

热处理加超声冲击复合处理对 Q345B 钢 焊接接头疲劳性能的影响

王东坡¹, 胡典均¹, 邓彩艳¹, 吴世品², 高志伟¹

(1. 天津大学, 天津, 300072; 2. 天津职业技术师范大学, 天津, 300222)

摘要: 通过对比分析直接超声冲击、普通热处理加超声冲击及真空热处理加超声冲击对 Q345B 钢焊接接头疲劳寿命的影响, 探讨了热处理加超声冲击复合处理对焊接接头疲劳性能的作用机制。结果表明, 普通热处理加超声冲击相较于直接超声冲击, 焊接接头的焊接残余应力虽然有所消除, 但由于材料软化使冲击产生的压应力降低及表面氧化使形成叠型缺陷的风险提高, 疲劳性能有所降低, 且随热处理保温时间延长, 疲劳性能降低得越明显; 真空热处理加超声冲击焊接接头虽然也存在材料软化, 但由于不发生表面氧化加上残余拉应力消除, 相较于直接超声冲击焊接接头的疲劳寿命有所提高, 且疲劳破坏位置由焊趾转移到母材或焊根。

关键词: 超声冲击; 热处理; 疲劳性能; 残余应力

中图分类号: TG 405

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20191106003

0 序言

超声冲击是目前国际上常用的焊接结构疲劳延寿技术之一, 因具有执行机构灵巧、使用灵活方便、效率高、噪音小、成本低、适用性强等优点^[1-2], 广泛应用于实际工程结构中。超声冲击既能够通过冲击头的摆动实现焊趾处平缓过渡, 同时还能够通过表面硬化产生有利的残余压应力^[3]。残余压应力可以增加疲劳裂纹扩展门槛值延迟裂纹起裂^[4], 并降低裂纹扩展速率^[5], 从而提高焊接接头的疲劳寿命。

大量的研究表明超声冲击在提高焊接接头疲劳强度方面效果显著^[6-7]。然而实际服役的焊接结构由于尺寸大、结构复杂往往存在较高的焊接残余拉应力, 焊接残余拉应力的存在将削弱超声冲击改善焊接结构疲劳性能的效果, 而且直接影响超声冲击处理技术应用于实际焊接结构时的工艺制定。张海等人^[8]的研究表明, 与直接超声冲击处理相比, 通过过载拉伸消除残余拉应力后再进行超声冲击处理, 可以显著降低疲劳加载过程中的残余压应力, 进而大幅提高疲劳寿命。目前广泛采用热处理消除焊接残余拉应力。然而, 关于热处理加超声冲

击复合处理对焊接接头疲劳性能影响的研究鲜有报道。

热处理虽然可以降低或消除焊接残余拉应力, 但是热处理也会引起材料软化、表面氧化、脱碳等问题。蒋文春等人^[9]研究表明, Q345 钢经过焊后热处理, 残余应力降低 60%, 同时出现了表面氧化、脱碳现象。热处理后, 焊接接头表面氧化、脱碳和材料软化同样会影响超声冲击改善焊接接头疲劳寿命的效果。因此, 文中对比分析直接超声冲击处理、不同保温时间普通热处理加超声冲击复合处理、真空热处理加超声冲击复合处理对 Q345B 钢焊接接头疲劳寿命的影响, 探讨了热处理加超声冲击复合处理对焊接接头疲劳性能的作用机制。

1 试验方法

为了使焊接接头保留一定的焊接残余应力, 疲劳试件采用非承载纵向角接头, 疲劳试件尺寸如图 1 所示。试验材料为 Q345B 钢, 板厚为 8 mm, 焊接方法为药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊。选用 TME711 焊丝, 直径为 1.2 mm, 母材和焊接材料的力学性能如表 1 所示。为了减小焊接变形, 非承载纵向角接头采用上下对称焊接, 角焊缝为单道焊缝, 焊接参数如表 2 所示。

