

面向搅拌摩擦焊的高强度铝合金性能特性研究

沈桓宇¹, 王志刚², 陈治³

(1.南充职业技术学院智能制造学院, 四川 南充 637100; 2.成都理工大学机电工程学院, 四川 成都 610059;
3.成都国科检测技术有限公司, 四川 成都 610000)

摘要:针对搅拌摩擦焊的高强度2219铝合金材料,研究了铝合金2219在焊接成型过程中的各个影响因素。采用热电偶测温法对18mm厚的高强度2219铝合金搅拌摩擦焊接过程进行了全因素试验,得到了距焊缝中心不同距离、不同厚度处的热循环曲线和峰值温度,结合焊接接头的显微组织观察和拉伸试验,研究了在不同转速(n)、焊接速度(v)和螺距比(n/v)下焊接接头的热循环温度、显微组织和力学性能。研究结果能够为2219铝合金材料的加工过程中的参数优化和工程应用提供有效的支撑依据。

关键词:搅拌摩擦焊; 高强度铝合金; 焊接参数; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TH16; TU512.4; TG115.6+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2025)10-0033-06

Research on the Performance Characteristics of High Strength Aluminum Alloy for Friction Stir Welding

SHEN Huanyu¹, WANG Zhigang², CHEN Zhi³

(1.Intelligent Manufacturing College of Nanchong Vocational and Technical College, Sichuan Nanchong 637100, China;
2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China;
3.Chengdu Guoke Testing Technology Co., Ltd., Sichuan Chengdu 610000, China)

Abstract: The various influencing factors of high-strength 2219 aluminum alloy material in the welding process of friction stir welding were studied. A full factor experiment was conducted on the friction stir welding process of high-strength 2219 aluminum alloy with a thickness of 18mm using thermocouple temperature measurement method. The thermal cycling curves and peak temperatures at different distances and thicknesses from the center of the weld were obtained. Combined with the microstructure observation and tensile test of the welded joint, the thermal cycling temperature, microstructure, and mechanical properties of the welded joint were studied at different rotational speeds(n), welding speeds(v), and pitch ratios(n/v). The research results can provide effective support for parameter optimization and engineering applications in the processing of 2219 aluminum alloy materials.

Key Words: Friction Stir Welding; High Strength Aluminum Alloy; Welding Parameters; Microscopic Organization; Mechanical Property

1 引言

高强度铝合金2219在航空航天领域有广泛的应用。它常用于制造航天器的结构部件,例如火箭的燃料箱、发动机零部件、推进器以及航天飞机的机身和机翼等^[1-2]。这是因为铝合金2219具有优异的机械性能和耐腐蚀性,能够满足航天器对轻量化、高强度和耐腐蚀的要求。搅拌摩擦焊(FSW)技术是实现高强度铝合金的焊接的重要手段^[3],但对于大厚度焊接过程容易出现温度分布不均匀现象,从而难以保证焊接质量。

国内外研究学者对高强度铝合金焊接开展了大量研究,文献^[4]采用FLUENT软件基于计算流体力学模拟了6063-T6铝合金的搅拌摩擦焊接过程,探讨了刀具尺寸和转速对焊接温度场的

影响规律。文献^[5]研究了焊接工艺参数对铝合金力学性能的影响规律,通过实验得到铝合金焊接最优工艺参数组合。文献^[6]研究了在不同焊接工艺参数条件下,镁合金和高强钢搅拌摩擦焊接的组织特性和力学性能,并研究了不同合金化合物对焊接接头断口形貌特性的影响规律。文献^[7]通过有限元法对铝合金搅拌摩擦焊接接头的疲劳特性进行了仿真分析,结果表明焊接接头的厚度是影响接头疲劳寿命的重要因素。文献^[8]通过有限元研究了大厚度铝合金搅拌摩擦焊接接头的温度场分布特性,结果表明转速对焊接接头的温度场分布影响更加显著。文献^[9]对镁合金搅拌摩擦焊接接头的断口形貌进行了实验研究,结果表明焊接搅拌方向为逆时针时,焊接接头具有更大的剪切力。

来稿日期:2024-08-11

基金项目:2023年科技惠民技术研发项目(HM03-069-SF)—铝合金薄板双脉冲MIG焊接头的非匹配成型及力学性能研究

作者简介:沈桓宇,(1988-),男,四川南充人,硕士,讲师,主要研究方向:机械制造与材料应用工程

上述研究为铝合金2219的搅拌摩擦焊接性能的研究提供了参考,但目前对于焊接工艺参数对大厚度铝合金2219的焊接性能研究尚不明确,研究焊接工艺参数对铝合金2219性能的影响,有利于实现高质量焊接。

基于此,这里采用热电偶测温法对大厚度铝合金2219的搅拌摩擦焊接过程进行了全因素试验,在显微组织观察和力学性能测量的基础上,探讨了不同工艺参数对高强度铝合金焊接过程中热循环温度和焊接质量的影响规律。

2 实验与方法

2.1 材料与焊接实验

焊件尺寸为(400×120×18)mm,材料为2219-T8铝合金,经固溶处理后进行冷加工,再进行人工时效。采用X射线荧光光谱仪(XRF-1800)对材料的化学成分进行分析。

