7xxx 高强铝合金搅拌摩擦焊研究进展

王龙权[1]，周海涛[2]
(1. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司，哈尔滨 150028；2. 上海航天精密机械研究所，上海 201600)

摘要：针对 7xxx 高强铝合金的搅拌摩擦焊研究现状，主要从焊接缺陷、搅拌针形状的选择、接头软化、疲劳性能及耐蚀性等方面详述了 7xxx 高强铝合金焊接过程中存在的问题。对于 7xxx 高强铝合金的搅拌摩擦焊（FSW），焊接缺陷及焊缝成形质量差都会导致接头软化、疲劳寿命降低及耐蚀性变差等问题；优化 FSW 焊接工艺参数，减少焊接缺陷，改善焊缝成形质量，有利于降低接头软化程度、提高接头的疲劳寿命及耐蚀性；选择合适形状的搅拌针对 7xxx 高强铝合金进行 FSW，有利于改善接头的力学性能；对 FSW 接头进行表面机械滚压处理和超声冲击处理，改善接头表面的应力状态，有利于改善接头的疲劳性能；对 FSW 接头进行适当的焊后热处理，改善接头中强化相的形态、分布状态及晶粒特征，有利于改善接头的耐蚀性。

关键词：7xxx 高强铝合金；搅拌摩擦焊；接头软化；耐蚀性；疲劳性能

中图分类号：TG453　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.12073/j.hj.20230417001

Research progress in friction stir welding of 7xxx high strength aluminum alloys

Wang Longquan[1], Zhou Haitao[2]
(1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China;
2. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: According to research status of friction stir welding of 7xxx high strength aluminum alloy, the problems existed in welding process of 7xxx high strength aluminum alloy were described in detail from aspects of welding defects, selecting of tool profiles, softening of welded joints, fatigue property and corrosion resistance, stress and deformation. For friction stir welding (FSW) of 7xxx high strength aluminum alloy, welding defects and low formation quality of weld could lead to softening of welded joints, low fatigue life and poor corrosion resistance of welded joints. Optimizing FSW parameters, reducing welding defects and improving formation quality of weld were beneficial to reduce softening degree of welded joints, improve fatigue life and corrosion resistance of welded joints. Selecting tool pin profiles to FSW of 7xxx high strength aluminum alloy was beneficial to improve mechanical properties of welded joints. Surface mechanical rolling treatment and ultrasonic impact treatment on the surface of FSWed joints could improve stress state on the surface of welded joints, which was beneficial to improve fatigue property of welded joints. Appropriate post-welding heat treatment was carried out on FSWed joints to improve shape, distribution of strengthening phase and characteristics of grain, which was beneficial to improve corrosion resistance of welded joints.

Key words: 7xxx high strength aluminum alloys, friction stir welding, softening of welded joints, corrosion resistance, fatigue property

0　前言

7xxx 高强铝合金是以 Zn 为主要合金元素的可热处理强化铝合金，在合适的热处理条件下，其强度可媲美一些高强钢，故称为高强铝合金。7xxx 高强铝合金具有低密度、高比强度、高比刚度、易成形及优良的力学性能，被广泛应用于航空航天、船舶制造和轨道交通等领域[1－3]。7xxx 高强铝合金按合金元素可划分为 Al-Zn-Mg 系铝合金[4] 和 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金[5]，Zn 和 Mg 元素起主要强化作用，Cu 元素主要是为了提高铝合金的耐蚀性，但这些合金元素导致材料焊接性下降，故 7xxx 高强铝合金也称为高强

收稿日期：2023－04－17

难焊铝合金。

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)开发的一种新型固相连接技术,该技术具有接头质量高、焊接变形小及焊接过程绿色无污染等优点,是铝、镁等合金优选的焊接方法,在船舶、航空、航天等制造领域具有广阔的应用前景[6]。采用 FSW 焊接 7xxx 高强铝合金时,可避免熔化焊中常见的凝固裂纹、变形、气孔及合金元素烧损等冶金问题,但也容易导致接头出现弱结合、孔洞等焊接缺陷[7-8];而接头软化、疲劳性能及耐蚀性问题也是需要引起重视的。各专家学者对此进行了大量研究,以改善 7xxx 高强铝合金的焊接性,保证焊接接头质量,使其在各个领域得到充分的应用。

该文就静止轴肩搅拌摩擦焊(Stationary shoulder friction stir welding, SSFSW)、搅拌摩擦点焊(Friction stir spot welding, FSSW)、回填式搅拌摩擦点焊(Refilled friction stir spot welding, RFSSW)、可变转速回填式搅拌摩擦点焊(Variable rotation speed-refill friction stir spot welding, V-RFSSW)微搅拌摩擦焊、(Micro friction stir welding, μFSW)等 FSW 技术进行了介绍,主要研究了焊接缺陷、搅拌针形状的选择、接头软化特征、接头疲劳性能及接头耐蚀性等方面的内容。

