

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.12

7075铝合金FSW接头组织及力学性能研究

李志强, 飞尚才

青海高等职业技术学院, 青海 海东 810799

摘要: 以搅拌头转速(n)和焊接速度(v)为变量,对6 mm厚7075-T6铝合金板材进行搅拌摩擦焊接试验,研究不同焊接参数下焊缝形貌、显微组织、力学性能的变化规律。结果表明,焊接速度100 mm/min时, n 在600~1 400 r/min范围内焊缝均可成形;搅拌头转速800 r/min时, v 在60~120 mm/min范围内焊缝均可成形。焊接接头BM是由再结晶组织和变形板条状组成的轧制组织,WNZ晶粒与强化相细小且分布均匀,形成典型“洋葱环”形貌,TMAZ在板条状组织内形成了回复晶粒组织,AS分界明显;WNZ、TMAZ晶粒大小与 n 呈正相关,与 v 呈负相关。接头硬度分布呈倒“M”形,焊缝区硬度较母材减小,最小值在RS侧TMAZ和HAZ过渡处,WNZ平均硬度分布随着 n 、 v 的增大呈先增大后降低的变化趋势;接头抗拉强度和伸长率,整体分布呈“镰刀”形,与 n 呈正相关,与 v 呈负相关。为获得焊缝成形良好、无明显缺陷,力学性能优良的焊接接头,需大的搅拌头转速配合小的焊接速度, n/v 值应在10以上。

关键词: 7075-T6; 搅拌摩擦焊; 宏观形貌; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)02-0103-09

Study of Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy FSW Joints

LI Zhiqiang, FEI Shangcai

Qinghai Higher Vocational & Technical Institute, Haidong 810799, China

Abstract: Friction stir welding (FSW) experiments were conducted on 6 mm thick 7075-T6 aluminum alloy plates, with the rotational speed (n) and welding speed (v) as variables, to investigate the effects of welding parameters on weld morphology, microstructure, and mechanical properties. The results indicate that sound welds can be achieved within a rotational speed range of 600-1400 r/min at a constant welding speed of 100 mm/min, and within a welding speed range of 60-120 mm/min at a constant rotational speed of 800 r/min. The base material (BM) exhibits a rolled structure comprising recrystallized grains and deformed elongated grains. In the weld nugget zone (WNZ), fine and uniformly distributed grains and strengthening phases form a typical “onion ring” structure. The thermo-mechanically affected zone (TMAZ) shows recovered grain structures within the elongated grains, with a distinct boundary on the advancing side (AS). The grain sizes in both the WNZ and TMAZ are positively correlated with the rotational speed (n) and negatively correlated with the welding speed (v). The microhardness profile across the joint exhibits a characteristic “inverted M” shape, with the weld zone being softer than the BM. The lowest hardness value is located at the transition between the TMAZ and the heat-affected zone (HAZ) on the retreating side (RS). The average hardness in the WNZ first increases and then decreases with increasing n and v . The tensile strength and elongation of the joints generally follow a “sickle-shaped” distribution trend, showing a positive correlation with n and a negative correlation with v . To produce defect-free joints with good formation and excellent mechanical properties, a higher rotational speed combined with a lower welding speed is recommended, with an n/v ratio preferably above 10.

Keywords: 7075-T6 aluminum alloy; friction stir welding (FSW); macro morphology; microstructure; mechanical properties

引用格式: 李志强, 飞尚才. 7075铝合金FSW接头组织及力学性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(2): 103-111.

收稿日期: 2025-04-08 修回日期: 2025-10-15

基金项目: 青海高等职业技术学院科研项目经费资助(GZYKY202302)

作者简介: 李志强(1990—),男,讲师,主要从事材料成形及控制技术的教研工作。E-mail: lizhiqiang@qhvtc.edu.cn.

Citation: LI Zhiqiang, FEI Shangcai. Study of Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy FSW Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 103-111.

0 引言

7075 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 具有强度高、质量轻、耐蚀性好、力学性能好、可铸性好、可焊性好等一系列优点^[1], 被广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车制造、交通运输轻量化、高强度要求的工业领域^[2-5]。采用传统熔焊方法焊接时, 易产生氢气孔^[5]、合金元素烧损^[5]、热裂纹^[5]、Al₂O₃ 夹渣^[5]、接头软化^[5]、工件变形等^[5]焊接性问题, 同时存在需要填充焊丝、污染环境等问题, 难以获得高质量的焊接接头, 这在一定程度上制约了 7075 高强铝合金的工程应用范围。搅拌摩擦焊(FSW)是一种固相连接技术, 凭借焊接过程无金属熔化、无焊材消耗、无有害气体排放、自动化程度高等突出特点, 有效规避了熔焊工艺的固有缺陷, 可显著改善铝合金焊接接头的成形质量与力学性能, 已成为铝及铝合金高效连接的优选技术^[6]。

近年来, 国内外学者对 7075 铝合金 FSW 研究较多。肖雪敏^[7]系统探究了 7075 铝合金薄板 FSW 工艺及焊后热处理对接头性能的影响; 赵佳等^[8]针对 16 mm 厚 7075-T6 铝合金, 采用 400~500 r/min 搅拌头转速与 100~140 mm/min 焊接速度参数开展试验, 分析了接头显微组织与力学性能演变规律; 刘刚等^[9]聚焦 12 mm 厚 7075 铝合金 FSW 接头的抗拉强度、表面形貌及断口特征进行了测试和分析。现有研究多集中于厚板或薄板的窄范围工艺参数探索。

