

DOI: 10.3969/j.issn.1671-6795.2024.04.001

铝合金搅拌摩擦焊技术研究进展

郭克星¹, 高杰²

(1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008; 2. 陕西省特种设备检验检测研究院, 陕西 西安 710000)

摘要: 文章综述了铝合金搅拌摩擦焊技术最新的研究进展, 从焊接模拟研究、焊接参数对焊缝组织及性能的影响和铝合金搅拌摩擦焊性能研究三个角度, 梳理了近年来国内外最新的研究成果; 最后指出异种铝合金的搅拌摩擦焊是下一步研究的重点和方向。

关键词: 铝合金; 搅拌摩擦焊; 焊接数值模拟; 焊接参数; 力学性能; 疲劳性能; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG457.14

文献标识码: A

文章编号: 1671-6795(2024)04-0001-08

随着人们对轻量化和高性能的重视, 铝合金凭借质量轻、比强度高、耐腐蚀等优点, 已被广泛应用于航空航天、造船、军事和交通运输等领域^[1-3]。搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)作为一种固态焊接技术, 是近年来工业界最常用的焊接技术, 用于焊接铝、镁、铜和钢等合金。FSW 由英国焊接研究所的 Wayne Thomas 于 1990 年在美国国家航空航天局的资助下研制而成。搅拌摩擦焊的特点是在低于母材熔点的温度下形成焊接接头, 因此在改善焊接性方面比熔焊工艺具有一定的优势^[4-6]。搅拌摩擦焊过程可以分为三个阶段, 首先, 将搅拌针伸入待焊的两片板形成的接头中, 直至轴肩接触。由于搅拌针以高速旋转, 板材在塑性变形和摩擦的作用下被加热。其次, 搅拌针保持旋转, 没有任何平移运动, 因此由于摩擦导致的材料发热增加。最后, 搅拌针沿融合线移动, 进一步加热材料, 使其从搅拌针前方移动, 并在其后缘沉积, 从而产生焊缝^[7,8]。

搅拌摩擦焊的主要参数有搅拌针形貌、焊接速度等, 这些参数都是相互影响的。在进行正式焊接之前, 人们通常进行焊接数值模拟来获得最佳的工艺参数, 最常见的有机器学习、人工神经网络等。岳玉梅等^[9]采用尖部半螺纹搅拌针进行 6151 铝合金搅拌摩擦搭接焊试验, 并基于径向基神经网络与蚁群算法相结合的方法优化工艺参数, 达到改善搭接界面结构特征, 进而实现接头承载能力最大化的目的。研究结果

表明, 当转速、焊速和下压量分别为 1504 r/min、207 mm/min 和 0.12 mm 时, 接头的拉剪载荷最大达 5.06 kN/mm, 比优化前的最大拉剪载荷提高了 6.08%。径向基神经网络与蚁群优化算法相结合的智能方法为优化焊接工艺参数, 进一步提高铝合金搅拌摩擦搭接接头强度提供了一种有效途径。

1 焊接模拟研究

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种新型焊接技术, 由于其与传统的熔化焊相比具有焊接缺陷少、无须填充材料及保护气体、焊接前无须复杂的处理工作、能量消耗少等特点而得到广泛应用。但其焊接参数往往由操作者凭经验给出, 带有一定的盲目性。兰州理工大学的王希靖^[10]教授先针对 FSW 工艺进行了一般性研究, 找到其规律性, 并建立了其焊接参数数据库。数据库系统采用大型 SQL Server 2000 数据库为平台, 建立了材料库、工艺库、刀具库和产品库等, 具有查询、维护和浏览等功能。该数据库的建立为我国从事 FSW 工艺的研究人员和工程技术人员提供了技术参考, 对 FSW 工艺的推广应用和工艺管理系统的研究奠定了基础。

Essa 等^[11]采用三种不同搅拌针偏心距和六种不同焊接速度研究搅拌针偏心距对 AA5754-H24 铝合金搅拌摩擦焊(FSW)的影响。为了模拟和预测偏心距和焊接速度对 AA5754-H24 搅拌摩擦焊接头力学

收稿日期: 2023-08-02

基金项目: 中国管线研究组织项目(项目编号: CPRO2018N03); 国家重点研发计划(项目编号: 2018YFC0310300)

作者简介: 郭克星(1994-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油天然气管材研究工作。

性能的影响,建立了人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)模型,如图 1 所示。模型的输入参数为焊接速度和搅拌针偏心距。所开发的 ANN 模型的输出包括 AA5754-H24 铝合金(热机械影响区(TMAZ)的抗拉强度、延伸率、硬度)的力学性能和焊核区硬度(NG)。研究发现,ANN 模型能够输出一定的参数来

提高其性能。该模型已被用于预测搅拌摩擦焊 AA575 铝合金的力学性能。实验上,通过增加偏心距和速度来提高抗拉强度,已经通过 ANN 模型得以证实。所有预测的 R^2 值均高于 0.97,表明了模拟的准确性。