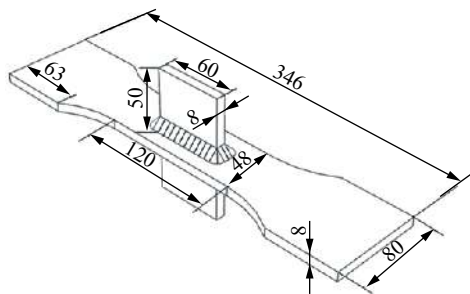


图 1 疲劳试件尺寸 (mm)
Fig. 1 Fatigue specimen size

表 1 Q345B 钢和 TME711 焊丝的力学性能

Table 1 Mechanical properties of Q345B steel and TME 711 welding wire

材料	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
Q345B	409	550	26.5
TME711	480	560	31.0

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

电弧电压 U/V	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	气体流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
23.5	180	5	20

疲劳试件焊接后, 根据 AWS D1. 1-D1. 1M-2015 Structural Welding Code-Steel 中规定的消应力退火热处理工艺消除焊接残余应力. 热处理分为 3 组: 普通热处理保温 2 h、普通热处理保温 4 h、真空热处理保温 2 h, 其中保温 2 h 的热处理工艺曲线如图 2 所示 (热处理保温 4 h 仅在保温时间延长 2 h, 其它参数不变). 热处理后, 采用天津大学自行研制的超声冲击设备对试件焊趾部位进行超声冲击处理. 超声冲击处理参数为: 振幅 $36\text{ }\mu\text{m}$, 频率 17.9 kHz , 冲击速度 40 mm/min , 单根冲击针直径 3 mm . 疲劳试验在 GPS300 型疲劳试验机上进行, 应力比 $R =$

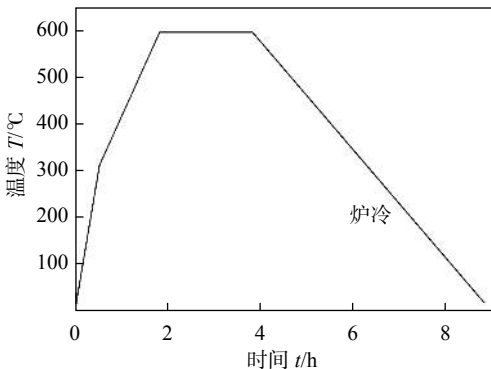


图 2 焊后热处理工艺曲线
Fig. 2 Process curve of post-weld heat treatment

0.1. 疲劳试件共分 4 组: A 组为超声冲击态、B 组为普通热处理 2 h 加超声冲击态、C 组为普通热处理 4 h 加超声冲击态、D 组为真空热处理 2 h 加超声冲击态. 当试件的循环次数达到 1×10^7 周次, 即停止疲劳试验, 认为试件达到疲劳极限, 不再发生断裂.

采用显微硬度计测试焊趾断面沿厚度方向的硬度, 从焊趾近表面开始至心部每隔 0.125 mm 测试一个点, 加载载荷为 1 N , 保载时间为 15 s . 采用 MTS 型万能试验机测试各组试件的拉伸性能, 拉伸试样为 $\phi 5\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 圆棒试样, 拉伸速度为 2 mm/min . 为了分析各组试件经超声冲击后残余应力的变化规律, 采用 PROTO-IXRD-MG40 型残余应力测试仪测试距焊趾 $2 \sim 3\text{ mm}$ 处的残余应力. 同时, 为了分析普通热处理和真空热处理后表面形貌的变化, 采用 Olympus GX51 型光学显微镜及 JEOL7800F 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察超声冲击态、普通热处理 2 h 加超声冲击态、普通热处理 4 h 加超声冲击态和真空热处理 2 h 加超声冲击态试件焊趾断面的微观组织形貌, 腐蚀液为 4%(体积分数) 的硝酸酒精溶液.

2 试验结果

2.1 疲劳试验结果

按照 IIW document XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components 中钢结构循环加载疲劳设计规范的统计方法对疲劳数据进行拟合, 得到 4 组试件的 $S-N$ 曲线如图 3 所示, 并计算平均疲劳强度 (50% 存活率, 循环 2×10^6 周次失效对应的应力范围), 拟合及计算结果如表 3 所示.

