

表面冲击改善铝合金搅拌摩擦焊接头应力腐蚀抗力的研究进展

张福林, 张体明, 邓云发, 樊浩, 熊涛寰, 陈玉华

(南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330063)

摘要: 铝合金广泛应用于航空航天、高速列车等新型装备, 搅拌摩擦焊是这些装备的重要制造方法之一。然而, 这些焊接结构在建造、服役过程中往往受到腐蚀环境的影响, 在外力或残余应力耦合作用下极易发生应力腐蚀。诸多研究证实表面冲击技术可以提高铝合金的抗应力腐蚀性能, 然而关于其防护机理尚处于推测阶段, 至今没有统一论。从应力腐蚀的力学因素和腐蚀因素两方面出发, 剖析表面冲击对材料力学性能和耐腐蚀性能的影响, 在此基础上, 提出了表面冲击抑制铝合金应力腐蚀作用机制的研究方向, 即通过构建关系模型定量表征改性层力学因素和腐蚀因素对接头应力腐蚀抗力的贡献率, 可为阐明表面冲击抑制铝合金 FSW 接头应力腐蚀的关键因素及作用机理奠定基础, 并为冲击工艺的优化提供理论支持。

关键词: 表面冲击; 铝合金; 应力腐蚀; 力学因素; 腐蚀因素

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.014

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0098-05

Research Progress of Surface Impact Treatment Improved Stress Corrosion Cracking Resistance of Friction Stir Welded Aluminium Alloys

ZHANG Fu-lin, ZHANG Ti-ming, DENG Yun-fa, FAN Hao, XIONG Tao-huan, CHEN Yu-hua

(Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aviation Components,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: Aluminium alloy is widely used in aerospace, high-speed trains and other new equipment. Friction stir welding is an important manufacturing method for these equipments. However, these welded structures are often affected by the corrosive environment during construction and service, and stress corrosion cracking (SCC) is highly likely to occur under the coupling of external force or residual stress. Many studies have confirmed that surface impact can improve the SCC resistance of aluminum alloy. However, the protection mechanism is still in the speculative stage, and no consensus has been reached yet. Based on the mechanical and corrosion factors of SCC, the effects of surface impact on the mechanical properties and corrosion resistance of materials were discussed. And, on this basis, the research direction of improving the SCC resistance of friction stir welded joints of aluminum alloy by surface impact treatment was put forward. That is, to quantitatively reveal the contribution of mechanical factor and corrosion factor in the modified layer to stress corrosion resistance. It can lay a foundation for clarifying the key factors and mechanism of surface impact to inhibit stress corrosion of aluminum alloy FSW joints, and provide theoretical support for optimization of impact process.

KEY WORDS: surface impact treatment; aluminum alloy; stress corrosion; mechanical factor; corrosion factor

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ180507)

作者简介: 张福林 (1998—), 男, 焊接技术与工程专业本科生。

通讯作者: 张体明 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料连接及腐蚀防护。

大力发展飞机、航空发动机等航空航天装备制造技术,既是我国当前经济社会发展的迫切需要,又是保障国家安全的重大战略需求。因此《中国制造 2025》把“航空航天装备”列为十大重点突破发展的领域之一。航空铝合金以其密度低、比强度高、加工和成形性能好等特点被广泛应用于国民经济及国防工业等领域^[1]。铝合金在服役过程中极易受到点蚀、剥层腐蚀、晶间腐蚀以及应力腐蚀等腐蚀作用的影响。其中,应力腐蚀所造成的损伤最为严重,极易引发灾难性事故,因此,抗应力腐蚀能力已成为衡量铝合金性能的一项重要指标。作为航空航天装备的重要制造方法之一,搅拌摩擦焊(FSW)在铝合金结构制造中具有举足轻重的作用。FSW 是一种新型固相连接技术,与传统的熔化焊相比可以有效避免合金凝固过程中所产生的气孔和裂纹等冶金缺陷,但仍会不可避免地导致接头部位残余应力以及组织不均匀的产生,使得接头区域的应力腐蚀失效行为愈发复杂^[2],因此,FSW 接头的抗应力腐蚀性能将直接决定着铝合金整体结构的可靠性和使用寿命。