在上海拓普数控技术公司的搅拌摩擦焊机床进行试验,采用直径32mm的旋转刀具,其中包括凹肩和锥形螺纹销。螺纹销的根部直径为15mm,销口直径为7mm。刀具销的几何特性参数由实际应用提供。螺纹有三个相邻的平面,夹角为60°,螺纹的螺纹角、锥角、凹角分别为15°,12.6°和4°。采用自主开发的搅拌摩擦焊温度场测量与分析系统,对铝合金进行温度测量,采样频率为10Hz,测温范围为(0~1000)°C,分辨率为0.1°C,相对测量误差小于0.75%T。在本实验中,K型热电偶尖端埋设在刀具销的上下边缘以测量TMAZ的温度,以免在搅拌摩擦焊接过程中被刀具破坏或明显移位。

焊接工艺及焊件整体热电偶布置,通过移除和检查热电偶在焊板上的标记,验证焊接后热电偶相对于焊缝中心的有效位置,如图1所示。

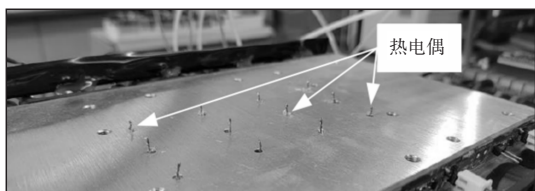


图1 焊接过程和热电偶的布置

Fig.1 Welding Process and the Arrangement of Thermocouples

如图2所示为本研究的焊接实验装置,为进行有效的进行实验对比,在焊接过程中,设置焊接速度为(75~125)mm/min,刀具的倾角为2.5°,压力量为0.4mm,实验方案,如表1所示。



图2 焊接实验装置

Fig.2 Welding Experimental Device

表1 焊接实验方案
Tab.1 Welding Experiment Plan

序号	旋转速度 n (r/min)	焊接速度 v (mm/min)
1	300	75
2	300	100
3	300	125
4	350	75
5	350	100
6	350	125
7	400	75
8	400	100
9	400	125
10	450	75
11	450	100
12	450	125

2.2 显微组织的实验

在焊接过程中,不同的工艺参数会引起焊接热的变化,进而影响材料的流动特性和接头的显微组织形态^[10]。利用电子背散射衍射(EBSD)对试样的显微结构进行表征,在本实验中,采用线切割沿着垂直于焊缝的方向切割焊缝。试件尺寸为(30×18×5)mm,包括整个焊缝和部分基材。

采用(500~3000)磨粒的砂纸对试样进行研磨,然后采用抛光膏进行抛光,然后在抛光盘上进行振动抛光,自动抛光机转速设置为60r/min,抛光时间约为4h。为了进一步获得显微组织性能,采用JSM-IT800场发射扫描电镜对试样进行了定量显微测量,并利用AztecCrystal软件确定了试样的平均晶粒尺寸。显微组织,其中,NZ为熔核区,TMAZ为热力学影响区,HAZ为热影响区,BM为基材,如图3所示。

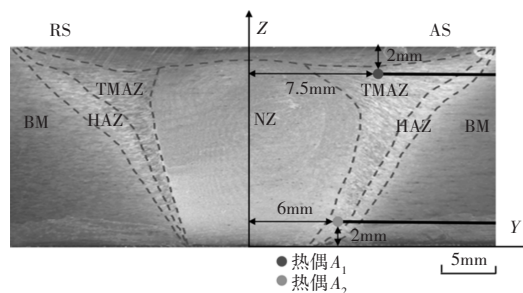


图3 接头的显微组织和温度测量位置
Fig.3 Microstructure and Temperature Measurement Location of the Joint

2.3 力学性能实验

为研究接头的力学性能对铝合金的影响,根据Hall-Petch公式^[11],探讨工艺参数对焊接后焊缝力学性能的影响,通过基于Instron 万能试验机进行拉伸试验。试样尺寸和拉伸试验按GB/T228.1-2021国家标准进行,接头的抗拉强度在厚度方向上分三层测量,试件的尺寸,如图4所示。

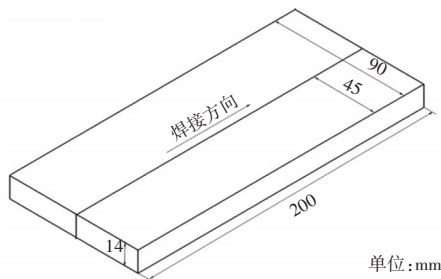


图4 焊接试件尺寸
Fig.4 Welding Specimen Size

3 结果与讨论

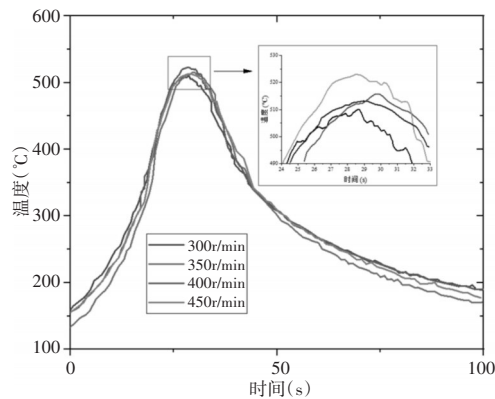
刀具的转速和焊接速度都决定了热输入、温度分布和材料变形速率,影响焊缝的显微组织和力学性能,从而影响焊接质量。本节以前述实验为基础,分析工艺参数对大厚度铝合金2219的性能影响。