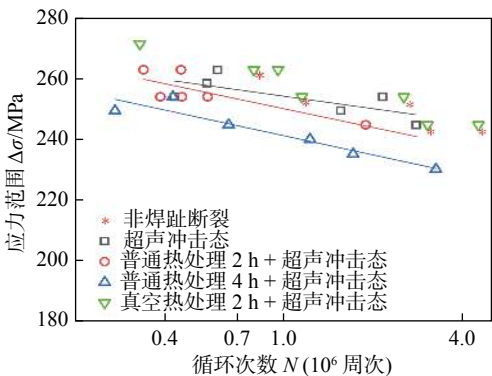


图 3 $S-N$ 曲线
Fig. 3 $S-N$ curves

表 3 S-N 曲线统计参数
Table 3 S-N curves statistical parameters

试件 类型	平均疲劳 强度 R/MPa	S-N曲线 斜率 m	特征值 C_k	标准差 σ
A	246	38.01	2.01×10^{96}	0.316 78
B	239	25.26	7.48×10^{65}	0.187 57
C	230	24.61	1.11×10^{64}	0.134 08

由图 3 及表 3 可以看出, 超声冲击态试件的平均疲劳强度 246 MPa, 相对于直接超声冲击试件的疲劳强度, 普通热处理 2 h 加超声冲击态试件的平均疲劳强度降低 2.8%, 普通热处理 4 h 加超声冲击态试件的疲劳强度降低 6.5%, 而真空热处理 2 h 加超声冲击态试件的疲劳寿命高于其它 3 组, 在应力范围为 260 MPa 下, 接头的疲劳寿命相较于直接超声冲击态提高了 59.4%, 相较于普通热处理 2 h 加超声冲击态提高了 141.7%。疲劳试验结果表明, 与直接超声冲击相比, 普通热处理加超声冲击复合处理试件的疲劳性能有所降低, 且随热处理保温时间延长, 疲劳性能降低越明显; 而真空热处理加超声冲击复合处理有利于进一步提高疲劳性能。此外, 直接超声冲击处理和普通热处理加超声冲击复合处理后试件的起裂位置均在焊趾处; 而真空热处理加超声冲击态试件, 只有两个试样起裂位置位于焊趾处, 且均为高应力区, 其余均为非焊趾起裂, 起裂位置为母材或焊根, 如图 4 所示。由此可知, 真空热处理加超声冲击态试件相较于直接超声冲击态试件, 不仅疲劳寿命有所提高, 而且疲劳起裂位置由焊趾向母材或焊根转移。