应力腐蚀是金属结构在拉应力和腐蚀介质共同作用下发生的断裂现象,其断裂应力往往低于许用应力,在无明显征兆的情况下突然断裂,严重威胁服役结构的使用安全。应力腐蚀失效一般发源于材料表面,因此通过表面处理提高自身的耐应力腐蚀性能比研发全新材料更有成本和时间优势。表面冲击,如超声冲击、超声滚压、高能喷丸、超音速微粒轰击、激光冲击等是国内外广泛接受和认可的表面处理技术,这些技术的主要优势在于不改变材料的外形尺寸、工艺简单易行、成本低廉且无表面涂、镀层带来的污染问题^[3]。目前,学术界针对表面冲击的研究主要围绕材料的硬度、强度以及疲劳性能展开。同时,也有一些研究人员发现采用表面冲击可以提高材料的应力腐蚀抗力^[4-6],但关于表面冲击抑制材料应力腐蚀失效的机理尚处于推测阶段,缺乏系统深入地分析和研究。

1 铝合金 FSW 接头组织特征与应力腐蚀行为的相关性

近海飞机及舰载飞机上所用的铝合金结构在应力和海水的共同作用下存在应力腐蚀失效的风险。对于采用 FSW 制造的铝合金结构而言,其接头的显微组织、应力应变状态以及耐蚀性能等都是影响其应力腐蚀敏感性的关键因素。典型的铝合金 FSW 接头显微组织形貌如图 1 所示,通常可分为母材区(见图 1a)、焊核区(见图 1b)、热机械影响区(见图 1c)、热影响区(见图 1d)^[7],典型显微组织形貌如图 1 所示。其中,焊核区受热量的作用晶粒达到塑性状态,在搅拌针的作用下晶粒被拉长、打碎,发生动态再结

晶,其晶粒比母材更为细小;热机械影响区不与搅拌针接触,只受到热塑性材料之间速度梯度的影响,晶粒不会被打碎而重新形核,只能发生回复反应,晶粒被拉长且高度扭曲;热影响区仅受焊接热循环的作用,晶粒尺寸通常大于母材。热作用和机械搅拌作用的不均匀使得 FSW 接头出现特殊的“洋葱环”结构,各区微观组织的差异导致其应力腐蚀失效行为的复杂程度远高于铝合金本身。Li 等^[8]较早的研究发现,2195 和 2219 铝合金 FSW 接头对应力腐蚀不敏感,接头较母材更耐应力腐蚀。Meletis 等^[9]对 AA7075-T6、AA2219-T87 和 AA2195-T87 的 FSW 接头的应力腐蚀敏感性进行了研究,同样发现接头比母材的抗应力腐蚀性能更好。与上述报道结果相反,Lumsden 等^[10]对 AA7075-T7651 的 FSW 接头在腐蚀环境中的慢速率拉伸试验结果显示:接头的抗应力腐蚀性能明显低于母材,应力腐蚀裂纹萌生于焊核区与热机械影响区。除此之外,康举等^[2]的研究也证实热机械影响区为 FSW 接头应力腐蚀失效的薄弱区域,在拉伸过程中,接头变形主要集中在热机械影响区,其表面的钝化膜更容易破裂,在腐蚀介质中发生局部腐蚀,成为应力腐蚀裂纹的发源地。可见,受试验材料及试验参数差异的影响,研究结果存在较大的差异^[11]。笔者认为,明确 FSW 接头的显微组织类型、晶粒尺度、晶界角度、晶粒取向、位错密度及状态、缺陷形态及分布等特征,并解析其与应力腐蚀敏感性的相关性,确定应力腐蚀敏感组织的关键特征,是揭示 FSW 接头应力腐蚀行为和机理的重要基础,此外,还可以为接头敏感组织的表面冲击改性处理提供理论支持。

2 表面冲击改性层的应力状态及力学性能

至今,诸多研究证实焊接接头残余应力特别是残余拉应力是导致焊接结构发生应力腐蚀的关键因素之一^[12]。此外,焊接接头各区组织性能的不均匀也会影响整体结构的耐腐蚀性能,诱发点腐蚀^[13]、晶间腐蚀^[14]等局部腐蚀问题的发生,极易成为应力腐蚀裂纹的发源地。鉴于此,改善焊接接头的应力状态以及耐腐蚀性能,将会成为抑制焊接结构应力腐蚀的有效措施。笔者通过慢速率拉伸试验发现,表面冲击可以提高铝合金 FSW 接头的抗应力腐蚀失效能力。图 2 所示为 2A12 铝合金搅拌摩擦焊接头在不同情况下的慢速率拉伸曲线,可见,经超声冲击处理后,接头试样在腐蚀环境中的变形能力较表面未冲击的试样有了明显提升。目前,表面冲击主要应用于疲劳延寿领域,国内的天津大学^[15-16]、清华大学^[17]均对此进行过系统而深入的研究。针对表面冲击的强化机理,目前已取得如下共识^[18],即:表面冲击能够消除表层残余拉

