

2219 铝合金 TIG 焊缝激光冲击强化 与腐蚀性能研究

郝楠^{1a}, 王焕春^{1a,2*}, 黄丹^{1b}, 马岚^{1b}, 曹宇浩^{1a}, 慕晓刚^{1a,2}, 王煊军^{1a,2}

(1. 火箭军工程大学 a. 智剑实验室 b. 导弹工程学院, 西安 710025;

2. 陕西省特种能源化学与材料重点实验室, 西安 710025)

摘要: **目的** 改善 2219 铝合金钨极氩弧焊缝的耐腐蚀性能。**方法** 采用激光冲击技术对焊缝进行强化处理, 比较分析处理前后的表面残余应力、物相组成和元素状态, 通过静态浸泡失重法和电化学试验测量腐蚀速率的变化。**结果** 经过激光冲击强化处理后, 2219 铝合金焊缝部位的元素状态没有改变, 但焊缝区域的残余拉应力变为残余压应力。2219 铝合金钨极氩弧焊接区域的自腐蚀电位明显下降, 相比未经激光冲击处理的试件, 焊核区和焊接过渡区的平均腐蚀电流分别减小了 14% 和 12.7%, 腐蚀速率分别减小了 16.9% 和 12.9%。**结论** 激光冲击强化可以有效提升 2219 铝合金钨极氩弧焊缝区域的耐腐蚀性能, 可以为提升特种装备安全性和轻量化提供技术参考。

关键词: 激光冲击; 2219 铝合金; 钨极氩弧焊; 腐蚀; 电化学测试; 推进剂

中图分类号: TQ 050.4+1; TG 172.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0035-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.005

Effect of Laser Shock Strengthening on the Corrosion Properties of 2219 Aluminum Alloy in the Propellant of Tungsten Inter-gas Arc Welding

HAO Nan^{1a}, WANG Huanchun^{1a,2*}, HUANG Dan^{1b}, MA Lan^{1b}, CAO Yuhao^{1a}, MU Xiaogang^{1a,2}, WANG Xuanjun^{1a,2}

(1. a. Zhijian Laboratory, b. School of Missile Engineering, Rocket Army Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Special Energy Chemistry and Materials, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the corrosion resistance of 2219 aluminum alloy TIG weld. Laser shock technology was used to strengthen the weld, and the surface residual stress, phase composition and element state before and after treatment were compared and analyzed. At the same time, the change of corrosion rate was measured by static immersion weight loss and electrochemical methods. The element state of the 2219 aluminum alloy weld did not change after laser shock strengthening, but the residual tensile stress in the weld became the residual compressive stress. The self-corrosion potential in the TIG welding zone of 2219 aluminum alloy decreased obviously. Compared with the specimens without laser shock treatment, the average corrosion current in the core zone and transition zone was reduced by 14% and 12.7%, and the corrosion rate was reduced by 16.9% and 12.9%, respectively. Therefore, laser shock strengthening treatment can significantly improve the corrosion resistance

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2023-12-05

Received: 2023-08-28; Revised: 2023-12-05

引文格式: 郝楠, 王焕春, 黄丹, 等. 2219 铝合金 TIG 焊缝激光冲击强化与腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 35-43.

HAO Nan, WANG Huanchun, HUANG Dan, et al. Effect of Laser Shock Strengthening on the Corrosion Properties of 2219 Aluminum Alloy in the Propellant of Tungsten Inter-gas Arc Welding[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 35-43.

*通信作者 (Corresponding author)

of 2219 aluminum alloy TIG weld, which provides technical reference for improving the safety and lightweight of special equipment.

KEY WORDS: laser shock; 2219 aluminum alloy; tungsten inter-gas arc welding; corrosion; electrochemical test; propellant

2219 铝合金作为成熟的第二代液体推进剂贮箱材料,具有良好的焊接性能和较高的断裂韧性,以及优异的抗应力腐蚀开裂能力和与四氧化二氮、偏二甲肼等推进剂一级相容的材料性能,常用于航天火箭氧化剂槽与燃料槽贮箱的制造,在超音速飞机蒙皮以及结构零件材料等方面也有广泛应用^[1-3]。在贮箱加工过程中,焊接是最常用的连接方法。惰性气体钨极氩弧焊(Tungsten Inter-Gas Arce Welding, TIG)^[4-6]是目前广泛采用的铝合金焊接方式,主要用于大曲率箱底、阀门、管路连接处等异型结构中的焊接。它是一种以钨棒和焊件为电极,用惰性气体保护两电极之间的电弧、熔池及母材热影响区而实现电弧焊接作业的一种方法。其优点是焊缝成形良好、钨极电弧稳定、设备简单、价格便宜。由于推进剂尤其是氧化剂的强烈腐蚀作用,2219 铝合金在与推进剂长期接触的过程中,仍然会存在腐蚀,尤其在焊缝、管道连接等部位,由于存在焊接产生的残余应力,腐蚀程度尤为严重^[7]。对焊接头进行焊后处理^[8],有利于提高铝合金钨极氩弧焊接接头的抗腐蚀性,提升贮箱的耐腐蚀性能和长期服役安全性。激光冲击技术^[9-12](Laser Shock Peening, LSP)利用高功率激光束冲击金属零件表面,使金属表面吸收层吸收激光的能量瞬间转化为等离子体,并产生高压冲击波作用于材料表面,通过高压作用下晶体结构的细微变化,调制材料表层应力分布,是一项能够改善金属材料表面性能的新技术。激光冲击强化不仅可以在材料表面引入超过 1 mm 的残余压应力层,而且可以通过各种工艺参数(如激光脉冲能量、光斑搭接率等)的精确调节设定,实现对材料性能指标的精确控制,达到有效改善材料抗疲劳、耐磨损和防应力腐蚀等性能的目的。

激光冲击强化已应用于石油化工、船舶、核电和航空航天等领域,被美国空军采纳为航空发动机叶盘修复和寿命挖潜的正式技术方法^[13-15]。张浩等^[16]采用电化学试验,并结合扫描电子显微镜方法,对激光冲击强化后的压力容器材料 Q345R 钢的耐腐蚀性能和抗疲劳性能进行了研究。结果显示,有吸收层保护和无吸收层保护激光冲击后,相较于原试样,耐腐蚀性分别提升 5.8、2.6 倍。李薇等^[17]针对聚焦型太阳能热发电换热管材料在熔融铝硅环境中易发生腐蚀疲劳失效的问题,采用粉末包埋渗铝和激光冲击对 AISI321 不锈钢进行了表面改性,研究了其在熔融铝硅环境下的腐蚀疲劳性能。结果表明,经不同功率密度的激光冲击强化处理后,渗铝钢的表面硬度显著提高,延缓了疲劳裂纹萌生,提升了耐蚀性,降低了腐