3.1 焊接工艺参数对温度场的影响

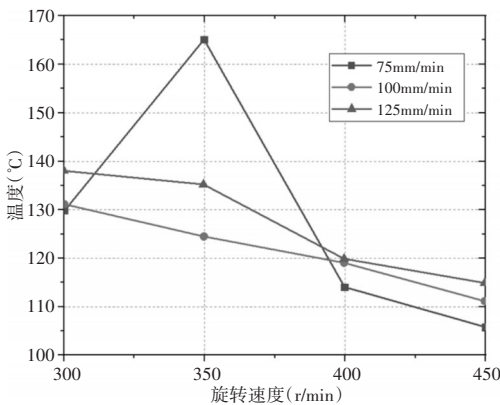
本研究以 A_1 测点的温度作为焊接时间的函数作为热循环曲线,选取热电偶 A_1 与热电偶 A_2 测点最高温度之差作为上下表面温差,以研究焊接工艺参数对核心区温度场的影响。

3.1.1 转速对温度场的影响

本研究分析在焊接速度为75mm/min时,不同转速对铝合金2219的影响,首先分析不同转速下的热循环曲线及上下测点温差,如图5所示。



(a) 测点热循环曲线



(b) 测点温差

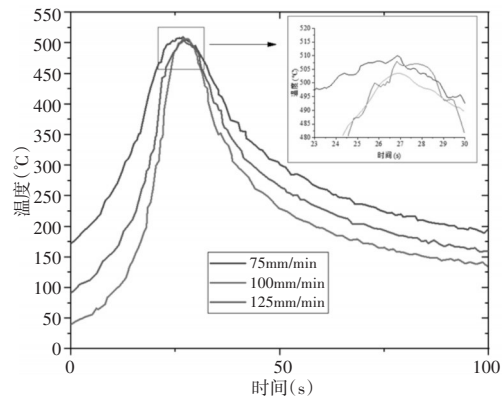
图5 不同转速下的热循环曲线及温度差
Fig.5 Thermal Cycle Curve and Temperature Difference at Different Rotation Speeds

从图5(a)可以看出,在一定转速范围内,随着转速的增加,铝合金2219的温度随着转速的增大而不断上升,这主要是由于在一定转速范围内,焊件铝合金2219表面产生较大的热量,使得铝合金2219焊件自身的温度上升。而转速超过某一值时,铝合金2219焊件自身的温度呈现下降趋势,这主要是由于温度的升高,铝合金2219焊件接头区域将出现软化现象,减小了分子吸附能力,使得金属焊肩与焊件表面之间的摩擦系数减小,从而使得铝合金2219焊件温度出现了降低的现象^[12]。如果转速继续增加,塑性金属将进一步受到肩部的摩擦和挤压,热塑性金属层的润滑作用将降低,导致接触面摩擦增加,从而温度继续上升。

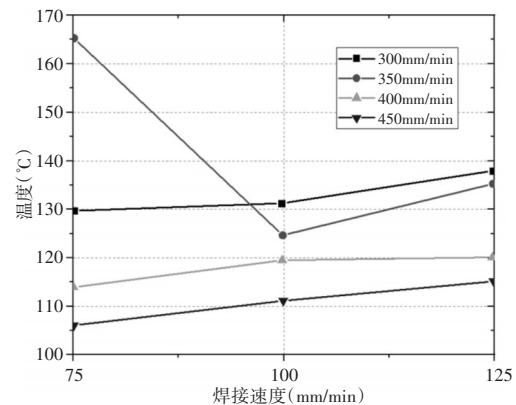
从图5(b)可以看出,焊件的温差随着转速的增加而减小,这主要原因是焊肩以下产生较高的温度,并传递到焊件的底部,使得铝合金2219焊件底部产生一定的材料变形,从而铝合金2219焊件各位置的温差减小^[13]。同时可以看出在个别参数组合下,铝合金2219焊件温度差异有增大的现象,分析主要原因色工艺参数设置不合理,使得热量传导不均匀所致,这种不均匀的热传导将影响铝合金2219焊件的力学性能。

3.1.2 焊接速度对温度场的影响

铝合金2219焊件在转速为300r/min时热循环曲线图,如图6所示。从图6(a)可以看出,铝合金2219焊件的焊接最高温度与焊接速度存在一定的相关性,即提高焊接速度将降低焊件的最高温度,分析主要原因是由于焊接速度的提升将减小刀具与焊件之间的摩擦时间,从而使得铝合金2219焊件的焊接温度得到降低。



(a) 测点热循环曲线



(b) 测点温差

图6 不同焊接速度下的热循环曲线和温度差
Fig.6 Thermal Cycle Curve and Temperature Difference at Different Welding Speeds