本文以 6 mm 厚 7075-T6 铝合金为研究对象, 通过设置宽范围搅拌头转速与焊接速度参数组合, 研究不同焊接参数对 FSW 焊缝的外观成形、接头显微组织、力学性能等的影响, 为改进 FSW 技术及工程应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 6 mm 厚 7075-T6 铝合金热精轧淬火板。试板尺寸为 6 mm×60 mm×200 mm, 化学成分见表 1, 力学性能见表 2。

表 1 7075-T6 母材化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 7075-T6 base material (wt. %)

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
标准值	≤0.4	≤0.5	1.2~2.0	≤0.3	2.1~2.9
实测值	0.12	0.25	1.5	0.14	2.6
数值	Cr	Zn	Ti	Al	
标准值	0.18~0.28	5.1~6.1	≤0.2	余量	
实测值	0.21	5.6	0.03	余量	

表 2 7075-T6 母材力学性能

Table 2 Mechanical properties of 7075-T6 base material

性能指标	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A /%
标准值	≥540	≥460	≥8
实测值	562	490	12

试验用 FSW 焊机是用 BR-VMC-L53 立式铣床改装而成, 搅拌头最大转速可达 6 000 r/min, 最大焊接速度为 1 200 mm/min, 满足试验需要。搅拌头先用 H13 热作模具钢制备, 轴肩直径 16 mm, 2°倾角, 搅拌针为锥形结构, 根部直径 6.5 mm, 针长 5.7 mm。焊接装配前, 用立式铣床加工板对接装配面, 锉刀去除板材切割残留毛刺, 并清洗试板表面油、污、氧化膜等。由于 FSW 的热输入(n/v 值)与焊缝成形、显微组织及力学性能密切相关, 设置两组变量试验, 统一设定下压量为 0.1 mm, 采用 1G 对接焊接方式: 第一组焊接速度固定为 100 mm/min, 搅拌头转速分别为 400、600、800、1 000、1 200、1 400 r/min; 第二组固定搅拌头转速 800 r/min, 焊接速度分别为 60、80、100、120、140、160 mm/min。通过上述试验方案, 探究搅拌头转速和焊接速度对 7075-T6 铝合金 FSW 接头焊缝成形、显微组织及力学性能的影响规律。

2 试验结果与讨论

2.1 接头表面形貌

不同参数下焊缝表面成形如图 1、图 2 所示, AS 表示前进侧, RS 表示返回侧。图 1 为固定焊接速度 100 mm/min, 搅拌头转速 400~1 400 r/min 的焊缝宏观形貌, 由图可知, 焊缝表面均有或多或少的欠缺, 主要以 RS 侧飞边和焊缝表面毛刺为主。搅拌头转

速 400 r/min 时, 焊缝外观成形尚可, 存在少许飞边; 搅拌头转速 600 r/min 时, 焊缝成形尚可, 搅拌头经过区域有明显的鱼鳞环形纹路, 焊缝表面光泽度高, RS 侧有少许飞边; 搅拌头转速 800 r/min 时, 焊缝成形较好, 无明显缺欠, 环纹细密, 存在轻微毛刺; 搅拌头转速 1 000~1 400 r/min 时, 焊缝表面均出现毛刺现象且焊缝外观颜色发暗, 表面粗糙度高, 这是因为随着搅拌头转速增大, 过大的焊接热输入 (n/v) 导致焊缝的表面出现了毛刺现象, 同时随着搅拌头转速增大, RS 侧出现片状飞边。综合来看, 当搅拌头转速在 800 r/min 时, 焊缝成形较好。

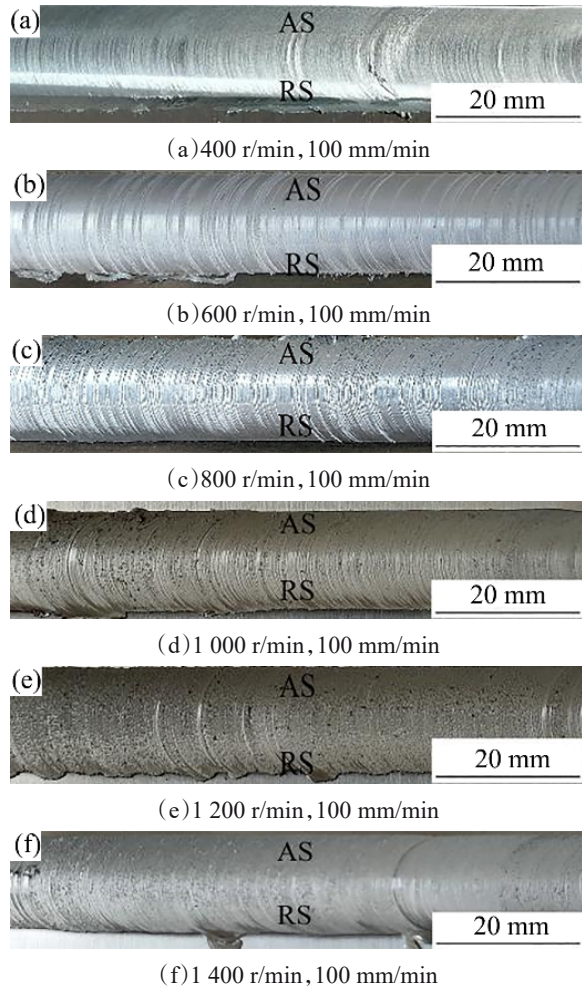


图1 不同搅拌头转速下焊缝外观成形

Fig. 1 Weld appearance under different tool rotational speeds

图2为搅拌头转速 800 r/min, 焊接速度 60、80、100、120、140、160 mm/min 时的焊缝宏观形貌。由图可知, 焊接速度 60 mm/min 时, 焊缝成形较差, 焊缝表面较细密, 鱼鳞环形纹路清晰, 主要是 RS 侧大