蚀损伤的影响,疲劳损伤占据主导地位,使得渗铝钢腐蚀疲劳寿命提高 100%~200%。虽然已有很多研究表明,激光冲击能够提升金属在大气及水等介质中的耐腐蚀性能,但由于推进剂物理化学性质的特殊性,以及应用领域的限制^[18],激光冲击强化对于抑制推进剂介质中铝合金材料腐蚀的有效性和作用机理还未得到实验验证。本文针对 LSP 冲击下 2219 铝合金的腐蚀行为进行了研究,对比分析了激光冲击前后钨极氩弧焊接区域抗腐蚀能力的变化,揭示激光冲击对 2219 铝合金焊接区域抗腐蚀性能的影响机理,为 LSP 技术在提升推进剂相关材料领域的耐腐蚀性能提供理论依据。

1 试验

试验采用厚度为 5 mm 未经钝化处理的 2219 铝合金板材,材料状态为 C10S。其主要化学成分见表 1。

表 1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of base material and welding wire(mass fraction,%)

材料	Cu	Ti	Si	Fe	Mn	Zr	Mg	Al
母材	6.38	0.064	0.084	0.18	0.32	0.18	—	余量
焊丝	6.21	0.11	0.08	0.15	0.31	0.12	0.01	余量

1.1 钨极氩弧焊

以 2 块厚度为 5 mm 的试片进行平板对接焊,以获得钨极氩弧焊焊缝。焊前使用汽油擦拭焊接工具和待焊接区域,清除油污,并对待焊板进行抛光和刮削清理。焊丝采用进口 ER 2319,保护气为高纯氩气和氮气。焊接完成后,剔除焊缝两边的飞边,用机械打磨方法对焊缝进行打磨圆滑处理,并对焊缝背面进行打磨处理,打磨深度为(0.12~0.20)mm。焊接参数详见表 2。

表 2 2219 铝合金钨极氩弧焊试验参数

Tab.2 Experimental parameters of tungsten inter-gas arc welding of 2219 aluminum alloy

平均焊接电流/A	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	热源间距/mm	交流频率/Hz
60	0.8	4	50~60

1.2 激光冲击强化

激光冲击强化采用西安天瑞光电技术股份有限公司固定式 LSP 成套设备完成,设备型号为 YD60-

R200B。冲击条件: 脉冲能量为 5 J, 波长为 1 064 nm, 脉冲宽度为 20 ns, 光斑直径为 3 mm, 搭接率为 50% (意味着每个部位冲击 2 次), 覆盖率为 200%, 约束层为水, 厚度为 0.3 mm, 吸收保护层为黑胶带。根据试验板材的几何尺寸规划冲击路径, 设备自动完成对焊缝及周围区域的冲击处理。

1.3 残余应力及材料表征

焊缝及周围区域的残余应力测试在国家钢铁材料测试中心(国家钢铁产品质量监督检测中心)进行。采用 X 射线衍射法, 按照 GB/T 7704—2017 进行测试。测试条件: 靶材为 Cr, 管电压为 30 kV, 管电流为 6.7 mA, 采用侧倾法测试, ψ 角范围 $-45^{\circ}\sim+45^{\circ}$ 。 2θ 角范围 $0^{\circ}\sim139^{\circ}$, 光斑直径为 3 mm, 曝光时间为 10 s, 摇摆角为 3° 。残余应力测试过程: 垂直于焊缝方向, 分别位于距焊缝中心两侧 10、20、30、40、50、60 mm 位置处, 每 10 mm 长度测试一个点, 共计 13 个点。在探测确定衍射峰位置后, 以最小二乘法确定 $2\theta\text{-}\sin\psi$ 的斜率。

物相分析采用 X 射线衍射进行, 测试在布鲁克 X 射线衍射仪 (Bruker, D8 Advance) 上完成, 使用 Cu 靶, 特征波长为 0.154 18 nm, 扫描速度为 $4 (^{\circ})/\text{min}$ 。采用 X 射线光电子能谱 (Thermo Fisher Scientific Escalab 250 Xi) 对激光冲击强化前后钨极氩弧焊焊缝表面的元素化学态进行分析。

1.4 电化学腐蚀测试

采用焊缝区域的试片 (尺寸为 20 mm \times 40 mm) 作为工作电极, 饱和甘汞电极作为参比电极, 铂片电极作为辅助电极, 构建了一个电解池, 使用绝缘硅胶磨具 (尺寸为 1.5 cm \times 1.5 cm \times 1 cm) 容纳推进剂介质。电解池的模具上表面采用了封闭结构, 工作电极在电解池底部, 保证推进剂与金属有效接触。具体部件如图 1 所示。采用辰华 CHI660E 电化学工作站在 N_2O_4 溶液中对 2219 铝合金钨极氩弧焊试片进行动电位扫描测试, 以获取反映其腐蚀速率的塔菲尔曲线。电化学试验过程中, 测量电压范围为 $-350\sim+350$ mV (vs. Hg/HgCl), 扫描速度为 0.33 mV/s。

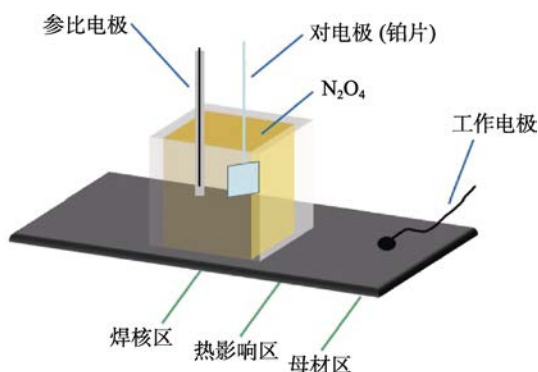


图 1 焊缝区电化学测试

Fig.1 Electrochemical test in weld zone

1.5 静态质量损失与腐蚀速率测试

已有试验均表明, 与推进剂一级相容的金属材料, 在有限试验时间内的腐蚀质量损失较为微弱。为了直观比较激光冲击强化对试件腐蚀性能的影响, 采用 30% (体积分数) HNO_3 作为代介质。该介质中金属材料的腐蚀速度最明显。浸泡试件大小为 20 mm \times 40 mm \times 40 mm, 焊缝位于试件中间位置, 依次使用 600 $\#$ 、800 $\#$ 、1200 $\#$ 砂纸去除边缘毛刺, 然后依次用丙酮、乙醇和蒸馏水清洗, 最后烘干备用。将试件竖直放入带有聚四氟乙烯内衬的反应釜中, 加入 30% HNO_3 至淹没试片, 密封反应釜, 在室温状态下保存。间隔一定时间取出试片, 使用高压氮气吹扫、清洗、干燥、称量。试验采用 3 个试样, 结果取平均值。测试试验样品编号见表 3。