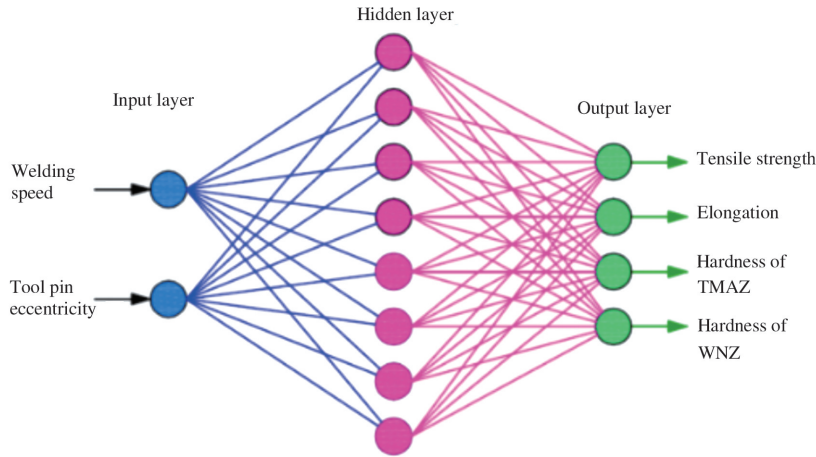


图 1 ANN 模型的结构^[11]

Zhang 等^[12]采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和流体体积法(Volume of Fluid, VOF)构建多相流模型,定量分析 TC4 钛合金和 AA2024-T4 铝合金搅拌摩擦焊过程中的传热传质行为。将混合材料视为功能梯度材料(functionally gradient materials, FGM)来计算焊核区(WNZ)的热物理特性。由于铝和钛合金热物理特性的巨大差异,铝/钛异种金属搅拌摩擦焊的温度场具有严重的不对称性。在距离搅拌针中心线相同距离处,前进侧(Advancing Side, AS)钛合金温度高于后退侧(Retreating Side, RS)铝合金温度,但在无搅拌针影响的后退侧上低于铝合金温度。由于钛合金的高流动应力,在铝/钛异种金属搅拌摩擦焊中,塑性材料流动主要发生在铝合金的后退侧上,其百分比超过 80%。

耿培皓等^[13]基于耦合欧拉-拉格朗日有限元法数值模拟了铝合金 5052 与高强钢 DP590 搅拌摩擦搭接过程中的温度场演变和材料流动行为。结果表明,有限元预测温度场和焊缝变形轮廓与实验测量结果吻合良好。当移动速度保持 300 mm/min 恒定不变时,随着转速由 500 r/min 增至 1 000 r/min,搅拌区峰值温度位置由前进侧的轴肩后方的铝合金表面转移至搅拌针底部与钢搅拌区的界面,峰值温度由 545℃ 增加至 635℃;在焊接过程中,前进侧温度始终高于后退侧温度,与转速无关。采用示踪粒子法研究材料迁

移轨迹,发现前进侧铝合金从更靠近搅拌针的内侧剪切层绕过搅拌针填埋在搅拌针前进侧后方,而后退侧铝合金主要迁移至搅拌针后退侧后方,迁移轨迹比较发散;搅拌针作用在铝/钢搭接面,驱使前进侧钢材料迁移至搅拌针后退侧后方,并在垂直方向上挤入上侧铝合金焊缝区。随着搅拌针转动,由前进侧迁移至后退侧的钢材料最终促使后退侧形成尺寸较大的钩状结构。相比于铝合金侧,转速的增加更为显著地加强了钢表面的材料流动。

张帅等^[14]基于耦合欧拉-拉格朗日方法,采用 Johnson-Cook 本构模型、温度相关的热机械物理参数、经典库仑定律和质量缩放技术,建立搅拌摩擦焊三维热力耦合有限元模型,模拟 6061 铝合金在不同旋转速度下,搅拌摩擦焊接过程中焊接件温度场分布规律及工具头旋转速度对焊接件温度升高和温度场分布的影响规律。研究表明,焊缝后退侧的温度高于前进侧,搅拌针的后方温度高于前方;焊接区域的温度随着搅拌深度的增加而升高;最高温度出现在搅拌结束阶段,而焊接阶段最高温度略有下降并且保持稳定;当转速从 500 r/min 增大到 1 000 r/min 时,焊缝中心峰值温度从 337.4℃ 升高到 496.5℃。特定测温点的模拟温度与热电偶实测数据吻合较好,最大误差不超过 20%,模拟焊缝与实际焊缝宏观相貌吻合良好。

慕铠丞等^[15]以 5052-H112 铝合金为研究对象,

基于响应面法优化设计试验方法,以转速、焊接速度、轴肩压入深度为因素,焊接接头的抗拉强度为响应值设计试验,建立对应的响应函数与回归模型,对模型进行方差分析,根据模型得到最佳工艺参数值,并与试验结果作比较。研究发现,成功建立了响应模型,在分析模型和试验验证后发现,在选定的工艺参数范围内,当转速为 737 r/min、焊接速度为 60 mm/min、轴肩压入深度为 0.3 mm 时,接头抗拉强度最优值达到 227 MPa。研究表明,转速和焊接速度对抗拉强度的影响最大,在给定范围内随着转速和焊接速度的提高,抗拉强度增大至峰值后下降,轴肩压入深度单独对接头抗拉强度的影响较小,其与转速交互影响显著。通过响应曲面法优化后的焊接工艺参数明显提高了 5052-H112 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头抗拉强度。

综上所述,搅拌摩擦焊的有限元模拟涉及塑性变形、不同应变率下的热流、复杂的材料流动和摩擦条件,对于铝合金搅拌摩擦焊模拟的研究已经相对成熟,目前应用较多的模拟方法包括人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)模型、计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)和流体体积法(Volume of Fluid, VOF)构建多相流模型、耦合欧拉-拉格朗日有限元法和 ABAQUS/CEL 方法等。通过模拟能够选择出组织性能较为优异的焊接参数,大大提高了效率,降低了劳动强度。