从图6(b)可以看出随着焊接速度的增加,温差逐渐增大。随着焊接速度的增加,热量输入减少,使得焊件顶部到底部的热传导减少,从而使得铝合金2219焊件各个位置的温差增大。

3.1.3 螺距比对温度场的影响

这里采用螺距比(n/v)作为焊接热输入的相对度量^[14],来研究螺距比对铝合金2219焊件温度场和焊接性能的影响。

不同工艺参数组合下的最高温度和核心区温差,如图7所示。表3列出了不同螺距比下的最高温度和温度差,可以看出当螺距比 ≤ 3 时,最高温度 $T_{\max} < 510^{\circ}\text{C}$;当 $3 < \text{螺距比} < 4$ 时,最高温度 T_{\max} 在 $(510\sim 520)^{\circ}\text{C}$ 范围内;当螺距比为4时,最高温度在 $(500\sim 530)^{\circ}\text{C}$ 范围内波动变化。转速和热输入过大导致表面缺陷,因此转速不宜过高。

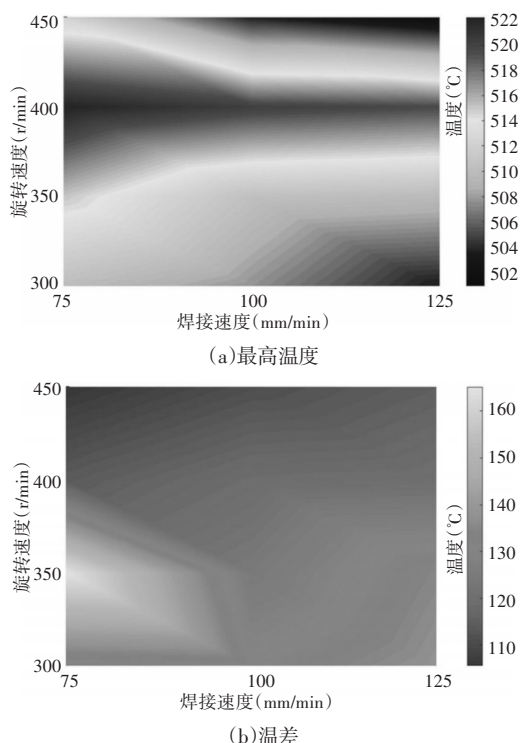


图7 不同工艺参数组合下的温度特性

Fig.7 Temperature Characteristics Under Different Combinations of Process Parameters

表2 不同螺距比下的最高温度及温差($^{\circ}\text{C}$)

Tab.2 Maximum Temperature and Temperature Difference Under Different Pitch Ratios($^{\circ}\text{C}$)

螺距比	序号	最大温度 T_{\max}	温差 ΔT
2.4	3	503.4	137.8
2.8	6	509.7	134.9
3	2	507.6	131.0
3.2	9	516.5	119.8
3.5	5	510.3	124.3
3.6	12	510.9	114.9
4	1	510.0	129.6
4	8	520.2	119.0
4.5	11	503.6	111.0
4.7	4	515.1	165.1
5.3	7	522.2	113.8
6	10	512.3	105.7

在温差方面,从表2可以看出,当螺距比 ≤ 3 时,温差 ΔT 保持在 $(130\sim 140)^{\circ}\text{C}$ 范围内;当 $3 < \text{螺距比} < 4$ 时, ΔT 基本保持在 $(110\sim 130)^{\circ}\text{C}$ 范围内;温差有波动,当螺距比大于4时,温差在 $(100\sim 170)^{\circ}\text{C}$ 范围内变化。随着螺距比的增加,最高温度呈上升趋势。当螺距比过低时,表明传输的热量少,使得铝合金2219焊件各个位置的温差增大,进而影响铝合金2219焊件的力学性能。过高的螺距比意味着材料过热,晶粒出现粗化,使得焊缝厚度方向温差不稳定,导致焊接质量下降。

3.2 焊接工艺参数对显微组织的影响

搅拌摩擦焊接过程的再结晶晶粒尺寸可以表示为^[15]:

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

平均晶粒尺寸 D 为:

$$D = aZ^b \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得:

$$\ln D = \ln a + b \ln\left(\dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,铝合金2219焊件在动态再结晶过程中,热循环温度与晶粒尺寸呈正相关,热循环温度的变化由工艺参数的组合决定。

3.2.1 转速对显微结构的影响

铝合金2219在100mm/min焊接速度时显微组织,如图8所示。可以看出在不同转速下的晶粒尺寸是不相同的,即转速越高,晶粒尺寸就越大。一般来说转速的增加使得原有晶粒的破损加大,从而成核数量增加,使得晶粒的整体体积减小。另一方面由于高转速使得焊件的温度提升,晶粒尺寸将相应的增大。一般来说显微组织的晶粒尺寸取决于上述因素产生的影响更大。从图中可以看出转速的增加,高温停留时间长将使得热循环温度变得更加均匀,即晶粒结构的影响更加显著,从而晶粒的尺寸将变大。同时可以看出随着转速的增大,晶粒尺寸将变得不均匀,粗大的组织和细小的晶粒组织共同存在,这将使得焊接件的力学性能变差。

