

# 表面强化技术在焊接领域中的应用研究进展

那 飞,龙 琼,伍剑明,苏向东

(贵州理工学院材料与能源工程学院,贵州 贵阳 550003)

**摘 要:** 焊接技术以其成本低、工艺简单等优点被广泛应用于结构和构件的制造。但是,焊接过程通常会对焊接件施加残余拉伸应力,这往往会对焊接接头的疲劳性能等造成不利影响。表面强化技术可以显著改善材料的力学性能。综述了辊轧、高频冲击、喷丸法、激光冲击以及超声冲击法等对焊接接头性能的影响,并对其发展方向进行了展望。

**关键词:** 表面强化; 焊接; 组织; 力学性能

## 0 引言

焊接是我国“强基工程”中基础工艺之一,标志着国家的工业技术水平,支撑国家建设及国防安全,目前我国钢铁产量的60%需要焊接<sup>[1]</sup>。焊接技术以其成本低、工艺简单等优点被广泛应用于结构和构件的制造。在《中国制造2025》重点发展的十大领域中,八个领域与焊接密切相关<sup>[2]</sup>。然而,焊接过程通常会对焊接件施加残余拉伸应力,会对焊接接头的疲劳性能等造成不利影响,而残余压应力通常可显著提高焊接接头的疲劳寿命。

表面强化技术可用来细化金属表层的晶粒度,增加金属的表面硬化程度,减少材料中因为存在的缺陷导致的一系列问题,以及在金属表层引入有益的残余压应力来提高金属零件的性能<sup>[3-5]</sup>。该技术广泛应用在焊接领域中,用于提高焊接接头的疲劳强度、耐磨、耐腐蚀性能等。

本文综述辊轧、高频冲击、喷丸法、激光冲击以及超声冲击法等对焊接接头性能耐蚀性能的影响,并对其发展方向进行了展望。

## 1 研究进展

### 1.1 辊轧、拉伸预变形对焊接接头的影响研究

辊轧是一种压力加工工艺,被滚压的表层金属塑性变形,使表层组织冷硬化和晶粒变细,形成致密的纤维状,并形成残余应力层,使其硬度和强度有所提高,从而改善了工件表面的耐磨性、耐蚀性和配合性<sup>[6]</sup>。

陈怀宁等<sup>[7]</sup>采用辊压加载的方法在焊接接头处形成3%~5%微量塑性预应变,研究了辊压预处理对焊接接头材料的疲劳性能和力学性能的影响,研究结果发现辊压预处理后的接头的强度和硬度有所提高,但疲劳极限出现明显降低,并认为辊压后材料中位错的胞状亚结构和材料内部所形成的损伤累积导致了疲劳性能下降。

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2021]2602); 大学生创新创业项目(国家级-202014440016); 国家自然科学基金项目(51664009)

作者简介: 那 飞(2000—),男,云南昆明人,本科在读,材料与能源工程学院材料科学与工程专业。

通信作者: 龙 琼(1984—),男,湖北利川人,博士,教授,主要研究水产及特种种植技术。

许飞等<sup>[8]</sup>研究了 2024 铝合金搅拌摩擦焊产生的残余应力对裂纹扩展实验的影响,研究结果发现采用辊压的方式可以消除焊接过程中产生的残余拉应力,可降低裂纹扩展速率。

Hao 等<sup>[9]</sup>研究了 316L 不锈钢预变形轧制(PDR)在 4%的轧制压下率不仅提高了热影响区的材料强度,将最佳的 4%预变形轧制(PDR)工艺参数应用于大型拼焊板容器封头的深拉成形,提高了热影响区的塑性变形能力,热影响区和母材的壁厚在拉深后均匀减小。与未经 PDR 的热影响区相比,PDR 降低 4%的拉深成形头热影响区壁厚由 3.98 mm 增加到 4.25 mm,晶粒细小均匀,与母材相似,拉深成形头各区域的硬度值分布均匀。

### 1.2 喷丸强化对焊接接头的影响研究

喷丸强化处理焊接接头是利用高速喷射出的硬质弹丸撞击工件表面,在完全受控制的情况下,使零件表面在再结晶温度下产生弹性变形和塑性变形,并表现出较大残余压应力,从而显著影响材料表面粗糙度、局部应力状态和疲劳寿命等<sup>[10]</sup>。