2 焊接参数

搅拌摩擦焊焊接参数对焊接质量及焊缝组织和性能起到重要作用,铝合金搅拌摩擦焊对焊缝影响较大的参数包括装配间隙及错边量、温度、搅拌针形貌、下压量、转速和焊接速度等。

2.1 装配间隙及错边量

邓利芬等^[16]研究了不同装配间隙及错边量对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的力学性能的影响。结果表明,在转速为 300~450 r/min、焊接速度为 100~150 mm/min 时,接头可划分为焊核区、热机影响区、热影响区及母材;其中,焊核区组织均为细小的等轴晶;接头的显微硬度呈 U 形分布,最低显微硬度位于热机影响区,最高显微硬度位于母材区;接头的平均抗拉强度为 341 MPa,为母材的 74%,接头的断后伸长率为 6.1%;焊接接头均断裂于热机影响区,呈韧性断裂。此外,随着装配间隙的增加,接头的抗拉强度逐渐降低;相反,随着错边量的增加,接头的抗拉强度呈先增加后降低的趋势;装配间隙为 1 mm、错边量为 1.5 mm 时,接头无缺陷,具有最优的力学性能。

刘杰等^[17]采用不同装配间隙(搭接间隙、对接间隙和错边量),对异质铝合金 5083-O/6082-T6 的 T 形接头进行搅拌摩擦焊,对焊后接头力学性能进行了对比分析。结果表明,当搭接间隙、对接间隙和错边量在一定范围内增加时,T 形接头的拉伸性能和剪切性能波动不大,弯曲性能逐渐下降;当搭接间隙控制在 0.6 mm、对接间隙 1.2 mm 和错边量 0.6 mm 时,T 形接头成形良好,未发现隧道孔、孔洞等缺陷,壁板和筋板之间均得到有效的连接,此研究可为实际工程上应用搅拌摩擦焊焊接 T 形接头提供参考。

钮旭晶等^[18]采用双轴肩搅拌摩擦焊对 6005A-T6 铝合金型材进行焊接,通过调整工件装配时的错边量来制备不同尺寸的错边接头,对接头进行拉伸、弯曲、硬度、疲劳等性能进行了研究。试验结果表明,错边量对铝合金接头的拉伸性能有影响,随着错边量的增大,接头抗拉强度降低,而错边量对接头的弯曲性能和接头硬度影响不大;试件错边量对 5 mm 厚 6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头疲劳性能影响很大,前进侧或后退侧随着错边量的增大,疲劳极限值都会降低,疲劳性能下降。

叶树茂^[19]指出对搅拌摩擦焊焊缝不同间隙量进行填充,与无间隙焊接接头对比,搅拌摩擦焊焊后外观成型良好,焊缝内部融合致密,无孔洞缺陷。拉伸试样断裂位置是焊缝内部产生“S”线缺陷位置,填充间隙接头抗拉强度可达到 176~181 MPa,仅略低于无间隙接头强度 6.8%,说明焊缝间隙填充方法可有效解决大组对间隙搅拌摩擦焊问题。

以上研究表明,装配间隙及错边量会对搅拌摩擦焊的焊缝性能造成影响,但二者的影响相反,装配间隙的增大会降低焊缝的拉伸性能,而错边量的增大会造成拉伸性能先增加后降低,因此在焊接过程中要将装配间隙和错边量控制在一个合理范围内,提高焊缝的性能。

2.2 焊接温度

焊接温度对组织及性能会造成影响,焊接过程中产生的热循环会造成焊缝存在残余应力,影响后期服役的安全稳定性。冯家铖等^[20]采用双轴肩搅拌摩擦焊对 4 mm 厚 2024 铝合金进行焊接,研究了焊接热循环温度对焊缝组织性能的影响。结果表明,后退侧峰值温度高于前进侧,温度差约为 20 ℃;焊核区平均晶粒尺寸为 10.1 μm,后退侧各区域平均晶粒尺寸大于前进侧,小角度晶界占比小于前进侧;焊核区存在细小的沉淀相 S 相,热影响区沉淀相数量减少和尺寸的增加导致力学性能下降;接头显微硬度呈“W”型分

布,后退侧热机影响区与热影响区交界处硬度值最小,约为 72.3 HV。

沿焊缝厚度方向的温度和材料流动梯度严重影响中厚板搅拌摩擦焊的焊接效率。有研究指出,大头搅拌针可以增加底部的热输入和材料流动,降低沿厚度方向的梯度。与小头搅拌针相比,焊接速度从 100 mm/min 提高到 500 mm/min 时,大头搅拌针能形成无缺陷接头。接头的抗拉强度和伸长率分别达到 247 MPa 和 8.7%,分别为母材的 80% 和 65%^[21]。因此,通过设计搅拌针结构来降低沿厚度方向的温度和材料流动梯度是提高中厚板焊接效率的关键。

2.3 搅拌针形貌

搅拌摩擦焊是通过搅拌针对工件的高速旋转摩擦来完成的焊接过程。搅拌针是搅拌摩擦焊过程中的重要部件,由于搅拌针在搅拌摩擦焊过程中产生了大部分的热量,因此它需要承受很高的应力和温度,所以搅拌针的材料和几何形状很重要。Pontjonoto 等^[22]采用 4 因素 4 水平优化方法研究了直圆柱形、锥形圆柱形、六边形和正方锥形 4 种搅拌针对焊接性能的影响。在本研究中使用的因素是工具转速、焊接速度、工具轴肩角和搅拌针倾斜角,响应是焊接接头的温度。研究发现,4 种几何形状中最优的为六边形搅拌针,其优化参数为转速 1 208 rpm,焊接速度 65 mm/min,倾斜角 2.5°,凹角 2°,最高温度 322.48 °C。得到的显著因素为搅拌针转速和凹角,显著性水平为 95%。

