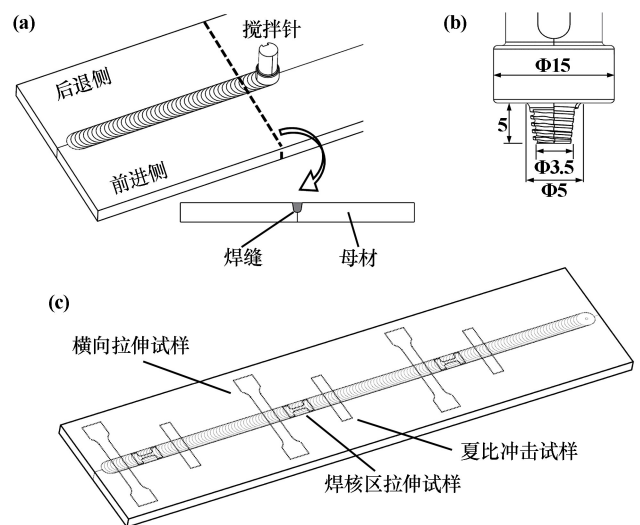
Si	Mg	Ti	Sr	Mn	Fe	Al
6.71	0.28	0.13	0.016	0.01	0.10	余量

将先进行 T6 热处理后进行搅拌摩擦焊的工艺记作 T6-FSW, 先进行搅拌摩擦焊后进行 T6 热处理的工艺记作 FSW-T6, 均采用上文所描述的热处理参数和焊接参数, 两种工艺只存在顺序上的区别。工艺完成后对 A356 接头组织进行微观组织观察和力学性能测试。

金相试样预磨、抛光后, 采用 FeCl₃ 溶液(35 g FeCl₃ + 200 mL H₂O) 腐蚀 15 s 并在体视显微镜下观察其形貌。采用 TESCAN Mira3 扫描电子显微镜观察冲击断口形貌; 采用 MTP-1A 型磁力驱动电解双喷减薄器进行 TEM 制样, 电压 40 V, 在 -40 °C 的 5% 高氯酸乙醇溶液中减薄, 之后再用离子减薄精修, 并用 Tecnai G2F20 场发射透射电子显微镜观察其形貌。

力学性能测试包括显微硬度实验、拉伸实验和冲击实验。显微硬度测试平面为垂直焊接方向的横截面, 测试设备为得川 HVS-1000Z 数显显微硬度计, 测试时载荷 500g, 保荷时间 10 s。拉伸实验分为两类, 取

样位置如图 1(c) 所示, 一种为垂直焊接方向, 截面尺寸为 5 mm × 10 mm 的横向拉伸试样; 另一种为沿焊接方向, 截面尺寸为 2 mm × 3 mm 的焊核区拉伸试样, 取样位置距离焊接上表面 1 mm。两类拉伸实验均以 2 mm/min 的速率在 STS100K 电子万能试验机上进行。垂直于焊接方向取夏比冲击试样, 如图 1(c) 所示, 冲击试样不再额外开缺口, 以未焊透部分作为缺口, 尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm, 冲击实验在 JBS300B 摆锤式冲击试验机上进行, 依照国家标准 GB/T 229—2020, 冲击韧性用冲击吸收能量 K 进行评估。