Nasilowska 等<sup>[11]</sup>分析了喷丸处理对 5754 铝合金 TIG 焊接接头组织和力学性能的影响。研究结果表明 Fe-Ni-Cr 不锈钢球喷丸处理表层影响深度为 70~100  $\mu\text{m}$ ,接头区域屈服强度和杨氏模量分别增加约 20%和 30%。

Dieng 等<sup>[12]</sup>采用喷丸强化处理 S355J2 结构钢降低焊趾附近焊缝区域的高拉伸应力,通过喷丸处理后焊接接头附近的横向和纵向残余应力均下降 50 MPa 以上。

Soundararajan 等<sup>[13]</sup>研究结果表明 AA8011 搅拌摩擦焊接头热处理后,再经过喷丸处理后可以显著提高接头的力学性能和耐摩擦性能。

贾子妍<sup>[14]</sup>对铝/钢异种金属激光焊接接头采用喷丸处理,研究结果发现,在最佳喷丸后接头强度最大达 2 690 N,比喷丸前提高了 11.7%,同时也显著改善了接头的韧性。采用高能喷丸可以成功地在不同材料的焊接接头表面形成纳米层,细化接头表层晶粒,减小或消除表面组织

性能的不均匀性,提高接头的综合性能,具有非常大的应用前景。

### 1.3 超声冲击对焊接接头的影响研究

超声冲击处理(UIT)以其高效、可靠的特点,被广泛应用于提高焊接接头的疲劳性能。通过撞击金属板材的表面,使受撞击的表面与下层金属材料产生塑性变形,在引入残余压应力的同时能够有效降低或消除残余拉应力从而改善焊接接头组织与性能<sup>[15]</sup>。

UIT 处理技术也被认为是提高焊接结构疲劳性能最有效的焊后处理技术之一。

Tang 等<sup>[16]</sup>采用有限元模拟方法研究了 UIT 对 304L 不锈钢焊接接头残余应力分布和疲劳性能的影响,有限元结果表明,UIT 在对接和 T 型接头焊缝中引入了 2~3 mm 深度的有益压应力,显著延长了 304L 不锈钢焊接接头的疲劳寿命。

Chen 等<sup>[17]</sup>采用超声冲击技术(UIT)和时效与超声冲击联合处理(A-UIT)对 7A52 铝合金焊接接头进行了处理,比较分析了不同处理方法对焊接接头组织和性能的影响,研究结果表明,在铝合金焊接接头表面采用超声冲击方法可以制备出纳米晶粒层。A-UIT 后焊接接头的表面晶粒度、表面显微硬度和基体显微硬度均显著高于 UIT 后焊接接头。UIT 后的焊接接头表面强化机制为细晶强化,而 A-UIT 后的焊接接头表面强化机制为细晶析出强化。

Zheng 等<sup>[18]</sup>采用有限元方法对焊接过程进行了三维建模并进行了数值模拟,将焊态和 UIT 处理条件下的预测结果与未处理样品焊接残余应力改善进行了比较。研究结果表明,采用 UIT-有限元分析法可以在焊接结构的疲劳设计中具有潜在的应用价值,可以实现焊接结构材料的轻量化。

### 1.4 高频冲击对焊接接头的影响研究

高频冲击处理技术是一种新型有效塑性变形处理技术,具有噪音小、效率高、成本低、能耗低等优点。经过高频冲击处理后在金属表面可以获得梯度纳米结构和有效的残余应力,可以显著改善金属材料的力学性能<sup>[19]</sup>。

Zhang 等<sup>[20-21]</sup>研究了高频冲击轧制对焊接接头疲劳裂纹扩展的影响。结果表明,变极性等离子弧焊 2A12 铝合金的母材和焊缝区表面晶粒细化,纳米显微硬度、弹性模量和最大残余压应力均有所提高。近表面最大残余压应力的引入使表面实际应力状况发生明显变化,增加了裂纹闭合,降低了裂纹尖端的应力强度因子。母材和焊缝区的疲劳裂纹扩展寿命分别增加了 1.594~1.744 倍和 2.902~3.231 倍。相比于超声波冲击表面处理技术,高频冲击技术具有更大的冲击作用面积,能够消除焊接构件较大表面区域的残余应力,从而提高工作效率。

### 1.5 激光冲击对焊接接头的影响研究

激光冲击也称为激光表面硬化或激光喷丸处理,是利用高能脉冲激光在零件表面产生冲击波,使表面金属材料达到压缩和塑性变形的效果,在零件表面产生残余压应力,增强了工件对表面疲劳、腐蚀疲劳和应力腐蚀裂纹的抵抗能力<sup>[22]</sup>。