杜海泉等^[23]采用半螺纹-三弧面和全螺纹-三平面两种几何结构的搅拌针对 2219 铝合金进行 FSW 焊接数值模拟,并对不同螺纹特征的全螺纹-三平面搅拌针作用下接头的横截面形貌和力学性能进行对比分析。结果表明,搅拌针几何结构对焊接温度场的影响较小,但对流动场和应变速度的影响较大,弧面特征对于材料的驱动作用强于平面特征,并且半螺纹-三弧面搅拌针与隧道孔缺陷的关联性更强。试验结果表明,全螺纹-三平面搅拌针对 13 mm 厚板 FSW 接头组织和性能的影响主要是热输入量和温度分布差异所导致的。

Elyasi 等^[24]研究了搅拌摩擦焊搅拌针螺纹对 AA6068 铝合金/紫铜异种接头质量的影响。采用开发的计算流体力学(CFD)方法模拟搅拌针的产热和热-力作用。评估了接头的材料流动、显微组织、力学性能和硬度。结果表明,螺纹搅拌针增加了焊接过程中的热量。铝侧记录的最高温度,圆柱接头为 780 K,螺纹销接头为 820 K。螺纹搅拌针接头处的搅拌区尺

寸大于圆柱搅拌针。另一方面,螺纹搅拌针接头中 AA6068 铝合金与铜之间的机械互锁增加。螺纹搅拌针较高的搅拌作用提高了材料的流动速度和应变速率。较高的应变速率和材料流动速度减小了搅拌区的组织尺寸。试验结果表明,圆柱搅拌针焊接接头的极限抗拉强度为 272 MPa,螺纹搅拌针焊接接头的极限抗拉强度为 345 MPa。圆柱搅拌针焊接接头的平均显微硬度在 104HV 附近,螺纹搅拌针焊接接头的平均显微硬度为 109HV。螺纹搅拌针焊接接头的抗拉强度和硬度比圆柱搅拌针焊接接头分别提高了 25% 和 5%。

Yuvraj 等^[25]研究了超声振动和搅拌针形状对 AA7075-T651 和 AA6061-T6 接头组织和力学性能的影响。搅拌针采用圆柱形、正方形和三角形等三种不同形貌,超声振动的功率分别为 1.5 kW 和 2 kW。研究结果显示,在焊缝前进侧和后退侧,热机影响区具有最低的显微硬度。在所有接头中,拉伸断裂位置与最低硬度值相匹配。拉伸试样的场发射扫描电子显微镜断口形貌揭示了脆性、剪切和韧性断裂的不均匀分布。进行三点弯曲试验,确定焊缝接头的延展性和牢固性。超声振动的声软化效应以及搅拌针形貌对接头的材料流动和力学性能具有重要影响。研究发现,超声振动功率为 2 kW 的正方形搅拌针摩擦焊的焊缝无冶金缺陷,力学性能良好,最大抗拉强度、硬度和弯曲载荷分别为 297 MPa、151HV 和 3.82 kN。

2.4 搅拌针转速

刘晓超等^[26]选用 6061-T6 铝合金和 7075 铝合金进行搅拌摩擦焊试验。在预热时间 20 s、倾角 2.5°、下压量 0.1 mm、焊接速度 100 mm/min 的焊接参数下,对转速值为 800 r/min、1 000 r/min、1 200 r/min、1 500 r/min 的焊接接头的焊缝成型、力学性能、显微组织进行检测。结果表明,当转速为 1 200 r/min 时,焊缝表面成型最好,拉伸性能最佳为 255 MPa,达到了母材 6061-T6 铝合金的 89.5%;同时,前进侧产生的热量高于后退侧,将熔点高的金属置于前进侧较为合适。

Abioye 等^[27]利用改装的立式铣床对 AA1100 合金进行搅拌摩擦焊优化,以获得硬度和抗拉强度高 的焊件。研究发现,在转速 900 rpm、横移速度 40 mm/min、倾斜角 2° 的最佳工艺参数下,硬度值最高,为 35.32 BHN;在转速 900 rpm、横移速度 25 mm/min、倾斜角 2° 的最佳工艺参数下,抗拉强度最高为 99.12 MPa。方差分析表明,转速对焊件抗拉强度的影响最大,其次是倾斜角。

Talebsafa 等^[28]利用 SYSWELD 和 Visual-Environment 对超细晶粒 Al-Sc 合金薄板搅拌摩擦焊进行了数值模拟,并通过试验进行了验证。结果表明,搅拌摩擦焊是一种有利于保持超细晶(Ultra-Fine Grained, UFG)组织的技术,并能使焊接接头具有较好的力学性能。搅拌针转速对热性能和力学性能的影响最大。在搅拌针转速为 700 r/min、焊接速度为 80 mm/min、搅拌针倾斜角度为 3°时,Al-Sc 合金接头的硬度和屈服强度均达到最高。

以上研究表明,搅拌针转速对焊缝组织及性能具有重要影响,其中转速对焊缝的抗拉强度影响最大,在进行焊接试验前,建议利用模拟软件获得焊缝性能较为优异的搅拌针转速,在进行试验。