1 焊接缺陷

搅拌摩擦焊接头缺陷可分为 2 类[9]:①表面缺陷,主要包括飞边、匙孔、表面下凹、毛刺、起皮、背部黏连及表面犁沟等;②内部缺陷,主要包括弱结合、未焊透、孔洞型缺陷(隧道型缺陷、孔洞及趾根缺陷)、和结合面氧化物残留等。然而,这些缺陷的存在会恶化 FSW 接头的力学性能,学者们对此展开了研究。

赵华夏等学者[10]研究了隧道缺陷及未焊透缺陷对 7050 铝合金 FSW 接头性能的影响,发现:根部未焊透缺陷比隧道缺陷对 FSW 接头性能的影响更大;下压量对这 2 种缺陷有重要影响,而搅拌针长度对未焊透缺陷有重要影响。因此,控制搅拌针长度和下压量,有利于改善 FSW 接头的力学性能。Xu 等学者[11]采用双面搅拌摩擦焊(Double-sided friction stir welding, DS-FSW)对 7085-T7452 铝合金进行了焊接,焊缝中出现了隧道型缺陷和 S 线,如图 1[11]所示,导致接头的强度系数下降。余思越等学者[12]研究了焊接速度对 2A12/7075 异种铝合金 FSW 接头成形和力学性能的影响,发现:随着焊接速度的增大,焊缝表面毛刺减少,隧道型缺陷的倾向增大,FSW 接头的韧性下降。侯艳喜等学者[13]研究了搅拌针偏移位置对 A7N01P-T4 铝合金 FSW 接头性能的影响,发现:FSW 接头中存在钩状(hook)缺陷、S 线和冷搭接缺陷,如图 2[13]所示,而搅拌针偏移位置会影响相关缺陷的产生,进而影响 FSW 接头的性能。Zhao 等学者[14]研究了 7N01 铝合金 FSW 过程中转速、塑化区域和缺陷形成之间的关系,分析了 FSW 过程中隧道型及空腔型孔洞缺陷的形成机理,发现:在较低转速下,隧道型缺陷的形成与塑化区尺寸变化较大且超过板厚有关;在较高转速下,围绕搅拌针的旋转和纵向流动不平衡导致了空腔型缺陷。Chen 等学者[15]研究了 AA7150-AA2524 异质铝合金 FSW 搭接接头的细节疲劳额定值,发现:疲劳裂纹起源于 AA2524 侧焊缝中心下表面附近区域,此处存在弱结合缺陷;接头中存在大量钩状缺陷,为裂纹扩展提供了有利的方向,并引起应力集中,是接头断裂的主要原因;钩状缺陷和弱结合缺陷对 FSW 搭接接头的疲劳性能有明显影响,严重降低了疲劳强度。Ni 等学者[16]研究了无搅拌针和有搅拌针对 AA7075-T6 铝合金 μFSW 接头性能的影响,发现:无搅拌针的接头软化程度更小,而搅拌针的接头存在根部弱结合缺陷,对拉伸性能不利。卢振洋等学者[17]采用 RFSSW 对 7475 铝合金进行了焊接,发现:搅拌区/焊核区(Stir zone, SZ or welding nugget zone, WNZ)内存在对称分布且呈现链状的孔洞,如图 3~图 5[17]所示;搅拌套下压深度和焊具转速与链状孔洞密集程度呈正相关关系,而搅拌套运动速率与链状孔洞密集程度呈负相关关系。由此可见,优化焊接工艺参数,减少接头的中焊接缺陷,改善焊缝成形质量,有利于改善接头的力学性能及疲劳性能。

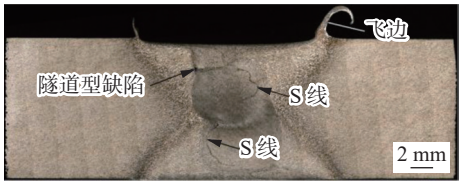


图 1 隧道型缺陷和 S 线[11]