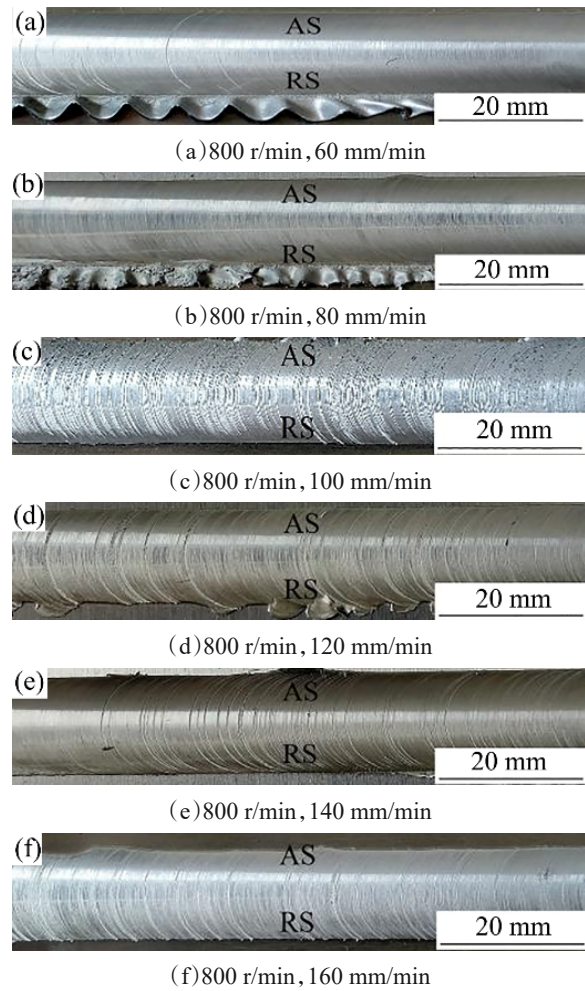


图2 不同焊接速度下焊缝外观成形

Fig. 2 Weld appearance under different welding speeds

量飞边缺欠, 这与过大的焊接热输入有关, 导致搅拌针搅拌区域的金属处于熔化状态或塑化时间太长。焊接速度 80 mm/min 时, 焊缝成形尚可, 焊缝表面相对细密, 环形纹路清晰, RS 侧存在大量飞边缺欠。焊接速度 100 mm/min 时, 焊缝成形较好, 无明显缺欠, 鱼鳞环纹细密, 存在轻微毛刺; 焊接速度 120~160 mm/min 时, 焊缝表面成形一般, 轴肩经过区域出现明显的划痕, 且伴有飞边、毛刺等缺欠, 随着焊接速度变大, 热输入减小, 焊缝宽度变窄, 这主要与过低热输入金属材料流动性变差有关, 金属材料流动性变差, 塑化金属过少造成的。

2.2 微观组织

选取热输入 $n/v=10$ (搅拌头转速 800 r/min、焊接速度 80 mm/min) 的接头进行微观组织分析, 结果如图3所示。根据焊接过程中的受热、受力情况, 焊

接接头可分为母材(BM)、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)和焊核区(WNZ)4个区域,各区域组织与母材存在显著差异。图3f为试验母材组织,呈长宽比大的板条状分布,基体上分布有阻碍塑性变形的再结晶组织和弥散分布Fe、Si的强化相,整体晶粒粗大,是轧制态板材。

图3a、3b为WNZ组织形貌,晶粒细小均匀,远远小于母材晶粒尺寸,这与焊接过程中的搅拌摩擦热有关,也与位错密度的大小有关。在搅拌摩擦焊接过程中,搅拌头与试件充分接触,产生的搅拌热使得周围金属表现出更好的流动性和塑性,焊缝温度升高,直至再结晶温度。与此同时,在搅拌力的作用下,试件金属的位错密度增大,位错能增大,发生动态再结晶,晶核不断形成,在焊接热循环及搅拌作用作用下,形成的晶粒来不及长大发生破碎,形成细小等轴晶。整体来看,WNZ组织存在明暗相间分布的弧形纹,又称“洋葱环”现象,这与焊接热循环作用下发生动态再结晶有关。“洋葱环”弧形纹近似呈不对称同心圆,在远离焊核区域,“洋葱环”环纹间距变小,同心圆越紧密。

图3c为HAZ组织,组织未发生变形,相对于母材稍有粗化现象,这是由于该区域焊接热作用较

弱,仅发生回复反应,组织出现粗化。图3d、3e为TMAZ的组织形貌,晶粒被拉长,发生弯曲变形,这与焊接热输入的大小有关。TMAZ距离焊核中心稍远,为WNZ的相邻区域,搅拌作用稍小,能量适当,TMAZ金属塑性较好,易于成形、流动。焊接过程中在搅拌针的强烈作用下,容易出现被拉长或扭曲的组织形貌。焊缝AS与RS的组织形貌有较大的不同,AS侧WNZ和TMAZ分界明显,塑化金属流动痕迹清晰可见,晶粒延流线方向被拉长,RS侧WNZ和TMAZ分界模糊,存在过渡区域。这与焊缝金属塑性流动方向不同有关,与焊接方向相比,AS侧方向一致,RS方向相反,在搅拌针的机械搅拌作用下,焊缝内部会产生临时空腔,AS侧金属沿搅拌头外表面逆时针被挤压至搅拌头后方,而RS侧的金属随着搅拌头外表面顺时针流向搅拌头的后方。因此,与母材金属的塑性流动方向相比,AS侧焊缝金属流动方向不一致,变形差大,分界线明显;而RS侧焊缝金属流动方向一致,变形差小,变形平滑,分界线比较模糊。