2.5 焊接速度

焊接速度直接决定焊缝的组织及性能,如果焊接速度过慢,热影响区就会变宽,焊缝表面的毛刺增多,焊缝质量和性能变差;如果焊接速度过快,焊缝的宽度和深度减小,容易造成咬边缺陷。Anandan 等^[29]选取恒定旋转速度为 1 000 rpm,搅拌针倾斜角为 20°,研究焊接速度为 25 mm/min、45 mm/min、65 mm/min 和 85 mm/min 时,AA7050 T7651-AA2014A T6 合金焊接接头的组织及性能。结果表明,随着焊接速度从 25 mm/min 增加到 85 mm/min,搅拌区宽度从 9.497 mm 减小到 6.315 mm。此外,微观组织分析揭示了焊件中热机影响区(TMAZ)前进侧和后退侧的材料流动方向和晶粒结构。背向散射电子衍射技术(Electron Back Scatter Diffraction, EBSD)分析表明,与其他焊接速度相比,当焊接速度为 65 mm/min 时,焊接接头具有更细小的晶粒尺寸(平均粒径 2 μm)。焊接速度为 25~85 mm/min 的焊接接头后退侧残余应力值分别为 3 MPa、7 MPa、4 MPa、5 MPa,抗拉强度值分别为 274 MPa(25 mm/min)、317 MPa(45 mm/min)、332 MPa(65 mm/min)和 308 MPa(85 mm/min)。结果表明,与其他焊接速度相比,焊接速度为 65 mm/min 的焊接接头具有更好的力学性能和冶金性能,这是由于材料实现了充分融合和焊缝中晶粒得到了细化,从而使焊接速度为 65 mm/min 的接头具有更高的抗拉强度。

张海峰等^[30]通过对 8 mm 厚 2219 铝合金进行双轴肩搅拌摩擦焊试验,研究了不同焊接速度对接头成形、组织演变及其对力学性能的影响规律。试验结果表明,在固定转速(200 r/min)下,不同焊接速度下的接头均成形良好,未出现微裂纹、隧道以及疏松等焊缝表面缺陷。随着焊接速度的增加,接头区域晶粒尺

寸减小;接头显微硬度受到晶粒尺寸与沉淀相分布的制约,硬度分布曲线呈“W”形,热影响区硬度最低。并且随着焊接速度的增加,接头最低硬度和抗拉强度逐渐提高,断裂位置发生在热影响区与热影响区交界处。在焊接速度为 350 mm/min 时,接头抗拉强度达到最大值 335 MPa,约为母材的 72.8%。

Wang 等^[31]将 2219Al-T8 合金分别置于前进侧和后退侧,在转速 800~1200 rpm、焊接速度 200~800 mm/min 条件下,对 2219Al-T8/2195Al-T8 板材进行搅拌摩擦焊。结果表明,焊接参数和错边量影响接头强度和断裂失效行为。搅拌摩擦焊热循环导致 2219Al-T8 和 2195Al-T8 两侧均出现低硬度区。2219Al-T8 侧的低硬度区以 θ' (Al₂Cu)析出相的部分粗化和残余析出相的溶解为特征,在整个搅拌摩擦焊接头中表现出的硬度最低。当 2219Al-T8 合金放置在前进侧时,2219Al-T8 侧的低硬度区经过峰值温度作用, θ' 析出相比 2219Al-T8 合金放在后退侧上溶解的更多,从而获得了更高的抗拉强度。当焊接速度从 200 mm/min 增加到 400 mm/min 时,搅拌摩擦焊接头在室温和-196℃下的抗拉强度大幅提高。在相同的焊接参数和错边量下,搅拌摩擦焊接头在-196℃时的抗拉强度明显高于室温下的抗拉强度。搅拌摩擦焊接头在拉伸过程中沿 2219Al-T8 侧低硬度区发生断裂。对于弯曲试验,上、下弯曲失效角分别约为 91°~117°和 88°~109°,薄弱区出现在 2195Al-T8 侧的“S”线位置或低硬度区。

3 性能研究

3.1 力学性能

王淳娅等^[32]研究了 7020 铝合金搅拌摩擦焊(FSW)的结构和力学性能。研究结果显示,在硬度上,母材>热影响区>焊核区,热影响区平均硬度约为 94HV,母材平均硬度为 99HV,焊核区平均硬度最低为 78HV,焊核区出现“S”缺陷,在一定程度上弱化了焊核区性能。7020 铝合金搅拌摩擦焊接头的抗拉强度为 235 MPa,屈服强度为 158 MPa,屈强比为 0.67,伸长率为 7%,焊接系数可以达到 73.8%;母材的抗拉强度为 325 MPa,屈服强度为 278 MPa,屈强比为 0.86,伸长率为 25%;焊接接头中心显微组织主要由胞状树枝晶体组成,显微结晶依次呈现为平面晶、胞状晶、树枝状晶、等轴晶;铝合金母材和焊接接头的相组成均为 α -Al+Mg₂Si;焊接接头断口呈现比较明显的韧性断裂特征。

Zhou 等^[33]采用搅拌摩擦焊对电弧增材制造的

205A 铝合金零件进行焊接。系统研究了搅拌摩擦焊接头的微观组织特征、相结构和位错,并对接头的力学性能进行了评价。结果表明,焊缝中的气孔几乎消除,搅拌区获得了尺寸约为 $5\ \mu\text{m}$ 的细小再结晶晶粒。在剧烈塑性变形和热作用下,焊缝中 θ 相发生破碎和部分溶解,在 Cd 的作用下析出 θ' 强化相。与电弧增材制造制备的 205A 母材相比,搅拌摩擦焊接头由于 θ' 相的析出强化和细小再结晶晶粒的晶界强化,保持了较高的强度,提高了塑性。