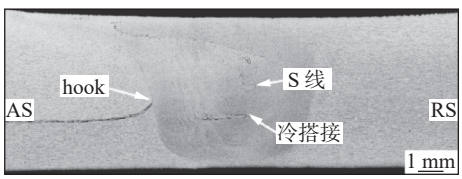
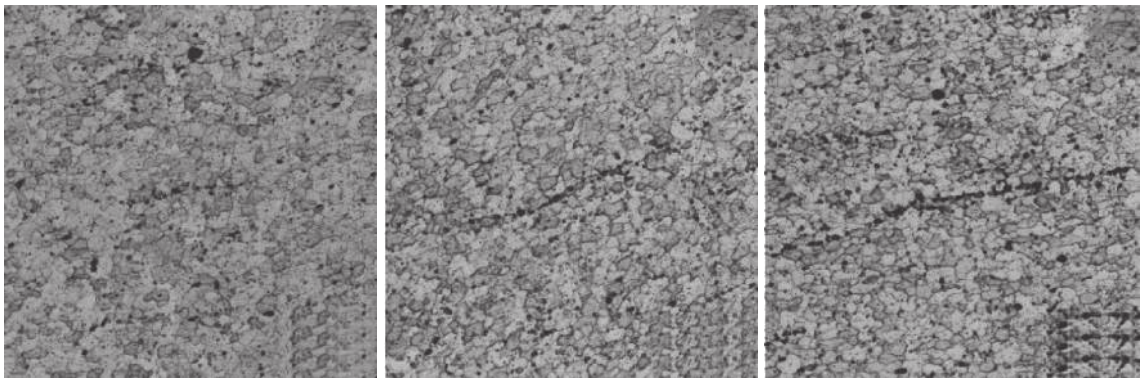
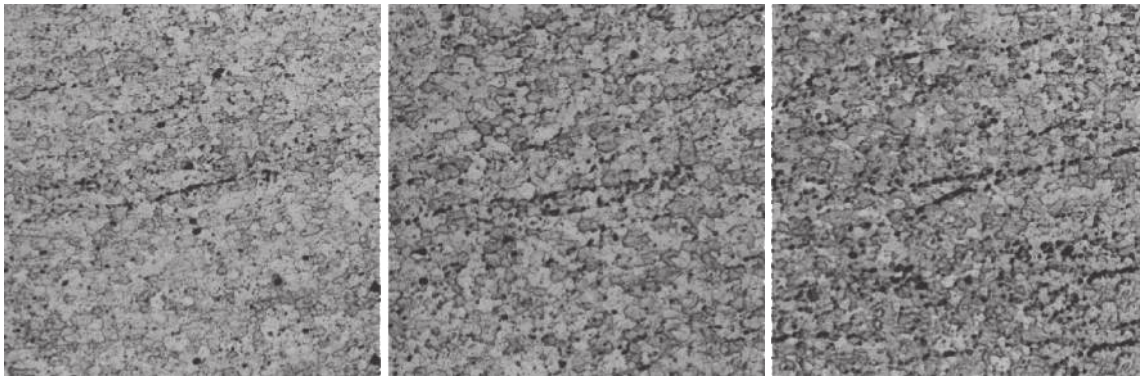


图 2 钩状(hook)缺陷、S 线和冷搭接缺陷[13]



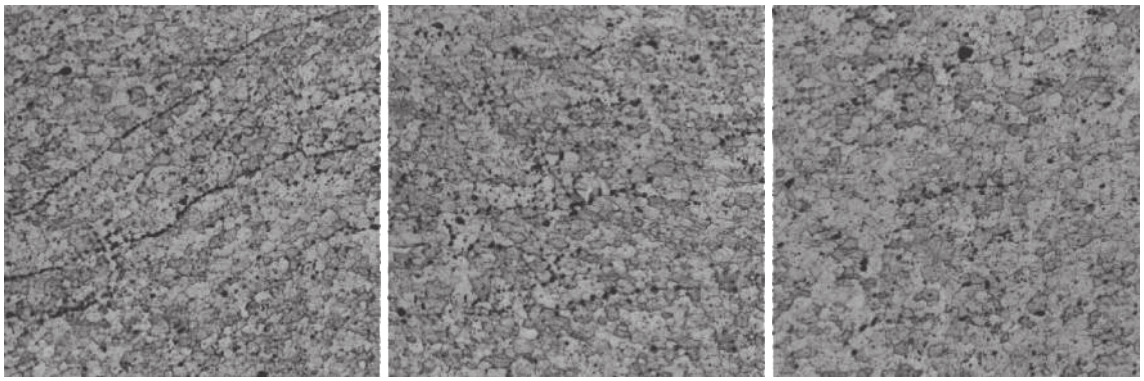
(a) 2.0 mm (b) 2.5 mm (c) 3.0 mm

图 3 不同搅拌套下压深度时的链状孔洞[17]



(a) 1 500 r/min (b) 2 000 r/min (c) 2 500 r/min

图 4 不同焊具转速下的链状孔洞[17]

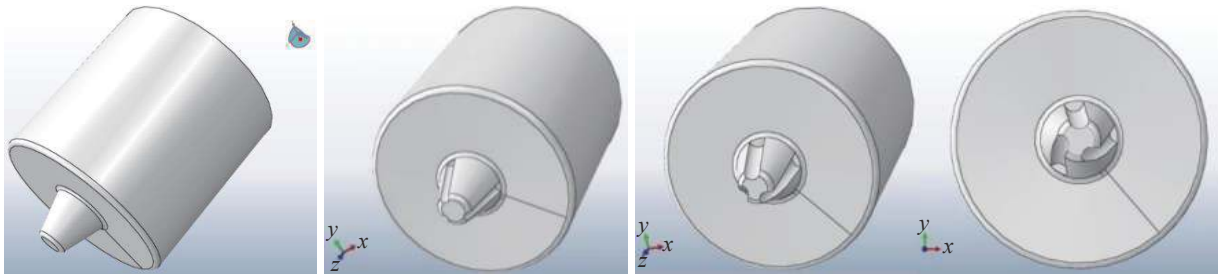


(a) 0.50 mm/s (b) 0.75 mm/s (c) 1.00 mm/s

图 5 不同搅拌套运动速率下的链状孔洞[17]