(a) 焊接示意图; (b) 搅拌针尺寸; (c) 力学性能测试取样位置

图 1 搅拌摩擦焊实验示意图

2 实验结果与分析

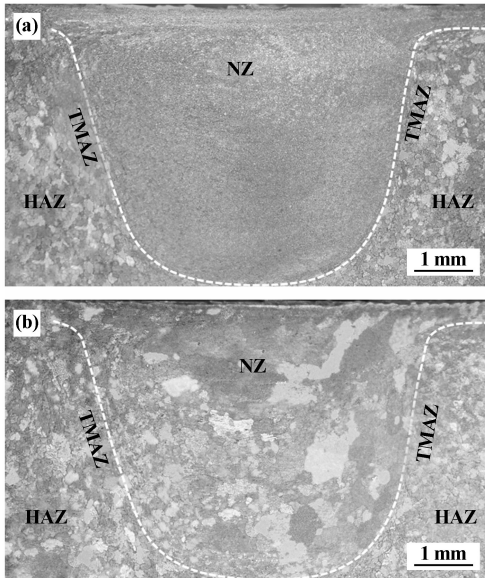
2.1 微观组织观察

2.1.1 焊接组织观察

图 2 为不同工艺下接头垂直焊接方向的横截面金相照片。从图 2 可以看出, 两种工艺下的接头组织均由焊核区(NZ)、热机械影响区(TMAZ)和热影响区(HAZ)构成。

T6-FSW 接头的 NZ 组织在 FSW 过程中经历了剧烈变形, 发生了动态再结晶(Dynamic Recrystallization, DRX)^[9], 因此 NZ 晶粒由原本较为粗大的铸态晶粒演变成细小的 DRX 晶粒。TMAZ 未受到搅拌针的直接作用, 变形较小, 与 HAZ 的晶粒相比被变形拉长, 而 HAZ 在 FSW 过程中只受到热效应的影响, 晶粒为与母材(BM)一致的铸态形貌, 尺寸比较粗大。与 T6-FSW 相比, FSW-T6 的 NZ 中出现了特别粗大的晶粒, 其中最大晶粒的直径已达到 1 mm 左右, 这种 NZ 组织在 T6 热处理后出现粗大晶粒的现象在相关研究中被称

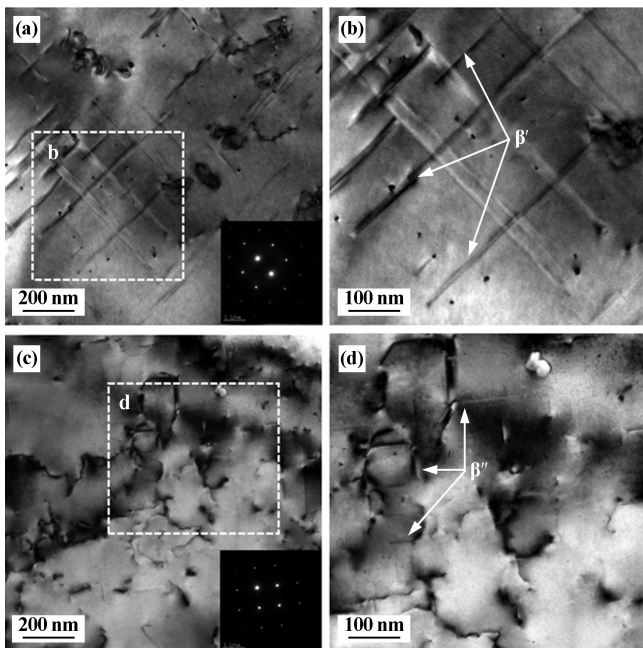
为异常晶粒长大 (Abnormal Grain Growth, AGG)。根据 Humphreys 的晶粒稳定性模型, A356 合金中的第二相颗粒在固溶处理时的高温条件下溶解度增加, 体积分数减少, 对晶界的钉扎力减弱, 导致一些晶粒迅速吞并相邻的晶粒并发生了异常长大^[13]。



(a) T6-FSW; (b) FSW-T6
图2 接头组织金相照片

2.1.2 焊核区 TEM 观察

图3为不同工艺下接头 NZ 区的 TEM 明场图像。图中右下角为相应的选区电子衍射图像, 图3(b)和图3(d)分别为图3(a)和图3(c)对应区域的放大图像。



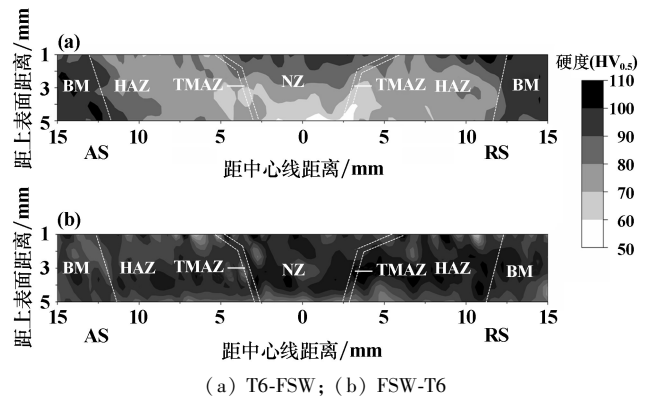
(a), (b) T6-FSW; (c), (d) FSW-T6
图3 接头 NZ 区的 TEM 明场图像