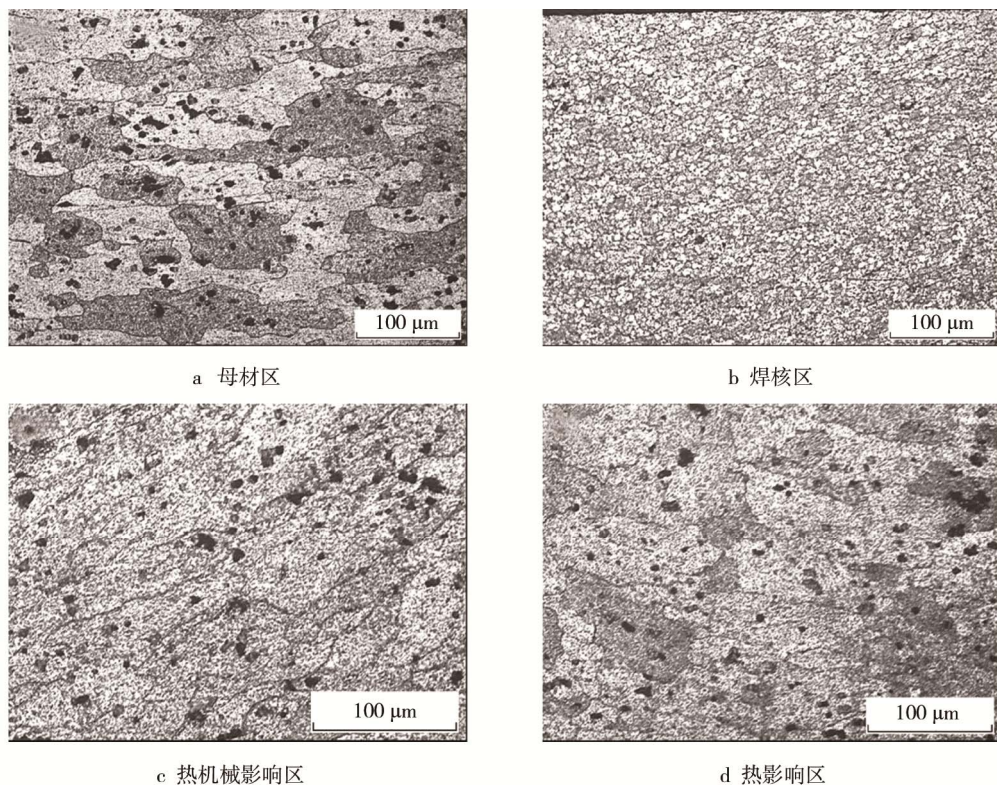


图1 铝合金搅拌摩擦焊接头各区的典型显微组织

Fig.1 Typical microstructures of FSW welded aluminum alloy

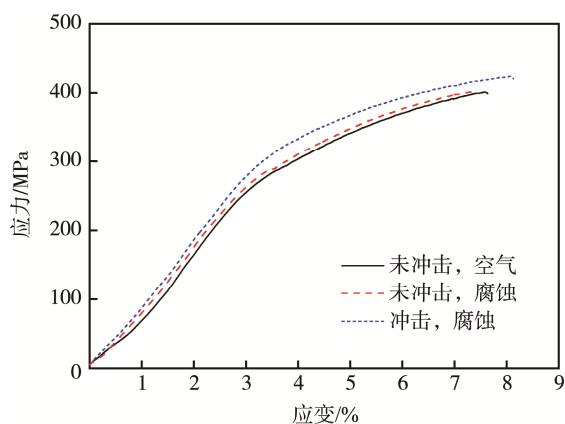


图2 2A12 铝合金 FSW 接头在不同条件下的慢速率拉伸曲线

Fig.2 SSRT curves for FSW joints of 2A12 aluminum alloy under different conditions