2 搅拌针形状的选择

有学者针对搅拌针形状进行了优化，以改善接头的力学性能。Swaminathan 等学者[18]采用 2 种不同形状搅拌针（圆柱形和圆锥形）的 FSW 制备 AA7075 和 AA6101 异种铝合金焊缝，研究搅拌头转速、移动速度和轴向力等工艺参数对其力学性能和冶金性能的影响，发现：在搅拌头转速为 1 200 r/min、移动速度为 45 mm/min、轴向力为 6 kN 时，接头具有较好的力学性能；采用圆柱形搅拌针制备的接头具有较好的力学性能和冶金性能。Safari 等学者[19]对 AA6061-T6 和 AA7075-T6 异种铝合金搅拌摩擦焊接过程进行了有限元模拟研究，并研究了较硬材料（AA7075-T6）位置和搅拌针形状（图 6[19]）对焊缝金属和热影响区



(a) 光滑搅拌针　(b) 直沟槽搅拌针　(c) 螺旋沟槽搅拌针

图 6　圆锥形搅拌针形状[19]

(HAZ)的温度分布和材料流动的影响，发现：采用直沟槽搅拌针可以提高搅拌针周围的材料速度；对于所有类型的搅拌针，与材料放置在后退侧时的估计温度相比，将较硬的材料放置在前进侧时，会导致工艺温度略低；AA7075-T6 铝合金在前进侧时，在搅拌头轴肩下方的薄层中发生了混合，较硬材料对后退侧的渗透受到限制。Catkin 等学者[20]采用圆锥形和三角形搅拌针对 AA7075 铝合金进行了 FSW，发现：圆锥形搅拌针的显微组织优于三角形搅拌针，且圆锥形搅拌针的接头力学性能非常好。由此可见，搅拌针的形状对 FSW 接头的组织和性能有很大影响，选择合适形状的搅拌针，有利于改善 FSW 接头的力学性能。

3　接头软化特征

与熔化焊接头相比，7xxx 铝合金 FSW 接头也存在软化的问题，详见表 1[21－39]。但相比于熔化焊，FSW 更容易获得软化倾向小的接头。由表可知，接头形式主要是对接接头和搭接接头；而搭接接头主要检测接头的拉剪失效载荷，例如，赵运强等学者[21]采用采用 V-RFSSW 对 7B04-T74 铝合金进行了焊接，与常规 RFSSW 接头进行了比较，结果表明：V-RFSSW 接头

表1　7xxx 铝合金 FSW 接头软化问题

焊接工艺	铝合金母材	接头形式	热处理	接头强度系数 η(%)	文献
RFSSW, V-RFSSW	7B04-T74	搭接	—	—	[21]
FSW	AA7475-T7	搭接	—	—	[22]
FSW	7 020	对接	焊前双级时效	86.9	[23]
SSFSW	7 050-T7451	对接	—	91.0	[24]
FSW	AA7B04-T6	对接	—	80.0	[25]
FSW	7 085-T7452	对接	—	66.5	[26]
FSW	AA7075-T6	对接	焊后自然时效	74.5	[27]
FSW	7N01	对接	—	87.0	[28]
FSW	7 050-T7451	对接	—	77.1	[29]
FSW	7A52	对接	—	77.2	[30]
FSW	7B04-T74	对接	—	76.5	[31]
FSW	7 020-T6	对接	—	73.8	[32]
FSW	7 075-O	对接	—	106.5	[33]
FSW	AA5454, AA7075	对接	—	85.3(AA5454)	[34]
FSW	6 061-T6, 7 075-T6	对接	—	89. 5(6 061-T6)	[35]
FSW	6 061-T6, 7 075-T6	对接	—	67.9(6 061-T6)	[36]
FSW	AA6061-T6, AA7075-T6	对接	—	53.4(AA6061-T6)	[37]
FSW	AA6061-T6, AA7075-T6	对接	—	90.0(AA6061-T6)	[38]
FSW	AA5082, AA7075	对接	—	52.0(AA5082)	[39]