Zhou 等^[34]对由高密度纳米亚稳相 S' 相组成的深冷和温轧超细晶 AA2024 铝合金板材与由高密度 GPB 区组成的常规粗晶 AA2024-T4 超薄板材进行了高速水下搅拌摩擦焊。结果表明,采用超细晶材料替代前进侧,可以显著提高接头的强度和塑性(屈服应力增加 50 MPa,强度系数达到母材的 98%),为铝板的低成本、高强度连接提供了一种有前景的方法。

3.2 疲劳性能

王磊等^[35]基于 ABAQUS 与 FRANC 3D 联合仿真的方法,对 2024-T4 铝合金搅拌摩擦焊接头预制裂纹于不同部位的紧凑拉伸试样进行裂纹扩展分析以及寿命预测,并深入分析不同部位裂纹扩展行为存在差异性的原因。结果表明,随着裂纹长度的不断延长,裂纹尖端应力强度因子随之增大,且裂纹向前扩展路径基本沿直线扩展,ABAQUS 与 FRANC 3D 联合仿真方法分析不同部位的裂纹尖端应力强度因子和裂纹扩展路径的理论计算和试验结果基本吻合,验证了分区域进行联合仿真的模型精度满足要求。不同部位裂纹扩展试样寿命预测结果与试验结果的相对误差均在 5% 左右,对焊接接头分区域联合仿真进行寿命预测是准确可行的。裂纹位于不同部位的扩展试样断口处的疲劳辉纹间距不同导致预制裂纹于 3 个部位的疲劳寿命由低到高为:热影响区、垂直于焊缝方向、焊核区。

杨子涵等^[36]研究了钨极氩弧焊(TIG)和搅拌摩擦焊(FSW)对 2219 铝合金(母材)力学及疲劳性能的影响。通过拉伸试验,得到了母材、TIG 和 FSW 接头的抗拉强度和伸长率;通过疲劳性能试验测试了母材、TIG 和 FSW 接头在不同应力下相应的疲劳寿命,根据疲劳试验结果绘制了其试样的 S-N 曲线。研究结果发现,未焊接的铝合金母材抗拉强度和伸长率最高,分别为 506 MPa 和 15.92%;TIG 接头抗拉强度和伸长率分别为 330 MPa 和 7.65%,FSW 接头抗拉强度和伸长率分别为 310 MPa 和 8.74%。母材、TIG 和 FSW 接头等 3 种疲劳试样在 2×10^6 次循环下的疲劳

强度分别为 129、108、115 MPa,其疲劳断口均可分为裂纹源区、裂纹扩展区和瞬间断裂区,疲劳裂纹分别起始于试样表面的局部变形区、第二相夹杂物和“吻接”缺陷。疲劳裂纹扩展区的主要形貌为疲劳辉纹和二次裂纹,瞬间断裂区以脆性断裂为主。研究结果表明,TIG 和 FSW 等 2 种焊接工艺均导致了 2219 铝合金的强度、塑韧性和疲劳性能降低,其接头表面的第二相夹杂物和“吻接”缺陷促进了疲劳裂纹的萌生。

双轴肩搅拌摩擦焊由于其接头结构设计简单、轻便等优点被逐步推广使用。“复兴号”高速列车中底板、平顶、裙板、隔墙、高压箱底板等均采用双轴肩搅拌摩擦焊工艺。在双轴肩搅拌摩擦焊过程中,一般容易产生未焊满、错边、轴向偏移等焊接缺陷。然而,在判定上述缺陷的失效尺寸、失效形式及失效周期时,国内外相关行业尚没有一套严格的标准。通过对不同尺寸的缺陷进行常规力学性能、疲劳性能等相关试验。结果表明,含未焊满缺陷的焊接接头的抗拉强度较无缺陷的抗拉强度降低约 15%,硬度降低约 10%,焊缝处残余应力水平升高约 20%。对焊接接头的疲劳性能进行了研究,获得了各试样的 S-N 曲线,并进行了分析,结果表明,应力比 $R=0.1$,频率 60 Hz 下,随着未焊满缺陷尺寸的增大,疲劳性能降低^[37]。

3.3 耐腐蚀性能

Lu 等^[38]研究了异种 AA7050-AA2024 搅拌摩擦焊接头焊核区的组织不均匀性及其对电偶腐蚀的影响。研究发现,固溶 Zn 含量和晶间 MgZn_2 数量的增加极大地恶化了局部 AA7050 焊核区的耐蚀性,而晶粒细化和碎化的 Al_2Cu 对局部 AA2024 焊核区的耐蚀性略有改善。不均匀的显微组织变化降低了焊核区的电偶腐蚀电阻,导致焊核区底部电偶腐蚀最严重,电阻最低,电偶腐蚀和晶间腐蚀相互作用促进了溶解过程。

Viveiros 等^[39]研究了搅拌摩擦焊对异种 AA2050 和 AA7050 铝合金微观组织和电化学活性的影响。采用局部电化学测试研究了异种合金沿焊缝区域局部电化学活性。对焊接接头的截面进行了研究。结果表明,异种合金的搅拌摩擦焊影响了焊接过程形成的不同区域的微观组织和电化学活性。扫描振动电极技术(Scanning Vibrating Electrode Technique, SVET)和离子选择性微电极微电位法研究表明热机影响区是电化学活性最高的区域。在该区域观察到的高电化学活性与焊接对微观结构的影响以及两种合金之间的电偶耦合有关,其中 AA7050 作为阳极,AA2050 作为阴极,对 AA7050 合金的优先腐蚀也很明显。