3.2.2 焊接速度对显微结构的影响

铝合金2219在转速为300r/min时的显微组织,如图9所示。可以看出不同焊接速度影响铝合金2219的显微组织,即提高焊接速度将使得铝合金2219晶粒度变小。这主要是由于焊接速度的增加将减小热量,晶粒生长的速度将变慢,从而使得晶粒尺寸变小。当焊接速度减小时,铝合金2219的晶粒尺寸最大,这主要是铝合金2219内部的温度升高,晶粒将逐渐生长,从而使得晶粒尺寸变大^[16]。

因此可以看出焊接速度是影响铝合金2219内部温度的重要因素,需要设置合理的焊接速度,从而使得铝合金2219具有合适的晶粒尺寸,进而提升铝合金2219的力学性能指标。

3.2.3 螺距比对显微结构的影响

综上所述,不同工艺参数对显微结构的影响主要体现在热输入的变化上。螺距比综合考虑了焊接工艺参数对热输入和温度的影响。

对不同螺距比对NZ的显微形貌的影响进行了分析,如图10所示。可以看出,晶粒尺寸随着螺距比的增大而增大。螺距比为2.4、3.5和4.5时的平均晶粒尺寸分别为 4.8 ± 2.3 、 6.5 ± 2.7 和 8.2 ± 3.4 。螺距比直接影响热输入量,较高的热输入将使得铝合金2219温度升高,这将促进铝合金2219晶粒的长大,但长大的晶粒将变得不均匀,从而影响力学性能。反之螺距比过低将使得温度变低,这将不能促进铝合金2219晶粒的长大,同样影响铝合金2219的力学性能。从图10可以看出对于铝合金2219来说,螺距比在(3~4)之间是合理的。目前晶粒细小致密,形貌均匀,无表面和内部缺陷。

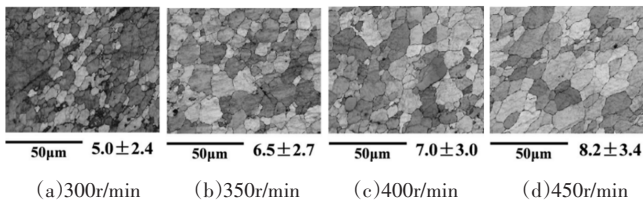


图8 不同转速下NZ的显微结构

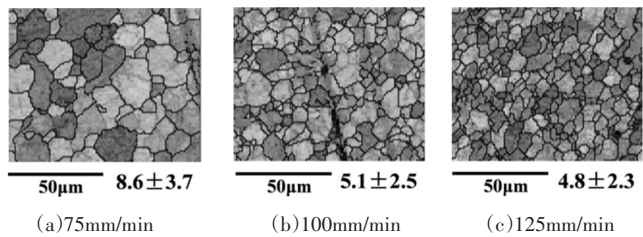


图9 不同焊接速度下显微组织

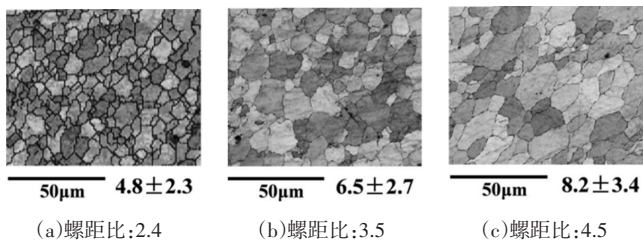


图10 不同螺距比下NZ的显微结构

3.3 焊接工艺参数对力学性能的影响

3.3.1 转速对力学性能的影响

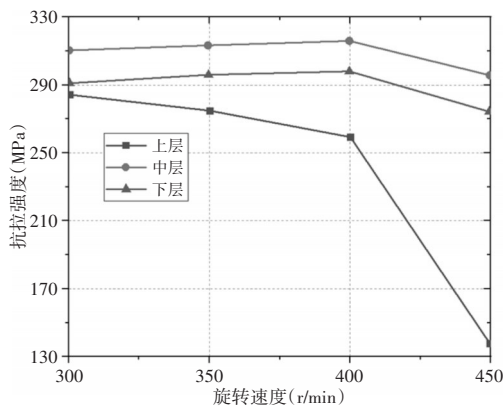


图11 不同转速下铝合金2219的抗拉强度

不同转速下铝合金2219的抗拉强度,如图11所示。可以看出转速增加,铝合金2219的抗拉强度逐渐降低,这主要是由于随着转速的增加,温度逐渐增大,从而使得晶粒生长,粗化的晶粒将使得铝合金2219的力学性能变差。随着转速的达到450r/min时,可以看出温度的升高将使得铝合金2219表面出现缺陷,此时的抗拉强度将变得更低。因此在设置合适的转速将有利于铝合金2219的温度处于合适的位置,从而使得铝合金2219的晶粒尺寸保持在合适的范围,进而提升铝合金2219的抗拉强度指标。