拉剪失效载荷为 8.835 kN，高于 RFSSW 接头的 8.162 kN。对于 7xxx 同质铝合金的 FSW，接头强度系数出现极低值 66.5%，主要原因是焊核区（WNZ）顶部区域存在显著的应变集中现象，产生了不均匀变形，导致接头异常断裂[26]；接头强度系数出现了极高值 106.5%，主要是因为母材 7075-O 是退火状态，强度最低，在 FSW 下，搅拌针偏心 0.2 mm 时，改善了材料的塑性流动，导致晶粒细化及沉淀相的再析出，提高了动态再结晶程度和大角度晶界数量，最终促进了应变硬化[33]，提高了接头的强度。同时，张华等学者[24]采用 SSFSW 对 7050-T7451 进行了焊接，与常规 FSW 相比，SSFSW 接头成形美观，表面光滑，焊缝无减薄现象；焊缝组织也有明显的不同；接头强度系数可达 91.0%。对于 7xxx 异质铝合金（7xxx 铝合金与其他系铝合金）的 FSW，接头强度系数极低值 52.0%，极高值 90.0%。无论是 7xxx 同质铝合金还是异质铝合金的 FSW，均可以获得较高的接头强度系数，即减少接头的软化倾向，综合表 1 的文献可知，优化焊接工艺及焊接工艺参数，获得优质无缺陷的焊接接头，优化焊缝组织，有利于改善接头软化问题。

4 接头疲劳性能

邓彩艳等学者[40]对 7050-T7451 铝合金 FSW 接头的疲劳性能进行了研究，发现：试件的断裂位置多为接头的 TMAZ 和 HAZ，且断裂位置与接头组织不均匀密切相关。Sun 等学者[41]对 2024-T4 和 7075-T6 铝合金 FSW 接头的短疲劳裂纹进行了研究，发现：短疲劳裂纹容易在焊核区的次表面缺陷处萌生，并以准解理断裂方式扩展。Kubit 等学者[42]对 7075-T6 铝合金 RFSSW 接头的疲劳性能进行了研究，发现：氧化铝的存在加剧了焊核周边材料的不均匀性，是裂纹形核的来源。Rodriguez 等学者[43]研究了腐蚀缺陷对 AA6061-AA7050 铝合金 FSW 接头低周疲劳性能的影响，发现：在热力影响区和热影响区存在局部腐蚀损伤，裂纹在腐蚀缺陷处萌生，使接头疲劳寿命降低。马青娜等学者[44]研究了 7075-T6 铝合金 FSW 接头的疲劳性能，发现：腐蚀疲劳断口存在多个裂纹源，如图 7[44]所示，裂纹源萌生于腐蚀坑处。由此可见，焊核区次表面缺陷、焊核区氧化膜、接头的腐蚀缺陷及腐蚀坑都会引起局部的应力集中，促进疲劳裂纹的萌生和扩展，进而降低接头的疲劳寿命。

针对 7xxx 铝合金 FSW 接头的疲劳性能，有学者

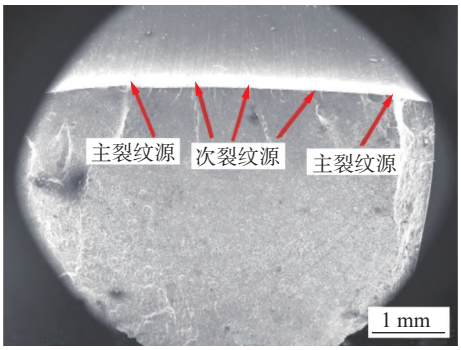


图 7 腐蚀疲劳断口宏观形貌图[44]

通过改善接头组织的均匀性，也有学者通过后处理技术改善接头表面应力状态，以改善接头的疲劳性能。Jia 等学者[45]研究了 7 085 铝合金中微量 Sc 对 FSW 接头疲劳性能的影响，发现：微量 Sc 导致晶粒细化，改善了 WNZ 强化相的再析出形态及分布状态，进而改善了接头的疲劳性能。Dong 等学者[46]对 7075-T651 铝合金 FSW 接头进行了表面机械滚压处理（Surface mechanical rolling treatment, SMRT），致使接头上产生了近似抛光的梯度纳米结构表面和高残余压应力，进而改善了接头的疲劳性能。而李辉等学者[47]认为，超声冲击处理（Ultrasonic impact treatment, UIT）改善高强铝合金 FSW 接头表面的应力集中状态，产生残余压应力，进而改善了接头的疲劳性能。

综上所述，优化焊接工艺参数，获得优质无缺陷的焊接接头，改善接头组织的均匀性，通过后处理改善接头表面的应力状态，有利于改善接头的疲劳性能。

5 接头耐蚀性

7xxx 铝合金 FSW 接头的腐蚀问题主要从应力腐蚀开裂、晶间腐蚀及点蚀 3 个方面进行了介绍。

周青华等学者[48]分别研究了 7 005 铝合金冷金属过渡焊（Cold metal transition welding, CMT）接头、TIG 接头及 FSW 接头的应力腐蚀性能，发现：3 种工艺下，都能获得无缺陷的接头；与其他 2 种接头相比，FSW 接头的晶粒更均匀细小，应力腐蚀敏感性更低。张华等学者[49]研究了 7050-T7451 铝合金 FSW 接头的应力腐蚀敏感性，发现：单纯通过焊接过程本身的控制很难改善 7050-T7451 铝合金的应力腐蚀敏感性。而 Zhang 等学者[50]对 7050-T7451 铝合金 FSW 接头进行了双级时效处理，WNZ 沉淀相分布均匀，HAZ 和 TMAZ 晶界变得不连续，阻断了腐蚀通道，因此降低了接头的应力腐蚀敏感性。