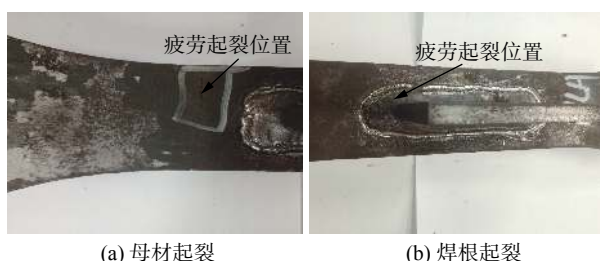


图 4 非焊趾起裂

Fig. 4 Non welded toe crack. (a) parent metal crack ;
(b) welding crack

2.2 硬度和拉伸试验结果

图 5 为不同热处理方式下试样的硬度和拉伸试验结果。图 5a 为不同处理方式下试样的硬度变化曲线。由于超声冲击处理的硬化作用, 不同处理

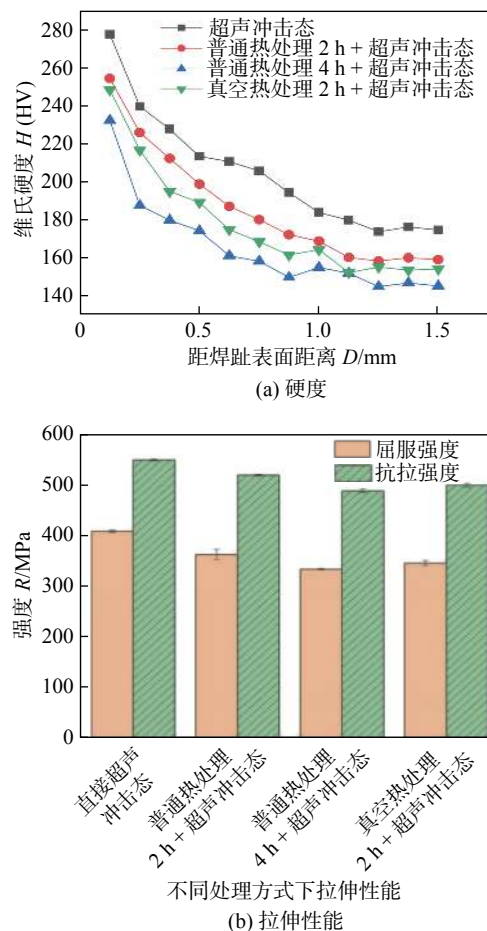


图 5 硬度和拉伸试验结果

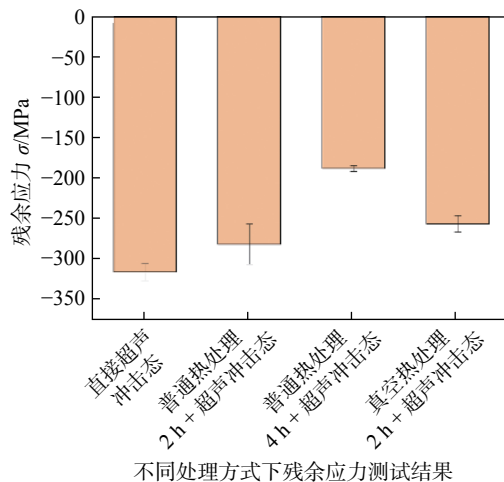
Fig. 5 Hardness and tensile test results. (a) hardness;
(b) tensile property

方式试样焊趾处的表层硬度均明显高于心部, 但由于热处理的软化效果, 热处理加超声冲击态试件焊趾表层硬度低于直接超声冲击态试件。直接超声冲击态试件的表层维氏硬度为 278 HV, 普通热处理 2 h 加超声冲击态试件相较于直接超声冲击态试件下降了 8.3%, 真空热处理 2 h 加超声冲击态试件相较于直接超声冲击态试件降低了 10.4%, 普通热处理 4 h 加超声冲击态试件相较于直接超声冲击态试件下降了 16.3%。由此可知, 经过热处理导致超声冲击产生的硬化层硬度下降。图 5b 为不同热处理方式下试样的拉伸试验结果。直接超声冲击态试件屈服强度为 409 MPa, 抗拉强度为 550 MPa, 普通热处理 2 h 加超声冲击态试件屈服强度和抗拉强度相较于直接超声冲击态试件分别下降了 11.2% 和 5.5%, 真空热处理 2 h 加超声冲击态试件相较于直接超声冲击态试件分别下降了 15.4% 和 9.1%, 而普通热处理 4 h 加超声冲击态试样母材金属屈服强度和抗拉强度最低, 相较于直接超声冲击态试件分别下降

了18.3%和11.1%。热处理会导致材料的强度降低,其中屈服强度的下降更为明显,且随热处理保温时间的延长,屈服强度下降的越多。

2.3 残余应力测试结果

图6为残余应力测试结果。经超声冲击后,焊趾位置均为残余压应力。直接超声冲击处理后的焊趾处的残余压应力为316 MPa,普通热处理2 h加超声冲击态试件为281 MPa,真空热处理2 h加超声



不同处理方式下残余应力测试结果

图6 残余应力

Fig. 6 Residual stress

冲击态试件为256 MPa,普通热处理4 h加超声冲击态试件为188 MPa。残余应力测试结果表明,热处理加超声冲击复合处理产生的残余压应力相较于直接超声冲击处理有所降低,且热处理保温时间越长,残余压应力降低越明显。其中普通热处理2 h加超声冲击和真空热处理2 h加超声冲击产生的残余压应力较为接近。超声冲击处理使材料发生塑性变形,产生的残余压应力可达到材料的屈服强度。从拉伸试验结果可知,普通热处理和真空热处理后材料的屈服强度均降低,进而导致超声冲击处理产生的残余压应力随之降低。