表 3 样品编号与测试
Tab.3 Specimen number and test

样品编号	样品状态	测试
1	冲击处理	超声波探伤+X 射线应力分析
2	冲击处理	超声波探伤+X 射线衍射分析+X 射线光电子能谱分析
3	冲击处理	超声波探伤+X 射线应力分析
4~6	冲击处理	腐蚀质量损失
7~9	冲击处理	电化学分析
10~12	未冲击处理	腐蚀质量损失
13~15	未冲击处理	电化学分析

2 结果与分析

2.1 无损探伤与残余应力分布分析

考虑到钨极氩弧焊在焊接过程中受操作因素的影响较大, 容易在焊接过程中形成缺陷, 导致应力分布的不一致, 进而影响腐蚀性能。试验选取 3 个不同的焊缝样品进行超声波无损探伤, 检测是否存在微裂纹、空洞或其他夹杂缺陷。结果如图 2 所示。

检测表明, 试验所选用的焊接样品, 在采用 1.1 节的焊接工艺条件下, 获得了较为均一的 TIG 焊缝。3 个焊缝样品在超声波分析中回波均匀, 未发现焊缝内部声阻抗不一致的交接面, 说明探测区域没有空洞或者微裂纹等缺陷。

用 X 射线衍射分析测试焊缝周围的应力分布。为避免 X 射线光斑相互干扰, 测试点间距为 1 cm, 测试区域为焊缝中心线两侧各 6 cm 范围内。试验测试了 2 个经过超声波无损探伤焊缝样品的应力分布, 测试结果如图 3 所示。

激光冲击强化前, 焊缝周围的残余应力最大达到 46 MPa, 应力分布总宽度约 11 cm, 焊缝周围区域均表现为拉应力, 即在焊缝中心线两侧有明显的残余拉应力存在。尽管不同焊缝样品的残余应力分布略有差