2.2.1 搅拌头转速对焊缝微观组织的影响

固定焊接速度 100 mm/min,搅拌头转速 400~1 400 r/min的WNZ和AS侧TMAZ组织如图4所示。

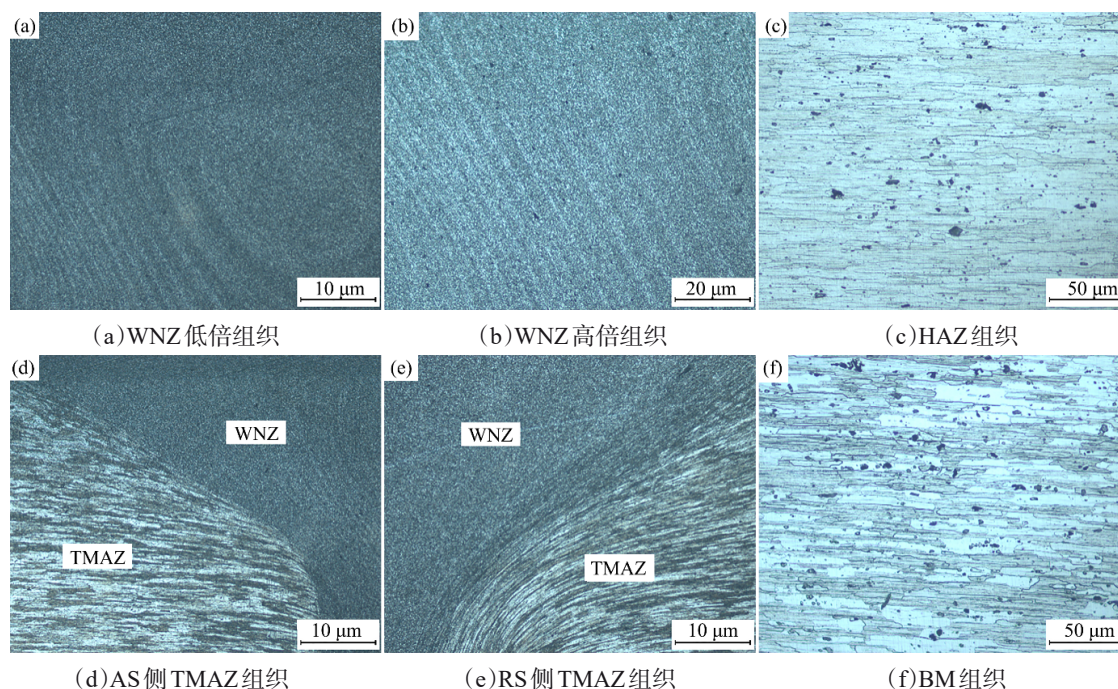


图3 焊缝各区域显微组织(800 r/min,80 mm/min)

Fig. 3 Microstructure of different zones in the welded joint (800 r/min,80 mm/min)