T6-FSW 的 NZ 区 TEM 图像中可以观察到长杆状的析出相 β' , 根据 A356 的时效析出序列, 说明 T6 热处理产生的大量 β'' 相已经在 FSW 的高温过程中溶解, 未溶解的部分转变为 β' 相且部分 β' 相已长大至数百纳米。FSW-T6 的 NZ 区 TEM 图像中可以观察到大量线条状位错以及针状 β'' 相, 且位错附近的 β'' 相数量更多, 这是因为 FSW 剧烈变形过程中产生的位错仍有残余, 在 T6 热处理过程中, 位错作为析出相的形核位点, 促进 β'' 相的析出^[14], 导致 β'' 相在位错附近偏聚。

2.2 力学性能测试

2.2.1 显微硬度

分别测量了 T6-FSW 和 FSW-T6 两种工艺下接头 5 mm × 30 mm 区域内的显微硬度, 测试点左右相隔 0.5 mm, 上下相隔 1 mm, 利用硬度测试结果绘制了如图4所示的云图, 其中纵坐标和横坐标分别表示距离板材上表面和焊接中心线的距离 (单位: mm), AS 和 RS 分别表示 FSW 的前进侧和后退侧。从图4可以看出, 两种工艺下的 BM 硬度为同一水平, 均在 100HV_{0.5} 左右。T6-FSW 的显微硬度测试结果表明 NZ、TMAZ 和 HAZ 区域的硬度相较 BM 显著降低, 平均硬度仅 76HV_{0.5}, 这些区域析出相的溶解或粗化导致了硬度降低。FSW-T6 接头的硬度横向上没有明显变化, 因为 FSW-T6 工艺不存在析出相溶解或粗化现象, NZ、TMAZ 和 HAZ 区域平均硬度为 96HV_{0.5}, 与 BM 硬度处于同一水平, 相较 T6-FSW 试样, 其硬度高 26%, NZ 区的 AGG 并没有导致硬度降低, 说明 AGG 对 A356 合金硬度的影响非常微小。



(a) T6-FSW; (b) FSW-T6
图4 T6-FSW 接头和 FSW-T6 接头的显微硬度

2.2.2 室温拉伸性能

实验所用 A356-T6 母材的拉伸强度为 260 MPa, 延伸率为 8%。两种工艺下垂直焊缝的横向拉伸试样和沿焊缝在焊核区内取得的试样室温拉伸实验结果见图5。

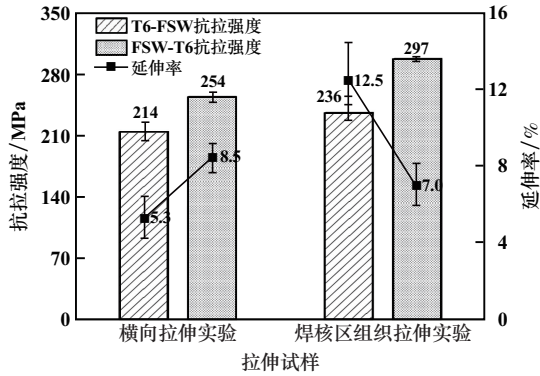


图5 拉伸性能测试结果

横向拉伸实验中, T6-FSW 接头平均抗拉强度和延伸率分别为 214 MPa 和 5.3%, 焊接系数为 82.3%, 3 个拉伸试样的断裂位置均发生在 HAZ 区, HAZ 区域的率先屈服和断裂严重降低了拉伸性能。FSW-T6 接头平均抗拉强度和延伸率分别为 254 MPa 和 8.5%, 焊接系数为 97.7%, 拉伸力学性能与 A356-T6 母材相当。FSW-T6 接头没有集中断裂在发生 AGG 的 NZ 区, 断裂位置无明显规律, 相较 T6-FSW 接头, 其横向拉伸抗拉强度高 18.7%, 延伸率高 60.4%。