Kumar 等^[40]通过改变前进侧和后退侧母材位置,研究了搅拌摩擦焊 AA5083~AA6061 异种接头的力学性能和腐蚀性能。并将异种接头与两种母材的搅拌摩擦焊接头进行对比。宏观组织照片显示,搅拌摩擦焊接头中两种合金的融合模式因母材位置的不同而有很大差异。结果表明,对于给定的铝合金,将 AA5083-H111 放置在前进侧上,AA6061-T6 放置在后退侧上,焊缝区获得的力学性能和腐蚀性能较高。AA5083-AA5083 接头断裂在焊缝中心附近,而其他接头断裂均发生在偏向 AA6061 侧合金的热影响区。腐蚀试验表明,异种搅拌摩擦焊接头焊缝区的耐蚀性低于同种合金的焊接接头。在异种接头中,腐蚀是从 AA6061 侧析出的金属间化合物颗粒周围开始的。

4 结束语

随着我国工业化步伐的不断加快,焊接技术得到了快速的发展。搅拌摩擦焊由于具有成本低、效率高、焊缝性能好和绿色环保等优点在国内外得到了广泛应用。铝合金在船舶、汽车和航天航空领域的各种应用,焊接需要在低于熔化温度下进行,以减少缺陷的形成,提高力学性能,因此搅拌摩擦焊是不二的选择。我国的铝合金搅拌摩擦焊技术已经发展较为成熟,下一步应继续强化基础研究,重点研究异种铝合金的搅拌摩擦焊工艺,建立相关的标准规范,促进铝合金应用再上新台阶。

参考文献

- [1] SEOYOON G, NAOKI T, MAKOTO K, et al. Wear properties of aluminum alloys fabricated by laser powder bed fusion[J]. Tribology International, 2023(187): 108769.
- [2] EMANUELA C, EMANUELE G. Metallurgical analysis of laser powder bed-fused Al - Si - Mg alloys: Main causes of premature failure[J]. Materials Science & Engineering A, 2023(881): 145402.
- [3] MARTINS J B F, YUUKI G K, BATISTA A M M, et al. Ductile and Corrosion-Resistant Aluminum Alloy From Recycled Secondary Aluminum Scraps Containing Iron Impurities[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2023, 54(4): 2188-2205.
- [4] EBENEZER T A, EBENEZER O, SEMAN A A. Prediction of the Hardness of Pulverized Glass Waste-Reinforced Aluminium Alloy 6061-T6 Friction Stir Welded Joint[J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2022(6693): 31-42.
- [5] HENDRATO, JAMASRI, TRIYONO, et al. Mechanical Properties and Microstructure Evolution of Double-Sided Friction Stir Welding AA6061-T6[J]. Key Engineering Materials, 2022(6699): 73-81.
- [6] HASSAN W K, LAY E S, RASHDAN M I B, et al. The Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Weldability of Aluminum Alloys with Similar and Dissimilar Metals; Review [J]. Metals, 2022, 12(12): 2099.
- [7] KUMAR A R, RAGHAV R G. Role of traversing speed and axial load on the properties of friction stir welded dissimilar AA6101-T6 AND AA1350 aluminium alloys[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2023, 46(1): 81-85.
- [8] JAVIER V, ISABEL A F, EGOITZ A, et al. Friction Stir Weldability at High Welding Speed of Two Structural High Pressure Die Casting Aluminum Alloys[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022, 6(6): 1-12.
- [9] 岳玉梅, 韩松, 郭芮秀, 等. 基于 RBFNN-ACO 的铝合金搅拌摩擦焊接工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 54-61.
- [10] 张忠科, 王希靖. 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数库的建立[J]. 热加工工艺, 2009, 38(19): 116-119.
- [11] ESSA A R S, AHMED M M Z, ABOUD A R K, et al. Prediction of Tool Eccentricity Effects on the Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA5754-H24 Aluminum Alloy Using ANN Model[J]. Materials, 2023, 16(10): 3777.
- [12] ZHANG X K, SHI L, WU C S, et al. Multi-phase modelling of heat and mass transfer during Ti/Al dissimilar friction stir welding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023(94): 240-254.
- [13] 耿培皓, 秦国梁, 马宏, 等. 铝/钢异种金属搅拌摩擦搭接传热与材料流动行为[J]. 电焊机, 2023, 53(3): 1-14.
- [14] 张帅, 王进. 基于 CEL 方法的搅拌摩擦焊 6061 铝合金温度场研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 64-71.
- [15] 慕铠丞, 王进, 王勇强, 等. 基于响应面法的 5052 铝合金搅拌摩擦焊接工艺参数研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(2): 37-43.
- [16] 邓利芬, 李超, 丁艳霞, 等. 大厚度 2219 铝合金搅拌摩擦焊组织和性能及工程因素分析[J]. 焊接, 2023(6): 18-23.
- [17] 刘杰, 屈志军, 遇境润. 装配间隙对铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接, 2023(5): 29-34+39.
- [18] 钮旭晶, 梁晨, 鲁二敬, 等. 不同错边尺寸对铝合金 BT-FSW 接头力学性能的影响[J]. 焊接技术, 2023, 52(4): 40-43+113.
- [19] 叶树茂, 金鑫, 王东辉, 等. 大组对间隙搅拌摩擦焊问题解决措施[J]. 有色金属加工, 2023, 52(2): 32-35+49.
- [20] 冯家铨, 宫文彪, 鞠川, 等. 2024 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头热循环及组织特征[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-9[2023-07-10]. DOI: 10.13229/j.cnki.Jdxgbx.20230054.
- [21] MA X T, XU S M, WANG F F, et al. Effect of Temperature and Material Flow Gradients on Mechanical Performances of Friction Stir Welded AA6082-T6 Joints[J]. Materials, 2019, 15(19): 6579.
- [22] PONTJONOTO N A, BATAN I M L, PRAMONO A S, et al. Friction Stir Welding Process Optimization on 4 Tool pin Geometries with Process Parameters and Shoulder Concave Angle in 6005A-T6 Aluminium Alloy Joining[J]. Key Engineering Materials, 2023(6779): 33-39.
- [23] 杜海泉, 范翼飞, 王一, 等. 搅拌针形貌对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. 电焊机, 2023, 53(5): 77-83+94.
- [24] ELYASI M, TAHERIAN J, HOSSEINZADEH M, et al. The effect of pin thread on material flow and mechanical properties in friction stir welding of AA6068 and pure copper. [J/OL]. [2023-07-19]. [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)01959-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com/](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)01959-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com/)