应力并形成残余压应力；当压应力增大到一定程度后会产生压缩塑性变形；伴随剧烈塑性变形会产生高密度位错缠结和位错墙，进而细化晶粒尺寸，甚至实现纳米化^[19]。关于表面冲击提升材料疲劳性能或力学性能，其强化机制主要体现在以下方面：表面冲击所产生的表层压应力可以抵消疲劳或拉伸过程中的拉应力，能有效抑制表面裂纹的萌生；在此基础上，压缩塑性变形的出现还可以产生应变强化的效果；随着超声冲击能量的不断积累，纳米化晶粒的出现还会产生细晶强化的效果，并增强裂纹扩展过程中的止裂能

力。表面压应力的大小是表征表面冲击效果的一个重要参量，一般通过机械法或者是无损测量法获得，其中，X 射线衍射法以其测试精度高、无破坏等优点而成为目前应用最广泛的方法之一^[20]。此外，冲击改性层自身性能是决定其应用效果的重要因素，但目前多以试样的整体力学性能变化对表面冲击的效果进行评价，缺少改性层自身性能，如韧性、强度、硬度等与试样整体性能之间关系的定量表征，而这恰是从力学因素角度分析表面冲击抑制材料应力腐蚀机理的重要基础。

3 表面冲击改性层的耐腐蚀性能

表面冲击改性层的耐腐蚀性能是影响材料应力腐蚀敏感性的另一个关键因素。表面冲击所导致的应力-应变状态变化会影响材料的表面能，进而影响表面原子的活性，其耐腐蚀性能也将发生相应的变化^[21]。笔者早期所在团队曾对应力-应变作用下的 X80 管线钢耐腐蚀性能进行过相关研究，建立了材料腐蚀倾向与应力变量、位错密度、形变硬化程度之间的定量关系。当 X80 钢发生形变强化时，会出现腐蚀速率急剧增加的极值，而弹性变形对材料的耐蚀性影响不大，具体的应变与腐蚀电流密度的关系曲线如图 3 所示^[22]，相关研究基础可为铝合金 FSW 接头表面冲击前后的腐蚀行为分析提供理论支持。从热力学

角度考虑, 表面冲击作用会导致材料整体能量的升高, 致使纳米晶表面的能量升高, 稳定性降低, 原子活性增强, 耐蚀性可能降低。卢柯院士及其团队成员近期研究发现^[23], 当 Cu 金属晶粒细化至一定程度时, 其热稳定性反而增加, 这主要是由于塑性变形过程中部分位错的活化使纳米晶粒之间形成低角度的晶界, 导致纳米晶从高能态向低能态发生转变, 因而也存在耐腐蚀性能增加的可能。对于铝合金而言, 在其表面冲击纳米化过程中是否存在这一效应, 有待进一步的深入研究。还有部分学者认为, 表面冲击导致的晶粒细化会促使钝化元素的扩散通道增多, 扩散系数增加, 可以快速形成致密的钝化膜, 耐腐蚀性能增加^[3]。此外, 表面冲击所导致的粗糙度变化也会对材料的耐腐蚀性能产生重要影响, 表面抛丸、超声喷丸、超音速微粒轰击等会提高材料的表面粗糙度, 一般不利于材料耐蚀性的提高^[3]。与上述传统的表面加工技术不同, 超声滚压加工综合了普通滚压和超声冲击的优点, 使得材料表层在产生压应力、压缩塑性变形、晶粒细化的同时还极大地降低了表面粗糙度。笔者近期对 2A12 铝合金搅拌摩擦焊接头进行了表面冲击处理, 初步研究发现表面超声冲击可以降低材料的腐蚀速率, 接头的腐蚀形式从点腐蚀向均匀腐蚀的形式发生转变。为了研究材料的腐蚀行为变化, 国内外大多采用腐蚀挂片的测试方法^[24], 可直观地观察焊接接头的腐蚀行为, 但此方法测试周期长, 并且难以确定腐

因素角度解析表面冲击抑制铝合金 FSW 接头应力腐蚀敏感性的机理。

4 结语

铝合金存在应力腐蚀失效的可能, 而 FSW 接头存在的组织不均匀和残余应力等问题进一步增加了应力腐蚀失效的风险。采用表面冲击的方法, 通过表面自改性可提高材料的应力腐蚀抗力, 但目前的研究大多处于测试结果的规律性分析或失效机理的推测阶段, 而没有深入研究冲击改性层力学性能和耐蚀性能变化对材料应力腐蚀抗力的贡献程度, 而这恰是揭示改性层提升应力腐蚀抗力机理的关键。此外, 为了进一步揭示应力腐蚀断裂行为, 通常需要借助显微分析手段, 扫描电镜、电子探针、透射电镜等分析设备应用日益增多。近年来, 电子背散射衍射技术也逐渐被人们所熟知, 通过电子背散射衍射分析, 可以直观确定裂纹的起裂位置、扩展方式和扩展路径, 进而评价晶粒尺度、晶界角度、晶粒取向等因素对断裂过程的影响。总之, 先进的材料分析技术为材料的失效过程和失效机理研究提供了重要保障。