为了避开 HAZ 区的影响, 进一步研究 T6-FSW 与 FSW-T6 工艺下焊核区的力学性能, 进行了焊核区拉伸实验, 结果见图 5。结果表明, T6-FSW NZ 区抗拉强度和延伸率分别为 236 MPa 和 12.5%, FSW-T6 NZ 区抗拉强度和延伸率分别为 297 MPa 和 7.0%。FSW-T6 的 NZ 区由于位错诱导 β'' 相析出, 在相同的 T6 热处理工艺下获得了比母材更高的抗拉强度。T6-FSW 的 NZ 区抗拉强度相较 FSW-T6 的 NZ 区低 20.5%, 延伸率相较 FSW-T6 高 78.6%。

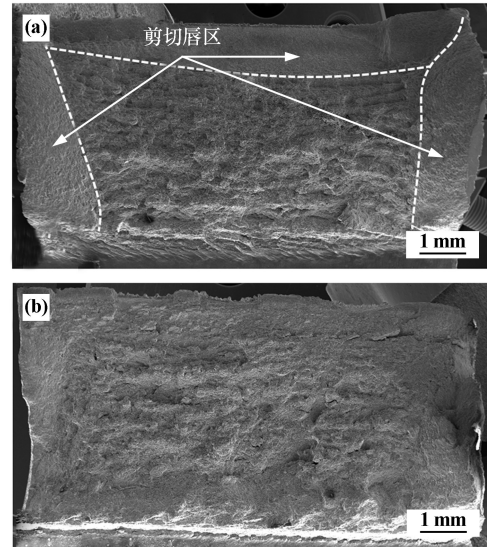
2.2.3 冲击性能

冲击试样的缺口中心线与焊缝中心线重合, 冲击试样长度方向垂直于焊接方向, 因为冲击试样的缺口位于 NZ 下方, NZ 组织对接头的冲击性能起到了决定性作用。T6-FSW 接头与 FSW-T6 接头的冲击实验结果见表 2。可以看出, T6-FSW 接头的冲击吸收能量非常稳定, 平均值为 12.10 J, 比 FSW-T6 接头的平均冲击吸收能量 8.23 J 高 47%。

表2 焊接接头的冲击吸收能量

编号	冲击吸收能量/J	
	T6-FSW	FSW-T6
1	12.10	7.83
2	12.00	8.38
3	12.20	8.47
平均	12.10	8.23

图 6 为不同工艺下接头冲击断口的 SEM 图像。T6-FSW 接头的冲击断口存在大范围的剪切唇区, 表明冲击时接头变形较大, 因此吸收了大量的塑性变形功, 而 FSW-T6 接头的冲击断口较为平坦, 几乎没有剪切唇区, 接头的变形程度远小于 T6-FSW 接头, 韧性较差。



(a) T6-FSW; (b) FSW-T6

图6 接头冲击断口形貌

2.3 焊接组织对接头力学性能的影响机制

从图 2 和图 3 可以看出, T6-FSW 接头具有细小的晶粒, 但在焊接过程热效应的影响下, β'' 相发生了溶解或转变, 导致析出相密度显著降低, 尺寸严重粗化; 而 FSW-T6 接头虽然具有高密度的细小 β'' 相, 但 DRX 晶粒在 T6 热处理中发生了 AGG。

细晶强化和析出相强化在 A356 铝合金中均为至关重要的强化机制。根据霍尔-佩奇关系, 晶粒尺寸越小, 强度越高; 根据析出相强化理论, 共格与半共格析出相密度越大, 间距越小, 强度越高。T6-FSW NZ 区的晶粒尺寸远小于 FSW-T6 NZ 区的晶粒尺寸, 但 T6-FSW NZ 区的强度却远小于 FSW-T6 NZ 区的强度, 说明析出相强化对强度的贡献远大于细晶强化。然而, 由于 FSW-T6 NZ 区晶粒异常粗大, 缺乏晶界的协调变形作用, 塑性和韧性远远小于 T6-FSW NZ 区。