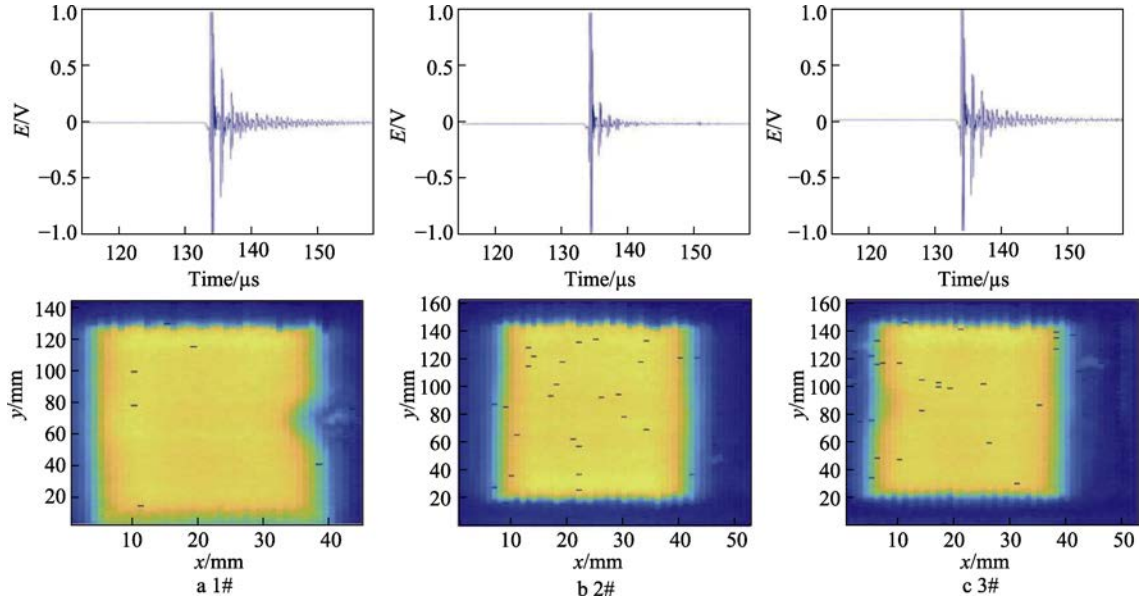


图2 TIG焊缝无损超声探伤分析

Fig.2 Nondestructive ultrasonic inspection analysis of TIG weld

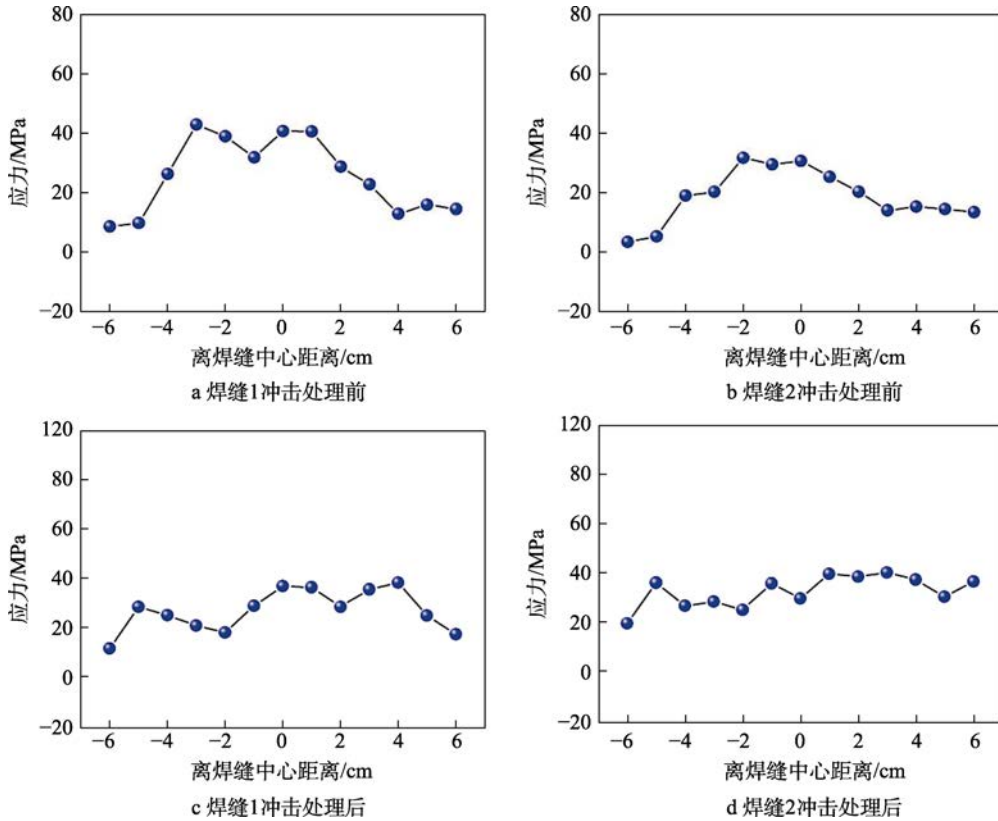


图3 TIG焊缝冲击强化前后周围应力分布

Fig.3 Stress distribution around TIG weld before and after shock strengthening: a) weld 1 before shock treatment; b) weld 2 before shock treatment; c) weld 1 after shock treatment; d) weld 2 after shock treatment

异，但焊缝周围大部分区域的残余拉应力大于10 MPa (图 3a、b)。在特定介质中，残余拉伸应力的存在，是导致应力腐蚀开裂的重要因素。分析表明，尽管 TIG 能获得没有明显缺陷的焊缝，但由于焊接过程中高温作用会引起金属材料的体积变化，在焊缝区域造成明显的残余拉应力。这也是焊接部位成为金属

结构中极易被腐蚀的位置，从而导致失效的重要因素。这类未经处理的焊缝在推进剂容器中易造成金属腐蚀，引起推进剂介质中金属离子含量增加、颗粒物增加、流速系数增大，也是发生推进剂跑冒滴漏等安全隐患的主要原因。

激光冲击强化处理明显降低了焊缝及周边区域

的残余应力(图 3c、d)。通过 X 射线衍射分析发现, 激光冲击强化后, 材料的整体应力基本由残余拉应力调制为残余压应力, 使焊缝及周围的残余应力整体下降 40~60 MPa, 同时抑制了焊缝中的应力峰值。一般认为, 应力集中现象的弱化, 有利于推迟失效过程中应力腐蚀裂纹的形成, 提高应力腐蚀的门槛应力强度因子^[19], 从而有效抑制应力腐蚀断裂的发生。可以认为, 应力分布的均一化和拉应力向压应力的转变, 对于提高 2219 铝合金在推进剂介质中的耐腐蚀性能有利。

2.2 X 射线衍射分析 (XRD)

采用 X 射线衍射对焊缝及周围区域物相进行分析, 结果如图 4 所示。2219 铝合金中主要组成相为 α (Al)、 θ (Al_2Cu)、T ($\text{CuMn}_2\text{Al}_{12}$) 以及亚稳定态的沉淀强化相 θ'' (Al_2Cu) 和半共格状态的 θ' (Al_2Cu)。由于强化相 θ'' 与 θ' 的含量较低, 在 X 射线衍射中检测不出来。Mn 的质量分数不超过 0.36%, 也低于 XRD 的检测限。因此, 在 XRD 图谱中主要为 α (Al)、 θ (Al_2Cu) 的衍射峰。

钨极氩弧焊试件母材区 (BM) 的 XRD 衍射图谱如图 4a 所示, 在 38.46° 、 44.76° 有强烈的衍射峰, 在 65.18° 、 78.32° 也有明显的衍射峰, 均可对应金属铝的 XRD 衍射峰。同时可以发现, 母材区 44.76° 衍射峰较强, 说明经过轧制的母材表面存在较为明显的织构, 可以认为原材料轧制板材是较为均一的合金材料。

经过焊接后, 在焊缝区出现了明显的差异。根据铝合金相图和已有文献分析^[20], 可以认为在焊接过程中 Al 与 Cu 等金属会形成金属间化合物, 从而改变焊缝区的组织组成, 影响焊缝区的耐腐蚀性能。尤其是在焊核区 (NZ), 42.58° 和 47.78° 有明显的 θ (Al_2Cu) 相衍射峰, 表明在焊接过程中有一定量的 Al_2Cu 生成。由于 Cu 的富集会致区域腐蚀电位升高, 是在局部形成腐蚀微电池的主要原因。同时, 由于 θ 相与 Al 基体完全不共格, 没有一个匹配很好的界面, 会对材料的力学性能产生不利影响, 也是焊缝力学性能下降的主要原因。因此, 强化相的形成是导致焊缝耐腐蚀性能下降的诱因之一。经过焊接过程中高温的作用, 轧制板材表面织构被破坏, 44.76° 衍射峰的相对强度减弱, 38.46° 衍射峰的相对强度增加。

热影响区 (HAZ) 的 X 射线衍射峰与母材区基本一致。经过激光冲击强化处理后的 XRD 结果表明, 热影响区的晶体结构没有受到冲击强化的影响, 44.76° 衍射峰的相对强度增加, 表明织构更加明显, 而焊核区中 θ 相衍射峰明显减弱。晶体衍射峰强度减弱的原因可能是, 该物质相对含量的减少, 或者是由于结晶度减小、晶粒细化等。在激光冲击强化中, 由于其作用时间短、热效应非常弱, 因此发生 θ 相回溶现象的可能性非常小。激光冲击会导致表面晶粒减小。江苏大学研究团队在激光冲击的