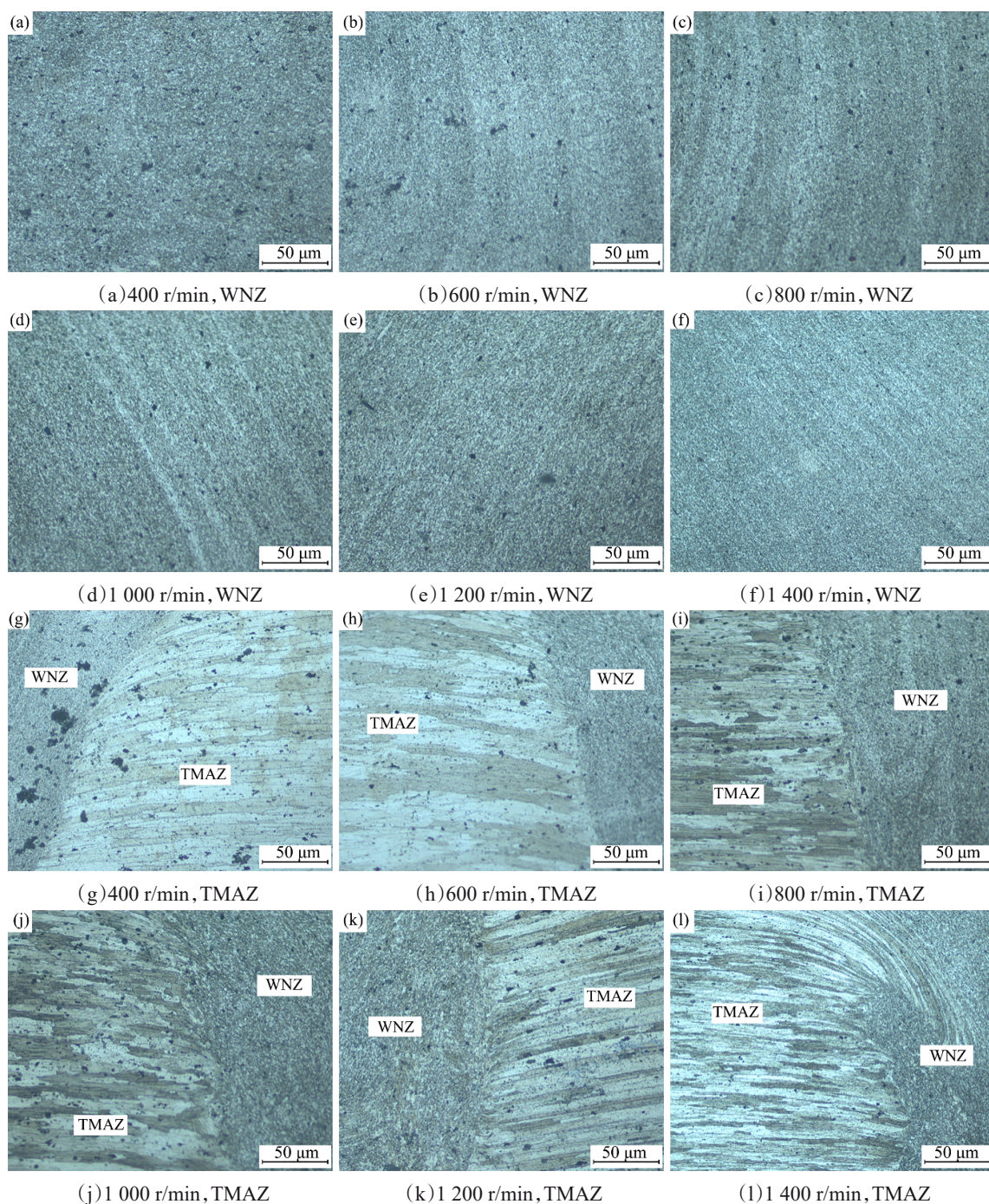


图4 不同搅拌头转速WNZ和AS侧TMAZ组织

Fig. 4 Microstructure of WNZ and TMAZ (AS side) under different tool rotational speeds

由图4a~4f可知, WNZ组织均为细小等轴晶, 强化相分布规整均匀。转速400 r/min时, “洋葱环”环形纹路不明显, 在焊缝内部出现隧道缺陷, 这与焊接热输入较低、搅拌区金属塑化不足、流动能力弱有关, 隧道缺陷见图5a; 转速600~1 400 r/min时, 可明显看到黑白相间环形纹路, 且随着搅拌头转速增

大, 环形纹路的半径随之增大, 这与塑化金属流动的线速度提升有关, 搅拌头转速越大, 洋葱环纹路半径越大, 呈现直线视域。与此同时, 随着搅拌头转速增大, WNZ晶粒尺寸呈增大趋势, 主要原因是转速升高导致焊接热输入的主导作用强于搅拌剪切引发的晶粒破碎效应, 再结晶温度升高、冷却速

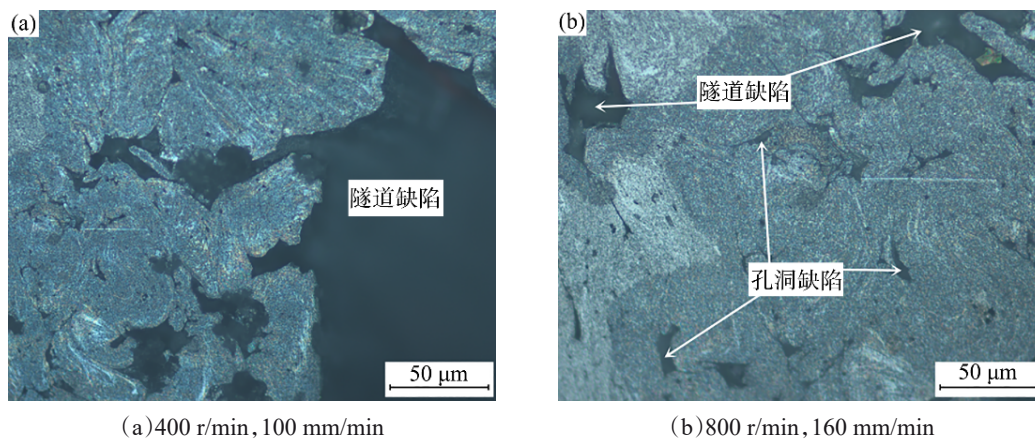


图5 隧道和孔洞缺陷微观组织

Fig. 5 Microstructure showing tunnel and cavity defects

率降低,促使晶粒长大,即WNZ晶粒尺寸与搅拌头转速呈正相关。

图4g~4l为搅拌头转速400~1400 r/min时AS侧TMAZ组织形貌,WNZ和TMAZ分界明显,塑性金属流动痕迹清晰可见,晶粒延流线方向被拉长,在热-力综合作用下发生了较大程度的弯曲变形,并在热循环作用下局部区域发生回复反应,在板条状组织内形成了回复晶粒组织。焊接过程中,TMAZ的峰值温度低于WNZ,在冷却过程中已经溶解的析出相又沿着晶界和位错再次析出,在塑性变

形作用下晶粒被拉长和弯曲,促使析出相破碎,并沿着晶粒被拉长的方向呈带状分布^[5]。随着搅拌头转速增大,TMAZ受搅拌针搅拌作用和轴肩挤压作用,塑性变形越强烈,晶粒变形越严重,晶粒尺寸逐渐增大,带状分布越明显,即随着搅拌头转速增大,TMAZ晶粒大小呈增大趋势,晶粒带状分布越明显。