陆金花等<sup>[23]</sup>探讨了激光冲击处理对 45 钢-40Cr 钢焊接接头组织性能的影响,研究结果表明:经激光冲击后,接头焊缝区原有的马氏体组织逐渐分解为细小马氏体组织;冲击区域内焊缝区、热影响区以及母材区的残余拉应力都变为压应力,焊缝中心区域最大平均残余压应力可达 -395 MPa;同时,激光冲击使接头各区域的硬度值有不同程度的提高,热影响区附近和焊缝中心分别提高了约 60 HV<sub>0.3</sub>和 40 HV<sub>0.3</sub>,影响层深度约为 0.5 mm。

Shi 等<sup>[24]</sup>研究了激光淬火(LQ)和激光冲击强化(LSP)两种激光强化工艺对钢轨焊接接头抗磨抗疲劳性能的影响。LQ 工艺显著提高了钢轨焊接接头的抗磨性能,但抗疲劳性能变差。LQ 处理焊接接头的磨损率降低了 91.6%~92.4%,但 LQ 处理焊接接头的平均裂纹角(23~25°)和平均裂纹长度(62~74 μm)均大于未处理钢轨焊接接头(分别为 13~15°和 37~59 μm)。LSP 工艺提高了焊接接头的耐磨性和抗疲劳性能。LSP 处理的焊接接头磨损率降低了 5.1%~10.1%。同时, LSP 处理的焊接

接头的裂纹密度(0.9~4.2 mm<sup>-1</sup>)、平均裂纹角(10~13°)和平均裂纹长度(16~26 μm)均小于未处理和 LQ 处理的焊接接头。

### 1.6 其他方法

此外,还有气动冲击、水压冲击、爆炸冲击等方法可以对材料表面进行强化处理,提高焊接接头材料的力学性能<sup>[25]</sup>。祝陈等<sup>[26]</sup>研究了气动冲击技术对钢桥面板焊接结构残余应力场的影响,研究结果表明:气动冲击可以将焊缝处的残余拉应力转为残余压应力,形成半椭圆形的压应力区,冲击速度和冲击头尺寸对横向应力的影响较大,冲击速度及冲击头尺寸的增大,能提高压应力值大小及压应力区的范围。Srivastava 等<sup>[27]</sup>研究了脉冲水流冲击 304 不锈钢近表面残余应力分布,发现水流冲击也能很好地在焊件中植入压应力。

## 2 结论与展望

目前的研究结果表明,表面强化技术对焊接接头的微观组织和力学性能将会产生显著影响,但是也存在较多的不足之处,今后可以从以下方面加强研究:

(1) 复合表面强化技术。复合表面强化技术是将物理性质和能量传输机制不同的两种及以上的表面强化技术组合在一起,对焊接接头进行处理,既可以充分发挥各自技术的优势,又可以弥补单种强化技术的不足,集成一种全新高效的表面强化技术处理焊接接头,从而显著提高焊接接头的综合性能。

(2) 结合热处理技术。采用热处理-表面强化工艺,进一步提高焊接接头的综合性能,目前这方面的研究技术较少。焊后热处理可以显著减少或消除焊件结构组织和力学性能的不均匀,对焊接接头进行适当的时效热处理可以释放焊接过程产生的残余拉应力,同时也可以促进接头基体中二次析出相的均匀化分布,再经过表面强化处理可以进一步提高焊接接头的综合性能。