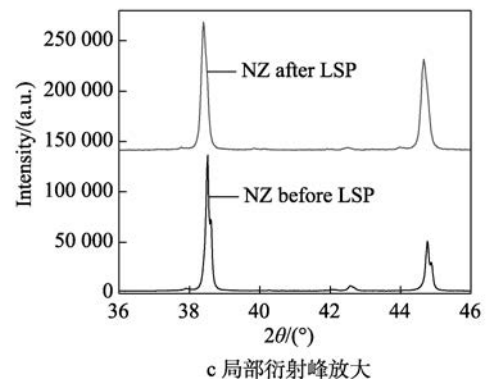
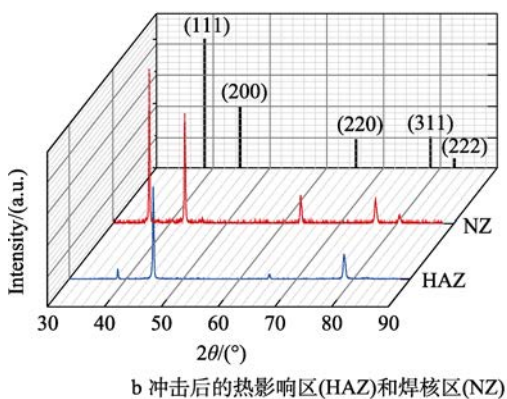
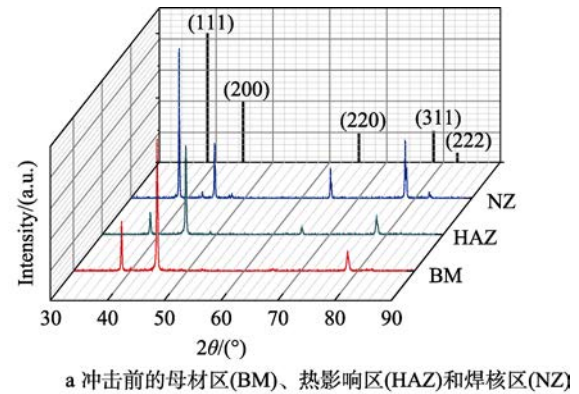


图 4 TIG 焊缝冲击前 XRD 测试结果

Fig.4 XRD test results of TIG weld before shock: a) base material zone (BM), heat affected zone (HAZ) and weld core zone (NZ) before shock; b) heat affected zone (HAZ) and weld core zone (NZ) after shock; c) local diffraction peak amplification

ANSI304 不锈钢中观察到了明显的晶粒细化, 并认为由于表面孪晶在冲击作用下发生取向差结构演变, 从而形成了更为细化的表面晶粒^[21]。从 $36^\circ\sim 46^\circ$ 衍射峰的峰宽比较, 经过激光冲击强化后, 衍射峰变宽, 说明 2219 铝合金表面 α 相和 θ 相均发生晶粒细化, 与文献报道一致, 而衍射强度的下降, 也是晶粒细化的结果。

2.3 表面元素态分析

采用 X 射线光电子能谱对焊缝区域表面元素状态进行分析。由于 X 射线光电子能谱以 X 射线作为激发光线, 其光斑直径约 1 mm, 无法精细区分焊缝区域的

表面结构,而XPS能够对表面元素分别进行比较分析,测试区域选取焊缝中心位置。XPS测试结果(如图5所示)表明,激光冲击对2219铝合金焊缝区域材料表面元素的化学状态没有明显影响。其中,Cu和Al以单质元素状态存在,并没有出现氧化态化学位移,说

明在激光冲击强化过程中,没有引起表面元素的氧化反应而形成氧化层。通过X射线衍射发现, θ 相衍射峰的衍射强度降低,由于元素化学状态和原子比没有发生明显变化,因此可以认为是由于激光冲击使得表面晶体细化而导致的衍射峰宽化。

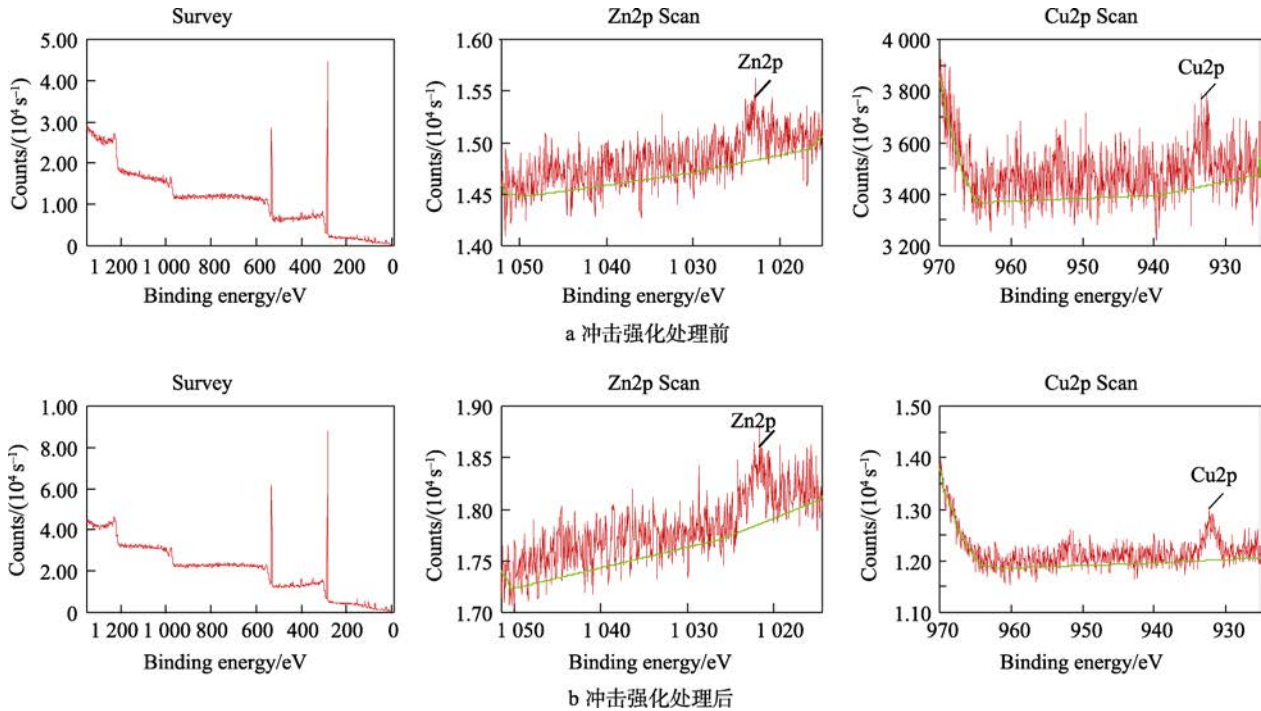


图5 冲击强化处理前后钨极氩弧焊缝区域的X射线光电子能谱图

Fig.5 X-ray photoelectron spectra of the weld zone of tungsten inter-gas arc welding:a) before shock strengthening treatment; b) after shock strengthening treatment