随着我国航空事业的不断发展, 越来越多的飞机将服役于近海环境。“百年航空, 百年铝合金”, 鉴于铝合金在航空领域的重要地位, 急需开展铝合金焊接结构的应力腐蚀防护问题研究, 并揭示其防控机理, 所得结论具有重要的理论和实践指导意义。

参考文献:

- [1] 于美, 刘建华, 李松梅. 航空铝合金腐蚀防护与检测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
YU Mei, LIU Jian-hua, LI Song-mei. Aviation Aluminum Alloy Corrosion Protection and Detection Method [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 康举, 李吉超, 冯志操, 等. 2219-T8 铝合金搅拌摩擦焊接头力学和应力腐蚀性能薄弱区研究[J]. 金属学报, 2016, 52(1): 60—70.
KANG Ju, LI Ji-chao, FENG Zhi-cai, et al. Investigation on Mechanical and Stress Corrosion Cracking Properties of Weakness Zone in Friction Stir Welded 2219-T8 Al Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(1): 60—70.
- [3] 杨建海, 张玉祥, 葛利玲, 等. 2A14 铝合金混合表面纳米化对电化学腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(11): 1413—1422.
YANG Jian-hai, ZHANG Yu-xiang, GE Li-ling, et al. Effect of Hybrid Surface Nanocrystallization on the Electrochemical Corrosion Behavior in 2A14 Aluminum Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(11): 1413—1422.

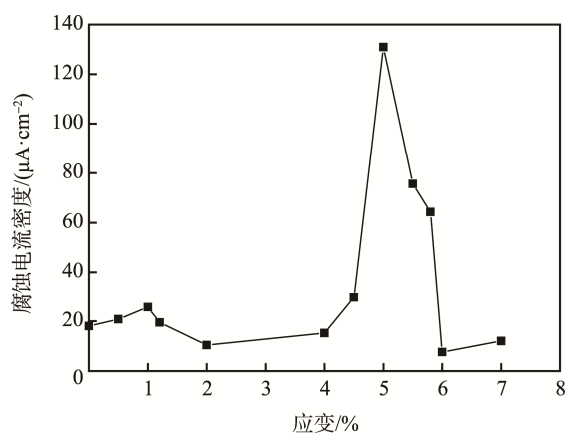


图 3 X80 钢的腐蚀电流密度-应变曲线^[22]

Fig.3 Curve of corrosion current density and strain for X80 steel

蚀电位、点蚀电位等信息。相比而言, 采用电化学测试手段测试效率更高, 可以快速获得腐蚀电位、腐蚀电流密度等参数。但是对于焊接接头而言, 多区域混合共存的问题给电化学测试带来较大的困难。鉴于此, 笔者认为可以借鉴丝束电极的理念, 采用机械加工的方法获得焊接接头各区的试样, 然后采用环氧树脂镶嵌制备铝合金 FSW 接头的模拟试样, 通过焊接接头各区之间的通断控制获得接头单一区域或多区域混合共存条件下的腐蚀动力学参数, 有助于从腐蚀