3.3.2 焊接速度对力学性能的影响

旋转速度为300mm/min时,不同焊接速度下不同层的抗拉强度,如图12所示。从图12可以看出,随着焊接速度的增加,不同层的抗拉强度也呈现出明显的差异。焊接速度的增加表明热输入的减少,这将使得铝合金2219的温度降低,上层内部晶粒的长大速度减小。而中下层的铝合金2219的温度将更加低,这使得晶粒不均匀变好,使得铝合金2219的强度增大。因此选择合适的焊接速度将使得热输入量保持在一定的范围,从而减小铝合金2219的机械性能,进而提高整体的力学性能。

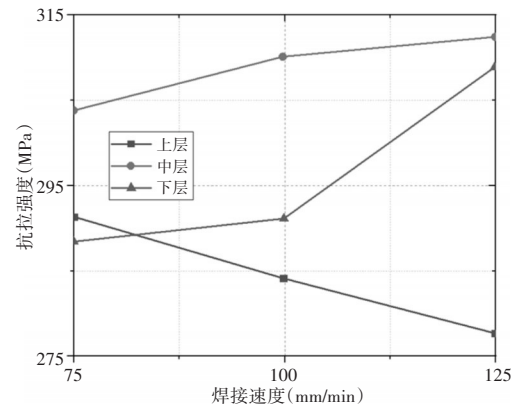


图12 不同焊接速度下铝合金2219的抗拉强度

3.3.3 螺距比对力学性能的影响

不同工艺参数组合下接头中、上、下层的平均抗拉强度,如图13所示。不同螺距比下接头的平均抗拉强度,如表3所示。由表3可知,当螺距比为 ≤ 4 时,抗拉强度 > 290 MPa;当 $2.4 < \text{螺距比} < 3$ 时,抗拉强度略有下降;当螺距比 > 4 时,抗拉强度波动明显,焊件表面容易出现缺陷,严重降低了接头的抗拉强度。

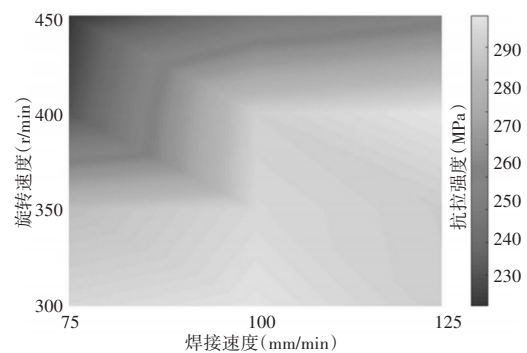


图13 不同工艺参数组合下铝合金2219的抗拉强度

铝合金 2219 的接头力学性能主要取决于温度的影响,而温度的影响将直接取决于不同工艺参数的组合。因此在确定合适的热输入条件下,必须具有一定合适的螺距比。从前述分析可以看出,过多的热输入将使得铝合金 2219 的晶粒长大,再结晶的晶粒使得强化相容易溶解,这将进一步使得铝合金 2219 焊接软化。铝合金 2219 材料的软化使得流动性变好,但容易使得表面出现缺陷,从而影响铝合金 2219 的力学性能。而当热输入量不足时,铝合金 2219 各个位置的温差变大,这将使得焊接质量变差。因此选择合适的工艺参数,使得铝合金 2219 具有合适的热输入,从而改善内部组织晶粒尺寸,有利于提升铝合金 2219 的机械性能。

表3 节点的平均抗拉强度(MPa)
Tab.3 Average Tensile Strength of Nodes(MPa)

螺距比	序号	平均抗拉强度
2.5	3	289.1
2.6	6	287.4
2.9	2	300.3
3.3	9	300.1
3.6	5	289.9
3.7	12	251.2
3.8	1	288.5
4.1	8	289.9
4.6	11	241.2
4.8	4	279.8
5.5	7	220.5
6	10	208.8

4 结论

研究了铝合金 2219 在不同工艺参数条件下的内部组织和力学性能,得出的结论如下:

(1) 铝合金 2219 的内部组织取决于工艺参数的组合,不同的工艺参数影响铝合金 2219 的热输入量,从而影响内部组织的晶粒度尺寸,进而影响铝合金 2219 的力学性能。(2) 在一定范围内,转速的增加将使得铝合金 2219 的温度升高,从而促进了晶粒长大。而焊接速度的增加将不能提升铝合金 2219 的温度,使得晶粒尺寸长大速度变小。(3) 上层抗拉强度随转速的增加而减小,中下层抗拉强度随转速的增加而增大。而且,随着焊接速度的增加,将使得铝合金 2219 的上层抗拉强度逐渐降低。

参考文献

- [1] 陈立国,王江峰,杨国舜,等.搅拌摩擦焊搅拌头研究进展[J].热加工工艺,2023,52(21):1-7.
(Chen Ligu, Wang Jiangfeng, Yang Guoshun, et al. Research progress on friction stir welding stirring head [J]. Heat Processing Technology, 2023, 52(21): 1-7.)
- [2] 屈力刚,荆麒麟,李铭,等.面向航空发动机减重的铝合金管强化机理研究[J].航空制造技术,2021,64(5):14-23.
(Qu Ligang, Jing Qiyu, Li Ming, et al. Research on the strengthening mechanism of aluminum alloy tube for aircraft engine weight reduction [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 14-23.)
- [3] 计鹏飞,张振,赵光辉,等.搅拌摩擦焊搅拌头的研究进展[J].宇航材料工艺,2020,50(3):11-16.