Cabrini 等学者[51]研究了 AA 7075-T6 合金 FSW 接头的晶间腐蚀行为，发现：HAZ 优先发生腐蚀，腐蚀在轧制方向上沿着晶界进行扩展。方振邦等学者[52]研究了 7N01s-T5 铝合金 FSW 接头的晶间腐蚀行为，发现：HAZ 腐蚀最严重，归因于晶界连续分布的沉淀相和不均匀的晶粒尺寸；而 TMAZ 晶界沉淀相部分熔解，阻断了部分腐蚀通道，降低了晶间腐蚀倾向；搅拌区（焊核区）形成了细小的等轴晶，晶界强化相完全熔解，阻断了腐蚀通道，晶间腐蚀倾向性最低。

Prabhuraj 等学者[53]研究了 AA7075-T651 铝合金 FSW 接头的点蚀行为，发现 WNZ 晶界强化相会引发 AA7075-T651 铝合金的微电池腐蚀过程。Liu 等学者[54]研究了 7075-T6 铝合金 FSW 接头 HAZ 和 TMAZ 的点蚀性能，发现：HAZ 和 TMAZ 的腐蚀机理完全不一致，这与强化相和晶粒特征的差异有关。

综上所述，针对 7xxx 铝合金 FSW 接头的腐蚀问题，优化焊接工艺参数，必要时进行适当的焊后热处理，改善接头中强化相形态、分布状态及晶粒特征，有利于改善接头的耐蚀性。

6 结束语

（1）对于 7xxx 铝合金的 FSW，焊接缺陷及焊缝成形质量都会导致接头软化、疲劳寿命降低及耐蚀性变差等问题。因此，优化焊接工艺参数，减少焊接缺陷，改善焊缝成形质量，有利于改善接头的软化、疲劳寿命降低及耐蚀性变差等问题。

（2）选择合适形状的搅拌针，有利于改善 7xxx 铝合金 FSW 接头的力学性能。

（3）对 7xxx 铝合金 FSW 接头进行表面机械滚压处理和超声冲击处理，改善接头表面的应力状态，有利于改善接头的疲劳性能。

（4）对 7xxx 铝合金 FSW 接头进行适当的焊后热处理，改善接头中强化相形态、分布状态及晶粒特征，有利于改善接头的耐蚀性。

参考文献

[1] Zhang Xiang, Xie Dejie, Chen Bo. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy welded joint [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 772: 012112.

[2] Li Huiyan, Jia Lina, Huang Jiangnan, et al. Precipitation behavior and properties of extruded 7136 aluminum alloy under different aging treatments [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 612 − 619.

[3] Wang Z J, Cao Y, Gorbachev S, et al. Research on conventional and high-speed machining cutting force of 7075-T6 aluminum alloy based on finite element modeling and simulation [J]. Metals, 2022, 12(8): 1395.

[4] 肖宝靓, 曲凤娇, 曹阳, 等. 不同时效处理对 7020 铝合金组织和腐蚀性能的影响 [J]. 有色金属加工, 2019, 48(6): 53 − 56, 68.

[5] 沈会, 王江涛, 陈佳伟, 等. T6 热处理对 7075 铝合金 FSW 接头蠕变性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2023, 44(2): 189 − 198.

[6] 林三宝, 范成磊, 杨春利. 高效焊接方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[7] 白海青, 曹志峰, 王红莲, 等. 7050-T7451 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和性能与疲劳断裂 [J]. 焊接, 2022(8): 33 − 38.

[8] 强菲, 王文, 张婷, 等. Al-Zn-Mg-Cu 铝合金厚板搅拌摩擦焊接头搅拌区微观组织 [J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 135 − 141.

[9] 路浩, 张铁浩, 邢立伟, 等. 搅拌摩擦焊缺陷相控阵探测技术研究 [J]. 焊接, 2014(4): 39 − 42.

[10] 赵华夏, 董继红, 孟强. 7050 高强铝合金搅拌摩擦焊典型宏观缺陷试验研究 [J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 141 − 148.

[11] Xu Weifeng, Wang Huan, Luo Yuxuan, et al. Mechanical behavior of 7085-T7452 aluminum alloy thick plate joint produced by double-sided friction stir welding: effect of welding parameters and strain rates [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 261 − 270.

[12] 余思越, 张德芬, 韩金理, 等. 2A12/7075 异种铝合金搅拌摩擦焊接头成形及力学性能 [J]. 有色金属工程, 2019, 9(5): 17 − 22.

[13] 侯艳喜, 徐荣正, 李慧, 等. A7N01P-T4 铝合金对-搭接结构的搅拌摩擦焊技术研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 95 − 100.

[14] Zhao Yingxin, Han Jianmin, Domblesky J P, et al. Investigation of void formation in friction stir welding of 7N01 aluminum alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 139 − 149.