- [4] 武美妮, 王晓敏, 陈辉. 盐雾环境对超声冲击前后 6005A 铝合金焊接接头残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 18—20.
WU Mei-ni, WANG Xiao-min, CHEN Hui. Effect of Salt Fog Environment on Residual Stress of 6005A Al-loy Welded Joint Before and After Ultrasonic Impact[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(5): 18—20.
- [5] YU J, GOU G, ZHANG L, et al. Ultrasonic Impact Treatment to Improve Stress Corrosion Cracking Resistance of Welded Joints of Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25(7): 3046—3056.
- [6] 刘智勇, 王长朋, 杜翠薇, 等. 外加电位对 X80 管线钢在鹰潭土壤模拟溶液中应力腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(11): 1434—1439.
LIU Zhi-yong, WANG Chang-peng, DU Cui-wei, et al. Effect of Applied Potentials on Stress Corrosion Cracking of X80 Pipeline Steel in Simulated Yingtan Soil Solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(11): 1434—1439.
- [7] 王磊, 李平赞, 回丽, 等. 2A12 铝合金搅拌摩擦焊缝表面硬度及微观组织研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 207—210.
WANG Lei, LI Ping-yun, HUI Li, et al. Study on Surface Hardness and Microstructure of 2A12 Al Alloy Friction Stir Weld Seam[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 207—210.
- [8] LI Z X, ARBEGAST W J, HARTLEY P J, et al. Microstructure Characterization and Stress Corrosion Evaluation of Friction Stir Welded Al 2195 and Al 2219 Alloys[C]// Trends in Welding Research: Proceedings of the 5th International Conference, USA, 1998.
- [9] SUREKHA K, MURTY B S, RAO K P. Microstructural Characterization and Corrosion Behavior of Multipass Friction Stir Processed AA2219 Aluminum Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202: 4057—4068.
- [10] LUMSDEN J B, POLLOCK G, MAHONEY M W. Corrosion Behavior of Friction-Stir-Welded AA7075-T7561 [J]. Materials Science Forum, 2003: 426—432.
- [11] HAN M, JANG S, KIM S J. Investigation on SCC and HE of STS 304 Austenitic Stainless Steel for Offshore Structures[J]. Rare Metals, 2011, 30(1): 633—638.
- [12] MANKARI K, ACHARYYA S G. Development of Stress Corrosion Cracking Resistant Welds of 321 Stainless Steel by Simple Surface Engineering[J]. Applied Surface Science, 2017, 426: 944—950.
- [13] MA S, ZHAO Y, ZOU J, et al. The Effect of Laser Surface Melting on Microstructure and Corrosion Behavior of Friction Stir Welded Aluminum Alloy 2219[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 96: 299—306.
- [14] 董鹏, 孙大千, 李洪梅, 等. 6005A 铝合金搅拌摩擦焊接头的晶间腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 105—108.
DONG Peng, SUN Da-qian, LI Hong-mei, et al. Intergranular Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded Joints of 6005A Aluminium Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 105—108.
- [15] 王东坡, 龚宝明, 吴世品, 等. 焊接接头与结构疲劳延寿技术研究进展综述[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(6): 1—14.
WANG Dong-po, GONG Bao-ming, WU Shi-pin, et al. Research Review on Fatigue Life Improvement of Welding Joint and Structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(6): 1—14.
- [16] ZHANG H, WANG D, XIA L, et al. Effects of Ultrasonic Impact Treatment on Pre-fatigue Loaded High-strength Steel Welded Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 80: 278—287.
- [17] LIU T, LI X, TANG G, et al. Effect of Ultrasonic Impact Treatment Assisted with High Energy Electropulsing on Microstructure of D36 Carbon Steel[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(24): 3956—3967.
- [18] 何柏林, 于影霞, 余皇皇, 等. 超声冲击对转向架焊接十字接头表层组织及疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 51—54.
HE Bo-lin, YU Ying-xia, YU Huang-huang, et al. Effect of Ultrasonic Impact on the Surface Microstructure and Fatigue Properties of Welded Cross Joint for Train Bogie[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 51—54.
- [19] WANG T, WANG D, LIU G, et al. Investigations on the Nanocrystallization of 40Cr Using Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824—1829.
- [20] 古特曼. 金属力学化学与腐蚀防护[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Г YTMAH 3 M. Metal Mechanics Chemistry and Corrosion Protection[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [21] 苟国庆, 黄楠, 陈辉, 等. X 射线衍射法测试高速列车车体铝合金残余应力[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 618—622.
GOU Guo-qing, HUANG Nan, CHEN Hui, et al. Detection of Residual Stress in Aluminum Alloy Carbody of High-Speed Train Using X-ray Diffraction Technology [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(4): 618—622.
- [22] WANG Y X, ZHAO W M, AI H, et al. Effects of Strain on the Corrosion Behaviour of X80 Steel[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 2761—2766.
- [23] ZHOU X, LI X Y, LU K. Enhanced Thermal Stability of Nanograined Metals Below Acritical Grain Size[J]. Science, 2018, 360: 526—530.
- [24] SINHMAR S, DWIVEDI D K. A Study on Corrosion Behavior of Friction Stir Welded and Tungsten Inert Gas Welded AA2014 Aluminium Alloy[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 25—35.