- 2Retrieve%2Fpii%2FS240584402301959X%3Fshowall%3Dtrue.
- [25] YUVARAJ K P, SEKARAN J J G, SHANMUGAM A. Impact of ultrasonic vibration power and tool pin profile on mechanical and microstructural behaviour of friction stir welded dissimilar aluminium alloy joints[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023, 95(5): 685-696.
- [26] 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.
- [27] ABIOYE T E, OLUGBUSI O O. Parametric Optimization of Aluminium Alloy 1100 Friction Stir Welding Using Adapted Vertical Milling Machine[J]. Advanced Materials Research, 2023(6851): 3-16.
- [28] TALEBSAFA V, YOUSEFIEH M, BORHANI E, et al. 摩擦搅拌焊参数对超细晶 Al-0.2 wt%Sc 合金薄板微观组织和热力学性能的影响[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(1): 61-73.
- [29] ANANDAN B, MANIKANDAN M. Effect of welding speeds on the metallurgical and mechanical property characterization of friction stir welding between dissimilar aerospace grade 7050 T7651-2014A T6 aluminium alloys [J]. Materials Today Communications, 2023(35): 106246.
- [30] 张海峰,郝云飞,李高辉,等.2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊工艺及接头组织性能研究[J].机械工程学报,2022,58(22):250-257.
- [31] WANG Z L, ZHU W L, ZHANG Z, et al. Dissimilar friction stir welding of 2219-T8 and 2195-T8 aluminum alloys: part I—microstructure evolution and mechanical properties[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(23): 9737-9754.
- [32] 王淳嫒,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] ZHOU S Y, WU K, YANG G, et al. Friction stir welding of wire arc additively manufactured 205A aluminum alloy: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering A, 2023(876): 145154.
- [34] ZHOU Y X, XIONG H Q, ZHANG Y, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained AA2024 sheets joined by underwater friction stir welding [J]. Materials Characterization, 2023(198): 112749.
- [35] 王磊,李东侠,回丽,等.2024-T4 铝合金 FSW 接头疲劳裂纹扩展行为及寿命预测[J].焊接学报,2023,44(4):77-83+133-134.
- [36] 杨子涵,刘德博,杨思愚,等.2219 铝合金 TIG 和 FSW 接头力学及疲劳性能[J].精密成形工程,2023,15(1):17-24.
- [37] 陈佳,靳军军.含缺陷的 A6005 铝合金 FSW 接头疲劳性能研究[J].焊接技术,2023,52(5):55-60.
- [38] LU H J, XU W F, WANG H, et al. Microstructure evolution and its effect on the corrosion of dissimilar aluminum alloys friction stir welding joint[J]. Corrosion Science, 2023(220): 111249.
- [39] VIVEIROS B V G, SILVA R M P, DONATUS U, et al. Welding and galvanic coupling effects on the electrochemical activity of dissimilar AA2050 and AA7050 aluminum alloys welded by Friction Stir Welding (FSW) [J]. Electrochimica Acta, 2023(449): 142196.
- [40] KUMAR K K, KUMAR A, NAGU KORRA. Mechanical and Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded 5083 - 6061 Aluminium Alloy Joints: Effect of Base Material Position[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2023, 76(7): 1985-1996.

Research Progress of Friction Stir Welding Technology for Aluminum Alloy

Guo Kexing¹, Gao Jie²

(1. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, China;

2. Shanxi Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xi'an 710000, China)

Abstract: In this paper, the latest research progress of friction stir welding of aluminum alloy is summarized. This paper reviews the latest research results at home and abroad in recent years from three aspects: welding simulation research, the influence of welding parameters on weld microstructure and properties and the research on friction stir welding properties of aluminum alloy. Finally, it is pointed out that friction stir welding of dissimilar aluminum alloys is the focus and direction of the next research.

Keywords: aluminum alloy; friction stir welding; welding numerical simulation; welding parameters; mechanical properties; fatigue performance; corrosion resistance

本刊启事

来稿凡经本刊使用,如无特殊声明,即视作投稿者同意授权本刊及本刊合作媒体进行信息网络传播及发行。同时,本刊支付的稿费也包括上述所有使用方式的稿费。特此告知。

本刊编辑部