2.2.2 焊接速度对焊缝微观组织的影响

固定搅拌头转速800 r/min,焊接速度80、120、160 mm/min的焊接接头WNZ和AS侧TMAZ组织如图6所示。

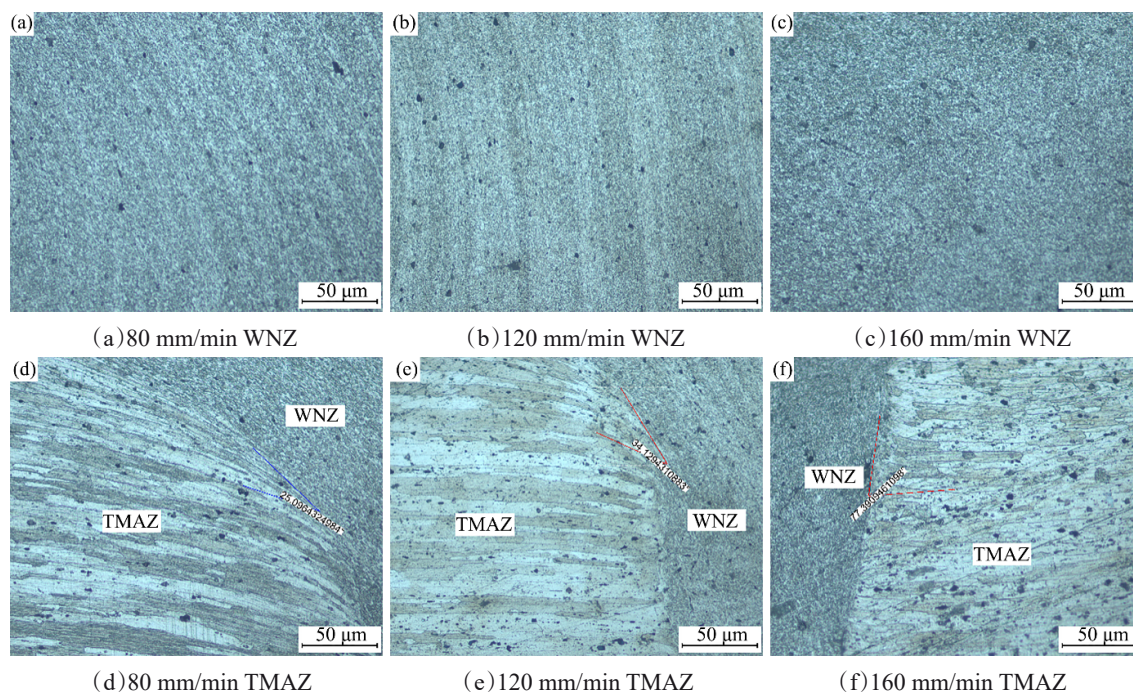


图6 不同焊接速度WNZ和AS侧TMAZ组织

Fig. 6 Microstructure of WNZ and TMAZ (AS side) under different welding speeds

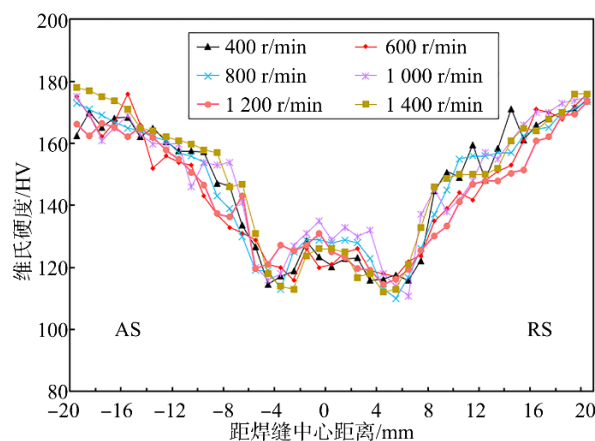
由图 6a~6c 可知,不同焊接速度下 WNZ 均呈现细小且分布规整均匀的等轴晶组织,但“洋葱环”形貌与缺陷状态不同。焊接速度较小时,单位长度焊缝热输入充足,塑化金属沿搅拌针螺纹向顶部流动充分,形成清晰的黑白相间环形纹路;当焊接速度升至 120 mm/min 时,金属流动速率加快,与搅拌针切线方向速度有关,环形纹路直径变大,逐渐从闭合环形到直线状再到无规律可循,说明过大焊接速度下,单位长度焊缝上的搅拌摩擦热不足,金属未达到塑化状态或处于塑化时间过短,流动不畅,黑白相间环形纹路不明显。焊接速度为 160 mm/min 时,单位长度焊缝热输入不足,金属塑化程度低且塑化时间短,流动受阻导致“洋葱环”纹路完全消失,同时 WNZ 内部出现明显隧道与孔洞缺陷,见图 5b,这是塑化金属填充不充分所致。对于晶粒尺寸,随着焊接速度的增大,WNZ 晶粒呈现逐渐减小趋势。这是因为搅拌头转速一定时,焊接速度增大直接导致焊接热输入降低,粗化倾向降低。

图 6d~6f 为焊接速度 80、120、160 mm/min 下焊接接头 AS 侧 TMAZ 组织形貌,在板条状组织内形成了回复晶粒组织。随着焊接速度变大,焊接热输入减小,该区域发生塑性变形程度减弱,板条状组织取向和 WNZ 分界线的夹角增大,晶粒被拉长和弯曲明显减弱,析出相和沉淀相破碎程度降低, TMAZ 受搅拌针搅拌作用、轴肩挤压作用,塑性变形越弱,晶粒变形越小,晶粒尺寸逐渐减小,即随着焊接速度增大, TMAZ 晶粒大小呈减小趋势。