3 结 论

1) T6-FSW 接头中, β'' 发生溶解或粗化, 导致接头强度严重下降, 但 NZ 区组织由细小的 DRX 晶粒组成, 具有极高的塑性和韧性。接头 NZ 区、TMAZ 区和 HAZ 区的平均硬度为 76HV_{0.5}, 横向拉伸的抗拉强度和延伸

率分别为 214 MPa 和 5.3%, NZ 区拉伸实验的抗拉强度和延伸率分别为 236 MPa 和 12.5%, 接头冲击吸收能量为 12.10 J。

2) FSW-T6 的 NZ 区组织中, 析出相在位错诱导下析出 β'' 相, 导致 NZ 拥有极高的强度, 但 AGG 导致 NZ 的塑性和韧性较低。NZ 区、TMAZ 区和 HAZ 区的硬度与母材相当, 平均值为 96HV_{0.5}, 横向拉伸性能达到 A356 母材水平, 抗拉强度和延伸率分别为 254 MPa 和 8.5%, NZ 区的抗拉强度和延伸率分别为 297 MPa 和 7.0%, 接头冲击吸收能量为 8.23 J。

参考文献:

- [1] Santamaría J A, Sertucha J, Redondo A, et al. Towards the Prediction of Tensile Properties in Automotive Cast Parts Manufactured by LPDC with the A356.2 Alloy[J]. *Metals*, 2022, 12(4):656.
- [2] YANG B C, CHEN S F, SONG H W, et al. Effects of microstructure coarsening and casting pores on the tensile and fatigue properties of cast A356-T6 aluminum alloy: A comparative investigation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 857:144106.
- [3] 单柯日, 黄长明, 刘建平. 铝合金控制臂的轻量化设计及挤压铸造工艺[J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36(5):484-487.
- [4] Akinlabi E T, Kayode O. An overview on joining of aluminium and magnesium alloys using friction stir welding(FSW) for automotive light weight applications[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11):112005.
- [5] Mørtzell E A, Qian F, Marioara C D, et al. Precipitation in an A356 foundry alloy with Cu additions—A transmission electron microscopy study[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785:1106-1114.
- [6] TIE D, YAN L F, GUAN R G, et al. Microstructure evolution and

properties improvement of semi-solid squeezed A356 Alloy during heat treatment[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(3):746-752.

- [7] 李玉萍, 唐建国, 叶凌英, 等. 时效时间对 Al-Mg-Si 合金组织及弯曲性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2022, 42(5):153-158.
- [8] 王森, 刘强, 李天景. 6061 铝合金 FSW 焊缝时效组织与力学性能研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(5):163-165.
- [9] Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution [J]. *Progress in Materials Science*, 2020, 117:100752.
- [10] 姚梦佳. 2219 铝合金焊后热处理组织性能演变规律[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [11] Baghdadi A H, Sajuri Z, Omar M Z, et al. Friction stir welding parameters; Impact of abnormal grain growth during post-weld heat treatment on mechanical properties of Al-Mg-Si welded joints [J]. *Metals*, 2020, 10(12):1607.
- [12] Kalinenko A, Mishin V, Shishov I, et al. Mechanisms of abnormal grain growth in friction-stir-welded aluminum alloy 6061-T6[J]. *Materials Characterization*, 2022, 194:112473.
- [13] Jana S, Mishra R S, Baumann J A, et al. Effect of process parameters on abnormal grain growth during friction stir processing of a cast Al alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 528:189-199.
- [14] Chrominski W, Lewandowska M. Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al-Mg-Si alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 793:139903.

引用本文: 吴嘉, 杨昭, 范纲衍, 等. T6 热处理与焊接顺序对 A356 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(6):157-161.

版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后, 本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部

2023 年 12 月