- (Ji Pengfei, Zhang Zhen, Zhao Guanghui, et al. Research progress on friction stir welding stir heads [J]. Aerospace Materials Technology, 2020, 50(3): 11-16.)
- [4] Andrade, D.G.Leitao, C.Dialami, N.Chiumenti, M.Rodrigues, D.M.Analysis of contact conditions and its influence on strain rate and temperature in friction stir welding [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 191(1): 154-162.
- [5] 张超,周猛兵,陶欣,等.Zr-Sn-Nb-Cr-Fe 铝合金搅拌摩擦焊工艺及焊缝组织和性能[J].焊接学报,2024,45(1):103-108+135.
(Zhang Chao, Zhou Mengbing, Tao Xin, et al. Zr Sn Nb Cr Fe zirconium alloy friction stir welding process, weld microstructure and properties [J]. Journal of Welding, 2024, 45(1): 103-108+135.)
- [6] 沈小琨,赵一帆,万葛,等.Zn 中间层对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(12):1647-1653.
(Shen Xiaokun, Zhao Yifan, Wan Ge, et al. The effect of Zn intermediate layer on the microstructure and properties of magnesium/steel friction stir lap welding [J]. Special Casting and Nonferrous Alloy, 2023, 43(12): 1647-1653.)
- [7] 王钟德,王瑞杰,刘国寿,等.7075/2A12 异种铝合金搅拌摩擦焊搭接接头疲劳寿命预测研究[J].现代制造工程,2023(10):135-144.
(Wang Zhongde, Wang Ruijie, Liu Guoshou, et al. Study on fatigue life prediction of dissimilar aluminum alloy friction stir welded lap joints [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(10): 135-144.)
- [8] 江小辉,姚梦灿,张翼,等.大厚度铝合金搅拌摩擦焊接的仿真与实验研究[J].制造技术与机床,2023(8):133-140.
(Jiang Xiaohui, Yao Mengcan, Zhang Yi, et al. Simulation and experimental research on friction stir welding of thick aluminum alloy [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2023(8): 133-140.)
- [9] 李铁龙,许宝卉,王付杰.AZ31B 镁合金连续铸板材双道搅拌摩擦搭接焊的力学性能[J].热加工工艺,2023,52(11):59-62.
(Li Tielong, Xu Baohui, Wang Fujie. Mechanical properties of AZ31B magnesium alloy continuous casting plate with dual pass friction stir lap welding [J]. Hot working Process, 2023, 52(11): 59-62.)
- [10] 文梦蝶,陈苗苗,陈素,等.异厚异质铝合金超薄板激光焊接工艺试验研究[J].机械设计与制造,2023(8):76-79.
(Wen Mengdie, Chen Miaomiao, Chen Su, et al. Experimental study on laser welding process of ultra-thin aluminum alloy plates with different thicknesses [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023(8): 76-79.)
- [11] 褚强,杨夏炜,李文亚,等.铝锂合金无针搅拌摩擦点焊接头组织演变与强化机制研究[J].机械工程学报,2024,60(2):150-158.
(Chu Qiang, Yang Xiawei, Li Wenya, et al. Study on the microstructure evolution and strengthening mechanism of aluminum lithium alloy needle less friction stir welding joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(2): 150-158.)
- [12] 张兵宪,陈聪,刘丰刚,等.7050-T7451 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和性能[J].材料导报,2023,37(24):191-195.
(Zhang Bingxian, Chen Cong, Liu Fenggang, et al. Structure and properties of 7050-T7451 aluminum alloy friction stir welded joints [J]. Materials Review, 2023, 37(24): 191-195.)

在可靠性评估中,轴承的失效率也是重要的评估指标之一,因此,由特征参数估计值 $\beta_0=1.1692$, $\eta_0=191.1534$,根据式(2),得到风电主轴承失效率 λ 随寿命变化曲线,如图9所示。由图8、图9可知,风电主轴承寿命可靠度随寿命增加呈下降趋势,失效率随寿命增加呈上升趋势,固定端轴承90%可靠度上限寿命为30.59年,90%可靠度下限寿命为25.45年,符合GL规范规定的风电主轴承90%可靠度的使用寿命为20年的标准,且主轴承寿命可靠度变化规律符合滚动轴承疲劳寿命随时间增加逐渐衰退的变化趋势。

5 结论

针对风电主轴承寿命可靠性评估中零寿命试验数据问题,研究了一种基于计算机模拟仿真和Weibull图估计法的风电主轴承寿命可靠性评估方法,结论如下:(1)基于统计学分析法和Bootstrap自助法,将估计的Weibull分布形状参数 β 和尺度参数 η 与计算机模拟仿真的假设值对比,计算得两参数差值分别为4、0.298和3.911、0.421%,误差均在合理的范围内。(2)根据Weibull参数估计值及置信区间,得到了固定端轴承的可靠度函数曲线、失效率函数曲线和平均寿命,其90%可靠度上限寿命为30.59年,90%可靠度下限寿命为25.45年,符合GL规范值。(3)轴承寿命可靠性指标随寿命变化趋势符合实际变化规律,该方法可用于在较难获甚至无法获得轴承寿命试验数据时,仅有风场载荷数据的风电主轴承疲劳寿命可靠性评估,且利用该方法可高效率地评估风电主轴承的疲劳寿命可靠性。