[15] Chen A, Zang W F, Dong D K, et al. Fatigue behavior of friction stir welded lap joints for dissimilar AA7150-AA2524 aluminum alloy [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 751: 012086.

[16] Ni Y, Fu L, Shen Z, et al. Role of tool design on thermal cycling and mechanical properties of a high-speed micro friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 48: 145 − 153.

[17] 卢振洋, 龚文韬, 陈树君, 等. 7475 铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头链状孔洞研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2020, 53(1): 105 − 110.

[18] Swaminathan G, Sathiyamurthy S. Experimental study of mechanical and metallurgical properties of friction stir welded dissimilar aluminum alloys [J]. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), 2018, 8(1): 1049 − 1058.

[19] Safari M, Joudaki J. Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) modeling of material flow in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys [J]. Iranian Journal of Materials Forming, 2019, 6(2): 10 − 19.

[20] Catkin E, Çelik Y H, Kilickap E. Effect of temperature, force, and vibration on fatigue strength of friction stir-welded AA7075 aluminum alloy joints [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30: 202 − 211.

[21] 赵运强, 赵宇佳, 刘喆, 等. 高强铝合金可变转速回填式搅拌摩擦点焊温度场及接头组织性能调控 [J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 50 − 55.

[22] Anand R, Sridhar V G. Microstructure and mechanical properties of interlock friction stir weld lap joint AA7475-T7 using fractional factorial design [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(1): 1 − 12.

[23] 陈向荣, 郑子樵. 7020 铝合金搅拌摩擦焊接接头微观组织和力学性能 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(2): 172 − 179.

[24] 张华, 赵常宇, 林三宝, 等. 7050-T7451 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能研究 [J]. 焊接, 2018(9): 5 − 9.

[25] 张坤, 江海涛, 孟强, 等. 焊接速度对机器人搅拌摩擦焊 AA7B04 铝合金接头组织和力学性能的影响 [J]. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1525 − 1532.

[26] Xu W F, Wu X K, Ma J, et al. Abnormal fracture of 7085 high strength aluminum alloy thick plate joint via friction stir welding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(6): 6029 − 6040.

[27] Ku M H, Hung F Y, Lui T S. The effect of hyper-rotation on the Weibull distribution of tensile properties in a friction stirred AA7075 aluminum alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 226: 290 − 295.

[28] Zhao Yingxin, Yang Zhiyong, Domblesky J P, et al. Investigation of through thickness microstructure and mechanical properties in friction stir welded 7N01 aluminum alloy plate [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 760: 316 − 327.

[29] Liu Yong, Deng Caiyan, Gong Baoming, et al. Effects of heterogeneity and coarse secondary phases on mechanical properties of 7050-T7451 aluminum alloy friction stir welding joint [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 764: 138223.

[30] 范文学, 陈芙蓉. 基于响应面法 7A52 高强铝合金 FSW 接头抗拉强度预测及优化 [J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 55 − 60.

[31] 薛伟, 汪凤琴, 苏艳, 等. 7B04 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(4): 1 − 7.

[32] 王涔婭, 张立杰. 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能分析 [J]. 精密成形工程, 2023, 15(1): 94 − 100.

[33] Mao Y Q, Yang P, Ke L M, et al. Microstructure evolution and recrystallization behavior of friction stir welded thick Al-Mg-Zn-Cu alloys: influence of pin centerline deviation [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(5): 745 − 756.

[34] Abd Elnabi M M, Elshalakany A B, Abdel-Mottaleb M M, et al. Influence of friction stir welding parameters on metallurgical and mechanical properties of dissimilar AA5454-AA7075 aluminum alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 1684 − 1693.

[35] 刘晓超, 王江华. 搅拌头转速对 6061 和 7075 异种铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响 [J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(5): 90 − 95.

[36] 高士康, 周利, 张欣盟, 等. 6061-T6/7075-T6 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 35 − 42.

[37] Seshu Kumar G S V, Kumar A, Rajesh S, et al. Optimization of FSW process parameters for welding dissimilar 6061 and 7075 Al alloys using Taguchi design approach [J]. International Journal of Nonlinear Analysis and Applications, 2022, 13(1): 1011 − 1022.

[38] Ghiasvand A, Noori S M, Suksatan W, et al. Effect of tool positioning factors on the strength of dissimilar friction stir welded joints of AA7075-T6 and AA6061-T6 [J]. Materials (Basel), 2022, 15(7): 2463.

[39] Kumar R, Kumar G, Roy A, et al. A comparative analysis of friction stir and tungsten inert gas dissimilar AA5082-AA7075 butt welds [J]. Materials Science for Energy Technologies, 2022, 5: 74 − 80.

[40] 邓彩艳, 高仁, 龚宝明, 等. 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头超高周疲劳性能 [J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 114 − 118.

[41] Sun G Q, Xu G S, Shang D G, et al. Welding parameter selection and short fatigue crack growth of dissimilar aluminum alloy friction stir welded joint [J]. Welding in the World, 2019, 63(6): 1761 − 1769.