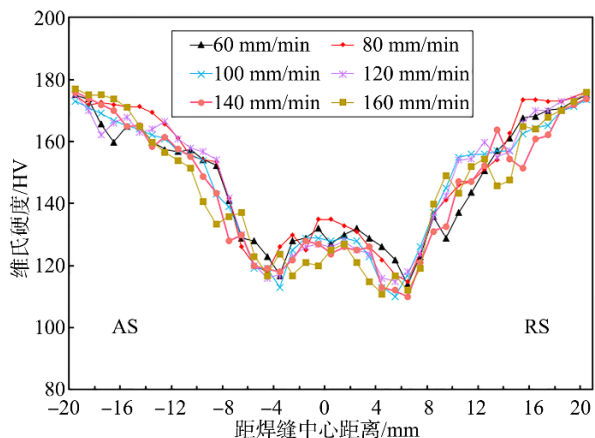
2.3 力学性能

不同焊接参数下接头的显微硬度分布如图 7 所示,整体呈现典型的倒“M”形特征,母材硬度最高(约 180 HV),焊缝区硬度普遍低于母材,且 WNZ 硬度变化最明显,硬度最小值一致出现在 RS 侧 TMAZ 与 HAZ 的过渡区域。图 7a 为焊接速度 100 mm/min 时不同搅拌头转速接头的显微硬度, WNZ 区硬度变化明显,最大硬度达 132 HV,平均硬度为 128 HV; RS 侧 TMAZ 与 HAZ 过渡处的最小硬度仅为 111 HV。主要原因是:焊接热输入引发该区域弥散分布的细小强化相发生聚集粗化,导致材料出现“过时效”现象,晶粒粗大进而使显微硬度明显降低。随着搅拌头转速增大, WNZ 平均硬度呈先增大后降低的趋势,

依次为 120.7 HV、121.2 HV、124.1 HV、128.1 HV、123.6 HV、120.4 HV。转速较低阶段(400~1 000 r/min),转速升高使焊接热输入增加,一方面促进基体中更多强化相析出,时效强化作用凸显,硬度上升;转速过高阶段(1 000~1 400 r/min),过量热输入加剧“过时效”效应,导致强化相粗化、晶粒长大,接头出现软化,硬度随之下降。



(a)不同搅拌头转速下接头显微硬度



(b)不同焊接速度下接头显微硬度

图7 不同焊接参数下接头的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution of the joints under different welding parameters

搅拌头转速 800 r/min,不同焊接速度的接头显微硬度分布如图 7b 所示。当焊接速度为 80 mm/min 时, WNZ 硬度最大值 135 HV,均值为 129.2 HV,随着焊接速度继续增大,接头热输入逐渐降低,冷却速率加快,时效强化作用减弱, WNZ 平均硬度呈现先略微上升后持续减小的变化规律,依次为 127.8 HV、129.2 HV、124.1 HV、123.5 HV、123.2 HV、120.1 HV。当焊接速度升至 160 mm/min 时,热输入不足导致

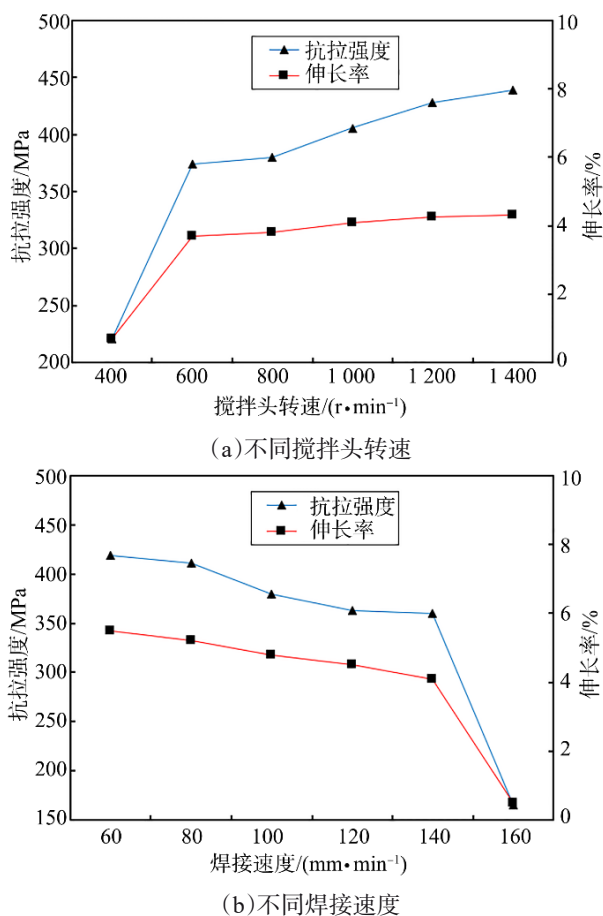


图8 不同焊接参数下接头的抗拉强度和伸长率

Fig. 8 Tensile strength and elongation of the joints under different welding parameters

WNZ出现隧道和孔洞,进一步加剧硬度下降,使接头整体硬度降至最低水平。

不同焊接参数下接头的抗拉强度和伸长率如图8所示。图8a为焊接速度100 mm/min,不同搅拌头转速的抗拉强度和伸长率,整体分布呈“镰刀”形;当搅拌头转速为400 r/min时,热输入不足导致焊缝内部产生隧道缺陷,严重劣化接头性能;随着转速增大,搅拌针的机械搅拌作用增强,焊接热输入量同步提升,塑化金属流动性显著增强,接头抗拉强度和伸长率均呈持续增大趋势。当转速达到1 000 r/min时,接头抗拉强度达405.6 MPa,为母材的72.2%,综合力学性能优良。图8b为搅拌头转速800 r/min,不同焊接速度的接头抗拉强度和伸长率分布,整体也呈“镰刀”形。随着焊接速度增大,接头抗拉强度呈减小趋势,焊接速度为80 mm/min时,接头抗拉强度达410.6 MPa,为母材的73.1%,性能