2.4 静态质量损失与试验腐蚀速率分析

静态失重法^[23]是简单且可靠地确定腐蚀速率的方法,可用于测量整个腐蚀期间的平均腐蚀速率,如式(1)所示。

$$v = \frac{K \times \Delta m}{S \times T \times D} \quad (1)$$

式中: v 为腐蚀速率,mm/a; Δm 为试验前后的质量变化,g; S 为试样的表面积, cm^2 ; T 为试验时间,h; D 为材料的密度, g/cm^3 ; K 为换算系数,当试验时间以小时为单位时, K 为 8.76×10^4 ,以天为单位时, K 为3 650。

2219铝合金已用于火箭推进剂容器制造^[23],说明2219铝合金与 N_2O_4 的相容性非常优异,在 N_2O_4 中进行浸泡试验往往难以在较短的时间内获得可靠的试验结果。已有研究表明^[24-25],30% HNO_3 水溶液对LD10铝合金的腐蚀速度更快,并且基本代表了铝合金的腐蚀规律,因此本课题使用30% HNO_3 水溶液开展静态浸泡试验。试件尺寸为 $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,焊缝位于试件中间位置。试件先用1200号砂纸去除边缘毛刺,然后依次用丙酮、乙醇和蒸馏水清洗,烘干备用。将试件竖直放入带有聚四氟乙烯内衬的反应

釜中,加入30% HNO_3 至淹没试片,密封反应釜,在室温状态下(25 ± 3) $^\circ\text{C}$ 保存。间隔一定时间取出试片,使用高压氮气吹扫,清洗,干燥,称量后,放入反应釜继续浸泡。将试片浸泡后的质量损失换算为平均年腐蚀速率,结果如图6所示。

从图6中可以看出,在硝酸溶液中,2219铝合金的质量损失明显。其原因既有母材本身腐蚀产生的质量损失,也有焊缝部位腐蚀引起的质量损失。通过对比冲击强化和未冲击强化试件,发现经过激光冲击强化后,试件腐蚀质量损失的速率明显降低。由于激光冲击强化主要是对焊缝区域进行了处理,对母材部分的耐腐蚀性能基本没有影响,因此可以认为冲击强化后试件整体质量损失速率的降低,是由于焊缝部位腐蚀得到了有效抑制。XPS分析已经说明激光冲击强化对焊缝表面金属元素化学状态没有明显影响,仅仅只是改变了焊缝区域残余应力,因此表明激光冲击强化能通过调制残余应力有效提高焊缝部位耐腐蚀性能。

从样品的外观形貌和金相分析比较,冲击后表面晶粒有细化趋势,并且由于表面层受到冲击作用后发生了塑性变形,有部分肉眼可见的不平整(如图7所示)。这一结果与XRD分析结构相符,与文献报道的规律一致。

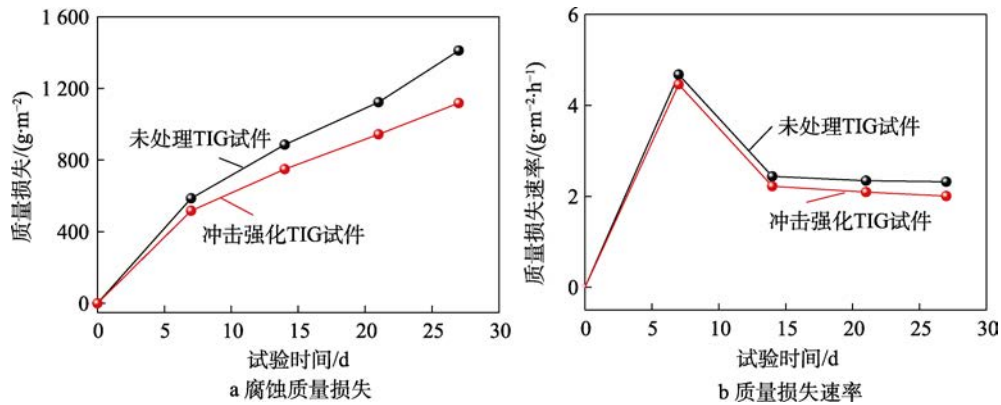


图 6 TIG 试件腐蚀质量损失数据

Fig.6 Corrosion weight loss data of TIG specimen: a) corrosion weight loss; b) weight loss rate

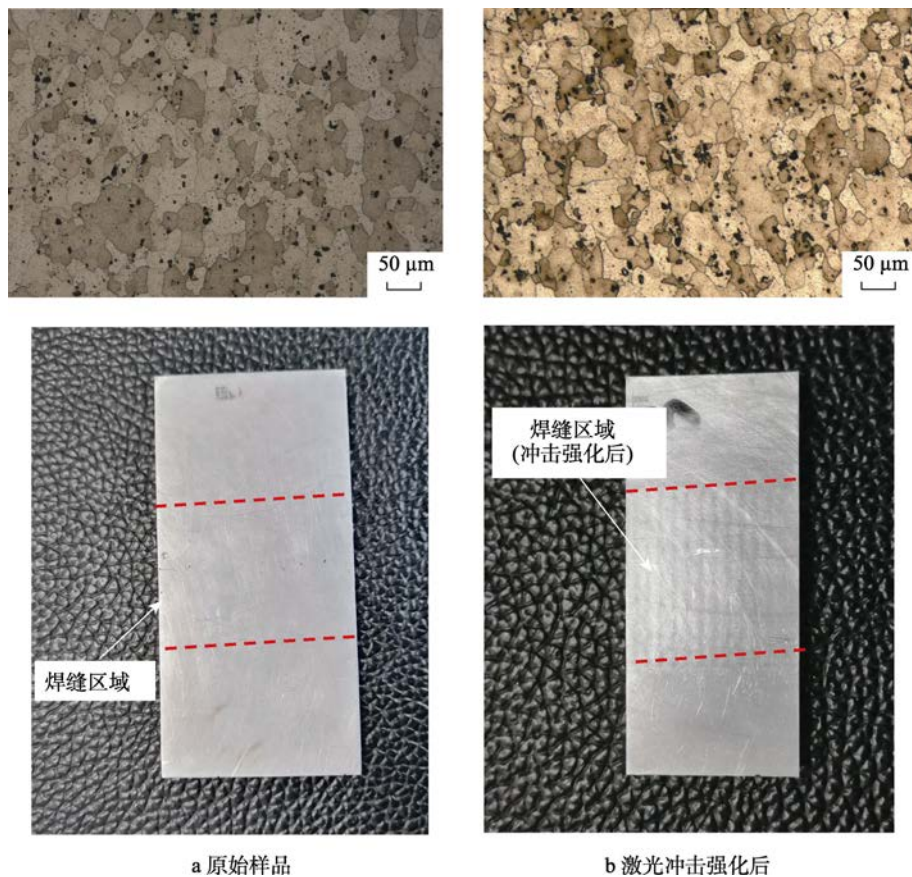


图 7 焊缝区金相图和宏观形貌

Fig.7 Metallographic and macroscopic morphology of the weld zone: a) primary specimen; b) specimen after LSP