(3) 表面强化技术与有限元数值模拟结合,可更好地对焊接结构进行疲劳设计,在实现焊接

结构和产品的轻量化方面具有非常广阔的潜在应用价值。

### 参考文献:

- [1] 彭云,宋亮,赵琳,等.先进钢铁材料焊接性研究进展[J].金属学报,2020,56(4):601-618.
- [2] 陈健,苏金花,张毅梅.《中国制造2025》与先进焊接工艺及装备发展[J].焊接,2016(3):1-5.
- [3] DHAKAL B,SWAROOP S. Review: Laser shock peening as post welding treatment technique [J]. Journal of manufacturing processes 2018,32:721-733.
- [4] HABIBI N,H-GANGARAJ S M,FARRAHI G H,et al. The effect of shot peening on fatigue life of welded tubular joint in offshore structure [J]. Materials and design 2012,36:250-257.
- [5] YANG B,TAN C W,ZHAO Y B,et al. Influence of ultrasonic peening on microstructure and surface performance of laser-arc hybrid welded 5A06 aluminum alloy joint [J]. Journal of materials research and technology 2020,9(5):9576-9587.
- [6] 黄卓笑,张显程,涂善东,等.表面深滚处理对纯镍组织性能及残余应力分布的影响[J].航空材料学报,2016,36(1):39-47.
- [7] 陈怀宁,陈亮山.微量预应变对焊接接头疲劳性能的影响[J].焊接学报,1992(3):193-197.
- [8] 许飞,张侃,陈安.残余应力对搅拌摩擦焊接头裂纹扩展速率的影响[J].电焊机,2019,49(9):110-115.
- [9] HAO Z L,LUO J T,JIN Y B,et al. Application of pre-deformation rolling in the welding heat-affected zone of tailor-welded blanks formed by deep-drawing process [J]. Journal of manufacturing processes 2020,51:151-160.
- [10] 李保军,伍玉娇,龙琼,等.表面强化技术在金属材料中的研究现状[J].热加工工艺,2019,48(6):9-12.
- [11] NASIŁOWSKA B,BOGUSZ P,SKRZECZANOWSKI W. The influence of shot peening on structure and mechanical properties of 5754 aluminium alloy joints welded with TIG method [J]. Procedia structural integrity 2019,23:583-588.
- [12] DIENG L,AMINE D,FALAISE Y,et al. Parametric study of the finite element modeling of shot peening on welded joints [J]. Journal of constructional steel research 2017,130:234-247.
- [13] SOUNDARARAJAN R,ARAVINTH V,VALLARASU M,et al. Mechanical and tribological behavior of friction stir welded joint on AA 8011 at diverse strengthening condition through post processing [J]. Materials today: proceedings 2021,45:936-942.
- [14] 贾子妍.铝/钢异种金属的激光焊接及喷丸对接头组织和性能的影响研究[D].南京:南京理工大学,2019.
- [15] 白易立,王东坡,邓彩艳,等.超声冲击强度对焊接接头疲劳寿命的影响[J].焊接学报,2019,40(12):149-153.
- [16] TANG L Q,INCE A,ZHENG J. Numerical modeling of residual stresses and fatigue damage assessment of ultrasonic impact treated 304L stainless steel welded joints [J]. Engineering failure analysis 2020,108:104277.
- [17] CHEN C,CHEN F R,ZHANG H J. Surface nanocrystallization of 7A52 aluminum alloy welded joint by aging and ultrasonic impact compound treatment [J]. Rare metal materials and engineering 2018,47(9):2637-2641.
- [18] ZHENG J,INCE A,TANG L Q. Modeling and simulation of weld residual stresses and ultrasonic impact treatment of welded joints [J]. Procedia engineering 2018,213:36-47.
- [19] 顾邦平,赖金涛,胡雄,等.高频冲击振动对焊接残余应力的影响研究[J].铁道学报,2018,40(5):150-155.
- [20] ZHANG H J,ZHAO X H,LIU Y. Effect of high frequency impacting and rolling on fatigue crack growth of 2A12 aluminum alloy welded joint [J]. International journal of fatigue 2021,14:106172.
- [21] ZHANG H J,ZHAO X H,XU D S,et al. New insight into high frequency impacting and rolling of 2A12 aluminum welded joint involving nanocrystallization [J]. Applied surface science 2019,488:115-127.
- [22] 张文泉.激光冲击强化不锈钢及焊接件力学性能与组织细化研究[D].镇江:江苏大学,2017.
- [23] 陆金花,冯爱新,陈凤国.激光冲击对45钢-40Cr钢焊接接头组织与性能的影响[J].金属热处理,2017,42(6):101-104.
- [24] SHI H C,SHI L B,DING H H,et al. Influence of laser strengthening techniques on anti-wear and anti-fatigue properties of rail welding joint [J]. Engineering failure analysis 2019,101:72-85.
- [25] HAYASHI M,OKIDO S,SUZUKI H. Residual stress distribution in water jet peened type 304 stainless steel [J]. Quantum beam science 2020,4(2):1-12.
- [26] 祝陈,傅中秋,袁周致远,等.气动冲击对顶板-U肋焊接残余应力的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):42-49.
- [27] SRIVASTAVA M,HLOCH S,GUBELJAK N,et al. Surface integrity and residual stress analysis of pulsed water jet peened stainless steel surfaces [J]. Measurement 2019,143:81-92.

(责任编辑:曾 萍)