最佳;当焊接速度升至160 mm/min时,热输入不足导致金属塑化不充分、流动性减弱,焊缝出现严重隧道与孔洞缺陷,接头性能急剧下降。综上,要获得高性能的焊接接头,需“大的搅拌头转速配合小的焊接速度”, n/v 值应在10以上。

3 结论

(1)6 mm厚7075-T6铝合金搅拌摩擦焊的工艺窗口为:焊接速度100 mm/min、搅拌头转速600~1 400 r/min;搅拌头转速800 r/min、焊接速度60~120 mm/min;优质成形的最优参数组合为:搅拌头转速800 r/min、焊接速度100 mm/min。焊缝表面飞边、毛刺等缺陷的产生原因是热输入(n/v)失衡,过高热输入引发RS侧片状飞边,过低热输入导致金属流动性不足、缺陷加剧。

(2)FSW接头沿厚度方向形成母材(BM)、热影响区(HAZ)、热机械影响区(TMAZ)和焊核区(WNZ)的4个区域。BM为粗大轧制板条组织,WNZ形成细小等轴晶与“洋葱环”形貌,TMAZ呈现板条状回复晶粒(AS侧分界清晰、RS侧分界模糊),HAZ因弱热作用发生晶粒粗化。HAZ组织未发生变形,相对于母材有粗化现象。WNZ与TMAZ晶粒大小均随搅拌头转速增大而增大(热输入主导晶粒长大),随焊接速度增大而减小(热输入降低抑制粗化),且“洋葱环”的清晰度与完整性与热输入密切相关。

(3)不同焊接参数下接头硬度分布呈倒“M”形,焊缝区硬度低于母材,最小值位于RS侧TMAZ和HAZ过渡处。随着搅拌头转速增大,WNZ平均硬度分布呈先增大后降低的趋势;随着焊接速度增大,接头硬度分布呈先略微增大后减小的变化规律。抗拉强度和伸长率整体分布呈“镰刀”形,与 n 正相关、与 v 负相关,在800 r/min、80 mm/min的最优参数下,抗拉强度达410.6 MPa,为母材的73.1%。

(4)实现6 mm厚7075-T6铝合金无缺陷、高力学性能焊接的关键在于“大转速+小速度”的参数匹配,且需严格控制热输入比 $n/v \geq 10$ 。

参考文献:

- [1] 刘德强. 7075 铝合金厚板搅拌摩擦焊接头腐蚀行为

- 研究[D]. 江西:南昌航空大学,2016.
- LIU D Q. Investigation of the corrosion behavior off friction stir welded joints in 20mm thick 7075 aluminum alloy [D]. Jiangxi: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [2] 赵熠朋,周士朝,朱浩,等. 7075铝合金搅拌摩擦焊接头沉淀相析出行为[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2018(02):20-24.
- ZHAO Y P, ZHOU S C, ZHU H, et al. The phase precipitation behavior of friction stir welded 7075 aluminum alloy joint[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2018(02):20-24.
- [3] 姜月. 沉淀相对7075铝合金搅拌摩擦焊接头断裂及腐蚀行为影响研究[D]. 河北:石家庄铁道大学,2019.
- JIANG Y. Study on the Effects of Precipitates on the Fracture and Corrosion Behavior of the Friction Stir Welding Joint of 7075 Aluminum Alloy [D]. Heibei: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [4] 曾浩然,徐卫平,柯黎明,等. 7075铝合金搅拌摩擦焊接头表面在盐水环境中腐蚀坑形貌[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2019,33(03):54-59.
- ZENG H R, XU W P, KE L M, et al. Morphology of Corrosion Pits on the Surface of Friction Stir Welded Joint of AA7075 Aluminum Alloy in Salt Water Environment[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2019, 33(03):54-59.
- [5] 俞宗华. 7075高强铝合金搅拌摩擦焊工艺及接头组织和力学性能研究[D]. 广东:华南理工大学,2020.
- YU Z H. Research on Friction Stir Welding Process, Joint Microstructure, and Mechanical Properties of 7075 High-Strength Aluminum Alloy [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2020.
- [6] 李志强,陈辰. 铝合金材料搅拌摩擦焊焊接参数概述[J]. 焊接技术,2021,50(11):1-5.
- LI Z Q, CHEN C. Overview of welding parameters for FSW of aluminum alloy materials[J]. Welding Technology, 2021, 50(11):1-5.
- [7] 肖雪敏. 7075铝合金薄板搅拌摩擦焊及焊后热处理工艺研究[D]. 广东:华南理工大学,2022.
- XIAO X M. Research on Friction Stir Welding and Post-weld Heat Treatment of 7075 Aluminum Alloy Sheet [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2022.
- [8] 赵佳,谷松伟,于海东. 7075-T6铝合金搅拌摩擦焊组织及性能分析[J]. 一重技术,2021(01):36-39.
- ZHAO J, GU S W, YU H D. Analysis on Microstructure and Mechanical Properties of FSW Welds on 7075-T6 Aluminium Alloy Materials [J]. CFHI Technology, 2021(01):36-39.
- [9] 刘刚,李梅,张玺,等. 7075铝合金搅拌摩擦焊接接头的组织和力学性能[J]. 兵器材料科学与工程,2021, 44(01):22-26.
- LIU G, LI M, ZHANG X, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy welded joint by FSW [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(01):22-26.