[42] Kubit A, Drabczyk M, Trzepiecinski T, et al. Fatigue life assessment of refill friction stir spot welded Alclad 7075-T6 aluminium alloy joints [J]. Metals, 2020, 10(5): 633.

[43] Rodriguez R I, Jordon J B, Allison P G, et al. Corrosion effects on fatigue behavior of dissimilar friction stir welding of high-strength aluminum alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 742: 255 − 268.

[44] 马青娜, 白林越, 邵飞, 等. 7075-T6 铝合金搅拌摩擦焊接

头腐蚀疲劳断口［J］. 陆军工程大学学报, 2022, 1(5): 38－44.
［45］ Jia Zixing, Wei Lili, Huang Hongfeng, et al. Microstructural and fatigue crack growth behavior inhomogeneity of trace Sc added 7085 alloy friction stir welded joint［J］. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(5): 1257－1270.
［46］ Dong Peng, Liu Zepeng, Zhai Xin, et al. Incredible improvement in fatigue resistance of friction stir welded 7075-T651 aluminum alloy via surface mechanical rolling treatment［J］. International Journal of Fatigue, 2019, 124: 15－25.
［47］ 李辉, 付磊, 林莉, 等. 超声冲击对高强铝合金搅拌摩擦焊接接头疲劳机制影响的研究进展［J］. 轻合金加工技术, 2020, 48(1): 7－14, 31.
［48］ 周青华, 刘州, 杜涛, 等. 7005 铝合金 CMT、TIG 和 FSW 焊接接头组织与性能对比研究［J］. 材料科学, 2021, 11(4): 317－325.
［49］ 张华, 崔冰, 林三宝, 等. 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头腐蚀行为分析［J］. 焊接学报, 2018, 39(7): 71－74.
［50］ Zhang Hua, Guo Qilong, Zhao Changyu, et al. Influence of two-step aging on structure and stress corrosion sensitivity of friction stir welded 7050-T7451 aluminum alloys［J］. China Welding, 2020, 29(4): 1－6.
［51］ Cabrini M, Bocchi S, D'Urso G, et al. Effect of load on the corrosion behavior of friction stir welded AA 7075-T6 aluminum alloy［J］. Materials, 2020, 13(11): 2600.
［52］ 方振邦, 张志强, 李颖, 等. 7N01S-T5 铝合金厚板搅拌摩擦焊接头的晶间腐蚀行为［J］. 材料导报, 2019, 33(1): 304－308.
［53］ Prabhuraj P, Rajakumar S. Experimental investigation on corrosion behavior of friction stir welded AA7075-T651 aluminium alloy under 3.5% wt NaCl environment［J］. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(7): 5878－5885.
［54］ Liu Jinqiu, Guo Fuqiang, Wang Tao, et al. Study on corrosion resistance of HAZ and TMAZ in friction stir welding joint of 7075 aluminum alloy by thermal simulation［J］. Materials Research Express, 2023, 10: 016505.

第一作者： 王龙权，硕士，工程师；主要从事金属材料焊接性及焊接结构断裂行为的研究；已发表论文 10 余篇；wlq_love00@126.com。
通信作者： 周海涛，博士，高级工程师；主要从事镁合金及钛合金的研发及推广研究；已发表论文 20 余篇；htzzz0313@163.com。

（编辑：曲畅）

本文引用格式：
王龙权, 周海涛. 7xxx 高强铝合金搅拌摩擦焊研究进展[J]. 焊接, 2023(10): 47－54.
Wang Longquan, Zhou Haitao. Research progress in friction stir welding of 7xxx high strength aluminum alloys[J]. Welding & Joining, 2023(10): 47－54.

(上接第 37 页)

［10］ Liu Yong, Wang Ping, Fang Hongyuan, et al. Mitigation of residual stress and deformation induced by TIG welding in thin-walled pipes through external constraint[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4636－4651.
［11］ Ranjbar Nodeh I, Serajzadeh S, Kokabi A H. Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3): 60－69.
［12］ 马正伟. 铬锰奥氏体不锈钢焊接开裂原因分析[J]. 中国重型装备, 2014(3): 40－42.
［13］ 牛亚涛, 周友龙, 陈勇, 等. 压力管道焊接接头裂纹原因分析[J]. 焊接技术, 2021, 50(10): 90－93.

第一作者： 王铝，硕士研究生；主要从事金属材料焊接的研究；1406112836@qq.com。
通信作者： 李红军，博士，教授；主要从事搅拌摩擦加工、焊接和结构完整性评定等方面的研究；已发表论文 30 余篇；lihongjun@zstu.edu.cn。

（编辑：王龙权）

本文引用格式：
王铝, 李红军, 廖晓平. 弓形半管夹套焊接工艺仿真[J]. 焊接, 2023(10): 31－37, 54.
Wang Lü, Li Hongjun, Liao Xiaoping. Simulation on welding process of bow half pipe jacket[J]. Welding & Joining, 2023(10): 31－37, 54.