参考文献

[1] Guo H T, Watson S, Tavner P J, et al. Reliability analysis for wind turbines with incomplete failure data collected from after the date of initial installation[J]. Reliability Engineering System Safety, 2009(94): 1057-1063.
[2] 楼洪梁,陈磊,李兴林,等.基于虚拟信息的滚动轴承可靠性估计[J].轴承,2015(11):28-31.
(Lou Hongliang, Chen Lei, Li Xinglin, et al. Reliability estimation for rolling bearings based on virtual information[J]. Bearing, 2015(11): 28-31.)
[3] 但召江,楼洪梁,李兴林,等.无失效数据下滚动轴承的可靠性估计[J].轴承,2013(9):22-24.
(Dan Zhaojiang, Lou Hongliang, Li Xinglin, et al. Reliability estimation for rolling bearings based on zero-failure data[J]. Bearing, 2013(9): 22-

24.)
[4] Zhang C. Weibull parameter estimation and reliability analysis with zero-failure data from high-quality products [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020(207): 107321.
[5] Li J, Zhang X, Zhou X, et al. Reliability assessment of wind turbine bearing based on the degradation-hidden-markov model [J]. Renewable Energy, 2018(132).
[6] Reuben L, Mba D. Estimating bearing lower bound reliability without past failures [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2013(227): 199-206.
[7] Lu Y, Zheng H, Zeng J, et al. Fatigue life reliability evaluation in a high-speed train bogie frame using accelerated life and numerical test [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019(188).
[8] Ling D, Huang H, Wang S, et al. A Method for Multiaxial Fatigue Reliability Analysis Based on Mixed Weibull Distribution: ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2013[C]. 2013.
[9] Harris T A, Kotzalas M N. 滚动轴承分析(第五版):轴承技术的高等概念[M]. 罗天宇,罗继伟,马伟,等,译.北京,机械工业出版社,2009: 259-261.
(Harris T A, Kotzalas M N. Rolling Bearing Analysis FIFTH EDITION: Advanced Concepts of Bearing Technology [M]. Luo Tianyu, Luo Jiwei, Ma Wei, et al. Translation. Beijing, China Machine Press, 2009: 259-261.)
[10] Harris T A, Kotzalas M N. 滚动轴承分析(第五版):轴承技术的基本概念[M]. 罗天宇,罗继伟,马伟,等,译.北京,机械工业出版社,2009: 208-209.
(Harris T A, Kotzalas M N. Rolling Bearing Analysis FIFTH EDITION: Essential Concepts of Bearing Technology [M]. Luo Tianyu, Luo Jiwei, Ma Wei, et al. Translation. Beijing, China Machine Press, 2009: 208-209.)
[11] International Organization for Standardization. ISO 281: 2007(E), Rolling Bearings-dynamic Load Ratings and Rating Life[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2007: 10-35.
[12] 肖文,王忠强,裴世源,等.大兆瓦风电主轴双列圆锥滚子轴承的承载接触机理[J].机械设计与制造,2021(6):90-94.
(Xiao Wen, Wang Zhongqiang, Pei Shiyuan, et al. Contact mechanism of double-row tapered roller bearings of main shaft of wind turbine under loading condition [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6): 90-94.)
[13] 夏新涛,叶亮,李云飞,等.基于多层自助最大熵法的可靠性评估[J].兵工学报,2016,37(7):1317-1329.
(Xia Xintao, Ye Liang, Li Yunfei, et al. Reliability evaluation based on hierarchical bootstrap maximum entropy method [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1317-1329.)

(上接第38页)

[13] 杨景卫,李涛,李政,等.焊接速度对2205不锈钢激光焊接热循环及组织的影响[J].应用激光,2024,44(2):52-58.
(Yang Jingwei, Li Tao, Li Zheng, et al. The effect of welding speed on the thermal cycle and microstructure of 2205 stainless steel laser welding [J]. Applied Laser, 2024, 44(2): 52-58.)
[14] Salih O S, Neate N, Ou H, et al. Influence of process parameters on the microstructural evolution and mechanical characterisations of friction stir welded Al-Mg-Si alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020.
[15] 夏洪均,唐全波,王敬,等.7050铝合金修正本构模型及Zener-Hollomon

参数演化[J].塑性工程学报,2022,29(6):149-156.
(Xia Hongjun, Tang Quanbo, Wang Jing, et al. Revised constitutive model and Zener Hollomon parameter evolution of 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Plastic Engineering, 2022, 29(6): 149-156.)
[16] 陈大江,张大斌,曹阳,等.激光焊接7A52铝合金变厚板显微缺陷研究[J].组合机床与自动化加工技术,2022(6):54-57+61.
(Chen Dajiang, Zhang Dabin, Cao Yang, et al. Study on microscopic defects in laser welding of 7A52 aluminum alloy thickened plate [J]. Combined Machine Tool and Automation Processing Technology, 2022(6): 54-57+61.)