2.5 动电位极化曲线分析

为进一步表征激光冲击强化对 2219 铝合金焊缝部位腐蚀性能的影响, 采用电化学工作站对焊缝在四氧化二氮中的电化学腐蚀过程进行表征。通过将 2219 铝合金焊缝部位不同区域浸没在四氧化二氮中, 分析不同区域电化学腐蚀性能的差异。根据极化曲线拟合得到的不同表面处理的腐蚀电位 (E_{corr})、腐蚀电流密度 (J_{corr}) 见表 4。从测试结果分析可知, 焊核区表面腐蚀电位较焊接过渡区高, 即意味着在 N_2O_4 介质中, 焊核区相对于焊接过渡区更加耐腐蚀。焊接过渡

区的平均腐蚀电流密度更大, 也说明在 N_2O_4 介质中焊接过渡区的腐蚀速率更大。可能的原因是, 影响区不仅受到拉应力的作用, 同时由于钨极氩弧焊接过程中的剪切作用, 在垂直于焊缝表面, 材料的塑性变形形成了更多的晶界, 而晶界极易造成元素偏析和大量点缺陷的聚集, 因此使晶体在该处化学势升高。

采用同样的方法, 对经过激光冲击强化的 2219 铝合金焊缝进行电化学测试。经过激光冲击后, 焊核区的表面腐蚀电位升高, 为 -0.21 V (vs. Hg/HgCl), 表明相对于未经激光冲击的焊核区, 腐蚀倾向更弱。

表4 2219 铝合金钨极氩弧焊焊缝不同区域在 N_2O_4 中的腐蚀性能

Tab.4 Corrosion properties of different tungsten inter-gas arc weld zones of 2219 aluminum alloy in N_2O_4

	焊核区		焊接过渡区	
	未冲击处理	冲击处理	未冲击处理	冲击处理
平均腐蚀电流密度 $J_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	6.31	5.43	6.55	5.72
表观腐蚀电位 E_{corr} (vs. Hg/HgCl) /V	-0.26	-0.21	-0.45	-0.31

焊接过渡区表观腐蚀电位为-0.31 V, 相比未经激光冲击处理的上升了 0.14 V, 腐蚀倾向得到了抑制。

从平均腐蚀电流分析, 经过激光冲击处理的焊核区和焊接过渡区的平均腐蚀电流密度分别为 5.43、5.72 $\mu A/cm^2$, 相比于未经激光冲击处理的焊核区和焊接过渡区分别减小了 14.0% 和 12.7%。根据法拉第定律电化学当量换算, 可以计算出在该腐蚀电流下 2219 铝合金的腐蚀速率, 见表 5。换算时, 假设焊缝没有缺陷, 具有与母材相同的密度。计算结果表明, 经过激光冲击强化后, 钨极氩弧焊焊缝中, 各区域的腐蚀速率均小于 2219 铝合金母材的腐蚀速率。其中, 经过冲击强化处理后, 焊核区的腐蚀速率降低了 16.9%, 焊接过渡区的腐蚀速率降低了 12.9%, 母材区腐蚀速率降低了 6.2%。这说明激光冲击强化处理有效地抑制了 2219 铝合金焊缝在 N_2O_4 介质中的腐蚀, 使原本容易发生腐蚀失效的焊缝的耐腐蚀性能得到了极大提升, 能有效避免钨极氩弧焊焊缝腐蚀失效的风险。

表5 2219 铝合金钨极氩弧焊焊缝不同区域在 N_2O_4 中的电化学腐蚀速率

Tab.5 Electrochemical corrosion rate of different tungsten inter-gas arc weld zones of 2219 aluminum alloy in N_2O_4 $10^{-2} mm/a$

	焊核区	焊接过渡区	母材区
未冲击样品	6.59	7.88	6.5
激光冲击强化样品	5.53	6.86	6.1

3 结论

2219 铝合金是极具应用前景的推进剂贮箱材料。通过对焊接部位进行强化处理, 可以提高其在推进剂介质中的耐腐蚀性能, 有利于提高贮箱结构的安全系数。本文对 2219 铝合金钨极氩弧焊焊缝进行激光冲击强化处理, 通过试验比较了处理前后焊缝在推进剂介质中的耐腐蚀性能, 主要结论如下:

1) 激光冲击强化可以将 2219 铝合金材料焊缝部位的残余拉应力调节为残余压应力, 而基本不改变焊

缝区域的表面金属元素状态, 从而提升 2219 铝合金材料的耐腐蚀性能。

2) 以 30% HNO_3 水溶液为腐蚀介质开展的静态浸泡试验表明, 经过激光冲击强化后, 试件的腐蚀质量损失速率明显降低, 可以认为焊缝区域的腐蚀过程变慢, 腐蚀趋势得到抑制。

3) 经过激光冲击强化后, 钨极氩弧焊焊缝各区域的电化学腐蚀速率均小于处理前材料的腐蚀速率。强化处理后, 焊核区的腐蚀速率降低了 16.9%, 焊接过渡区的腐蚀速率降低了 12.9%, 母材区的腐蚀速率降低了 6.2%, 腐蚀倾向得到抑制, 使焊缝区域的耐腐蚀性能得到了极大提升。

参考文献:

- [1] SHI Y. Development Status and Prospect of Aviation Materials in China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632(5): 052038.
- [2] 李沛勇. 高性能铝基复合材料进展[J]. 材料工程, 2023(4): 67-87.
LI P Y. Progress of High performance Aluminum matrix Composites[J]. Materials Engineering, 2023(4): 67-87.
- [3] 黄诚, 刘德博, 吴会强, 等. 我国航天运载器复合材料贮箱应用展望[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(2): 27-35.
HUANG C, LIU D B, WU H Q, et al. Application Prospects of Composite Propellant Tanks in Domestic Launch Vehicles[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(2): 27-35.
- [4] 杨泉. 铝合金焊接技术研究现状及进展[J]. 装备维修技术, 2020(1): 136-137.
YANG Q. Research Status and Progress of Aluminum Alloy Welding Technology[J]. Equipment Technology, 2020(1): 136-137.
- [5] 王泽荫. 铝合金焊接技术现状研究[J]. 世界有色金属, 2021(8): 132-134.
WANG Z Y. Research on Status of the Aluminum Alloy Welding Technology[J]. World Nonferrous Metals, 2021(8): 132-134.
- [6] 郝安林, 赵亚东. 铝合金焊接方法的研究现状[J]. 安阳工学院学报, 2010, 9(6): 8-9.
HAO A L, ZHAO Y D. Review of Research on Welding Technologies of Aluminum Alloys[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2010, 9(6): 8-9.
- [7] 肖淑杰. 三种铝合金小贮箱耐蚀性能的评定[J]. 宇航材料工艺, 1982, 12(4): 1-6.
XIAO S J. Evaluation of Corrosion Resistance of Three Kinds of Aluminum Alloy Small Tanks[J]. Aerospace Materials & Technology, 1982, 12(4): 1-6.
- [8] 郭振付, 刘校桦. 焊后处理工艺对铝合金焊接接头拉伸性能影响[J]. 世界有色金属, 2019(17): 173-174.
GUO Z F, LIU X H. Effect of Post-Weld Processing on

- Tensile Properties of Aluminum Alloy Welded Joints[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(17): 173-174.
- [9] 赵绪杰, 马永新, 张增焕, 等. 激光冲击强化技术研究与应用现状[J]. *应用激光*, 2022, 42(10): 111-119.
ZHAO X J, MA Y X, ZHANG Z H, et al. Research and Application Status of Laser Shock Peening Technology[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(10): 111-119.
- [10] 舒坤, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对焊缝组织性能影响的研究进展[J]. *表面技术*, 2023, 52(7): 1-16.
SHU K, QIAO H C, ZHAO J B, et al. Research Progress of Effect of Laser Shock Strengthening on Microstructure and Properties of Weld[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(7): 1-16.
- [11] 乔红超, 胡宪亮, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化的影响参数与发展应用[J]. *表面技术*, 2019, 48(12): 1-9.
QIAO H C, HU X L, ZHAO J B, et al. Influence Parameters and Development Application of Laser Shock Processing[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(12): 1-9.
- [12] 耿军儒, 张立辉, 朱红钢, 等. 航空发动机钛合金叶片激光冲击强化应用研究[C]// 第16届全国特种加工学术会议论文集. 厦门: 中国机械工程学会特种加工分会, 2015.
GENG J R, ZHANG L H, ZHU H G, et al. Application Research on Laser Shock Strengthening of Titanium Alloy Blades of Aeroengine[C]// Proceedings of the 16th National Academic Conference on Special Processing. Special Machining Branch of Chinese Society of Mechanical Engineering, 2015.
- [13] WANG H, HUANG Y H, ZHANG W W, et al. Investigation of Multiple Laser Shock Peening on the Mechanical Property and Corrosion Resistance of Shipbuilding 5083Al Alloy under a Simulated Seawater Environment[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6300-6308.
- [14] 张科夫, 吴学岗, 滕江, 等. 基于激光冲击强化的某型航空发动机风扇机匣壳体裂纹修复技术研究[J]. *航空维修与工程*, 2022(2): 72-75.
ZHANG K F, WU X G, TENG J, et al. Research on Crack Repair Technology of Aero-Engine Fan Casing Based on Laser Shock Peening[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2022(2): 72-75.
- [15] RENJITH KUMAR R, DEVASENA T, ABEENS M. Improved Mechanical Properties of Nano Structured 316 L Stainless Steel by Statistically Optimized Low Pulsed Laser Shock Peening Process for Aeronautical Application[J]. *Optik*, 2023, 276: 170654.
- [16] 张浩, 蒋磊, 岑志波, 等. 激光冲击修复后压力容器钢 Q345R 耐腐蚀及抗疲劳性能研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(10): 14-21.
ZHANG H, JIANG L, CEN Z B, et al. On Corrosion and Fatigue Resistance of Pressure Vessel Steel Q345R after Laser Shock Repair[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(10): 14-21.
- [17] 李微, 肖国源, 陈辉涛, 等. 渗铝复合激光冲击对 321 不锈钢腐蚀疲劳性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(2): 140-151.
LI W, XIAO G Y, CHEN H T, et al. Effect of Aluminizing and Laser Shock Peening on Corrosion Fatigue Properties of 321 Stainless Steel[J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(2): 140-151.
- [18] 张士国, 刘明. 四氧化二氮结构与性质的研究[J]. *滨州学院学报*, 2005, 21(6): 78-82.
ZHANG S G, LIU M. A Theoretical Study for the Structure and Property of N_2O_4 [J]. *Journal of Binzhou University*, 2005, 21(6): 78-82.
- [19] 卢志明, 石来民, 朱沈瑾, 等. 激光喷丸与机械喷丸对 304 不锈钢应力腐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(6): 169-173.
LU Z M, SHI L M, ZHU S J, et al. Effect of Laser Peening and Shot Peening on Stress Corrosion Sensitivity of 304 Stainless Steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(6): 169-173.
- [20] 贺地求, 赵志峰, 赖瑞林, 等. 2219-T87 超声辅助搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(4): 41-47.
HE D Q, ZHAO Z F, LAI R L, et al. Research on the Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic Assisted Friction Stir Welding Joints of 2219-T87 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(4): 41-47.
- [21] 罗开玉. 激光冲击不锈钢抗腐蚀性能及微观强化机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
LUO K Y. Investigation of Laser Shock Processing on Corrosion Properties and Micro-Plastic Strengthening Mechanism of Stainless Steel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012.
- [22] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
WEI B M. Theory and Application of Metal Corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [23] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(9): 2115-2141.
DENG Y L, ZHANG X M. Development of Aluminium and Aluminium Alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [24] TIAN G, JIN G F, ZHANG W, et al. Investigation on Electrochemical Corrosion Characteristic of 2A14 Aluminum Alloy in Nitric Acid[J]. *Surface Review and Letters*, 2017, 24(S1): 1850016.
- [25] FENG Y B, HUANG Z Y, TIAN G, et al. Correlation Study on General and Accelerated Corrosion of the Welded Structure of Aluminum Alloy 2219 in N_2O_4 [J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2015, 62(3): 136-142.