2.4 微观组织分析

图7为直接超声冲击态、普通热处理2 h加超声冲击态和真空热处理2 h加超声冲击态母材区的微观组织形貌。从图7a和图7b可以看出,焊态母材表面有一层铁锈,但整体较为平滑。而普通热处理2 h加超声冲击态的母材表面如图7c和图7d所示,表面的铁锈发生脱落,表面氧化层厚度增加,约为8 μm ,且由于表面氧化导致表面的凹坑和不平整度加剧,表面质量整体降低。真空热处理加超声冲击态试件母材表面的铁锈也发生脱落,但由于不发

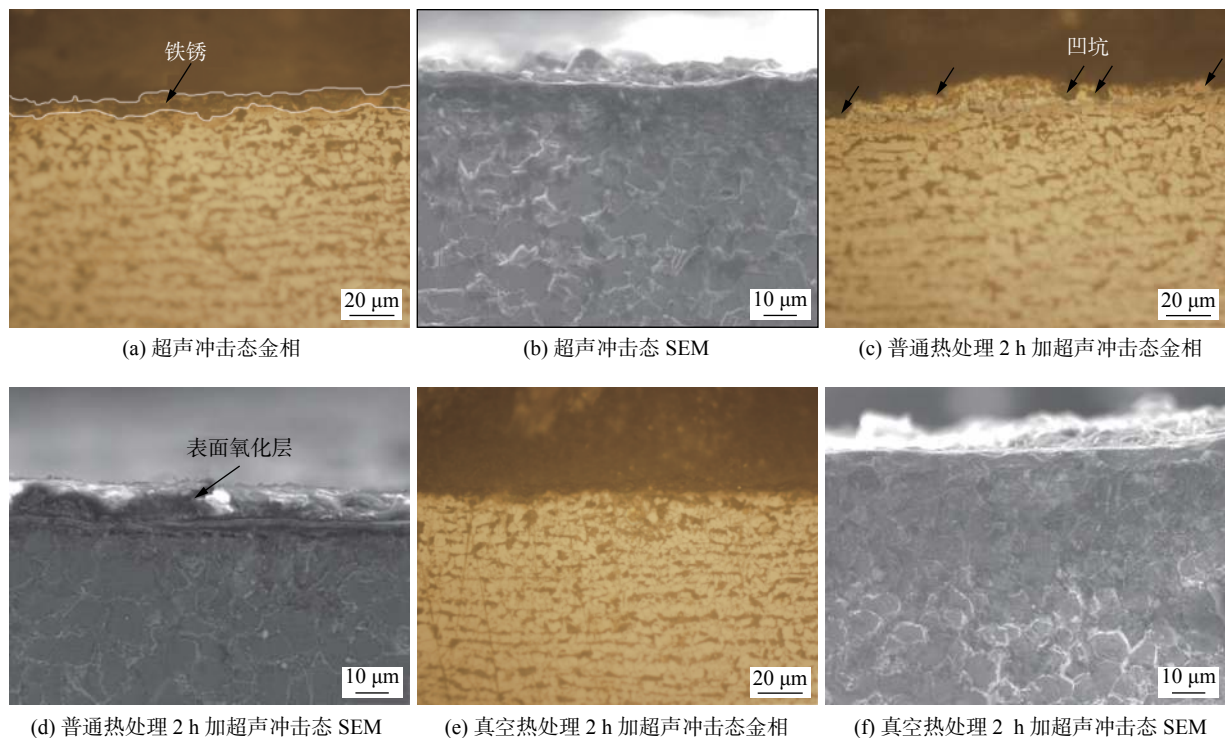


图7 微观组织形貌

Fig. 7 Microstructure morphology. (a) ultrasonic impact state metallography; (b) SEM micrograph of ultrasonic impact state; (c) conventional heat treatment 2 h plus ultrasonic impact state metallographic; (d) SEM micrograph of conventional heat treatment 2 h plus ultrasonic impact state; (e) vacuum heat treatment 2 h plus ultrasonic impact state metallographic; (f) SEM micrograph of vacuum heat treatment 2 h plus ultrasonic impact state

生表面氧化, 所以表面的凹坑和不平整度没有加剧, 表面质量较好。

图 8 为不同热处理后加超声冲击处理复合处

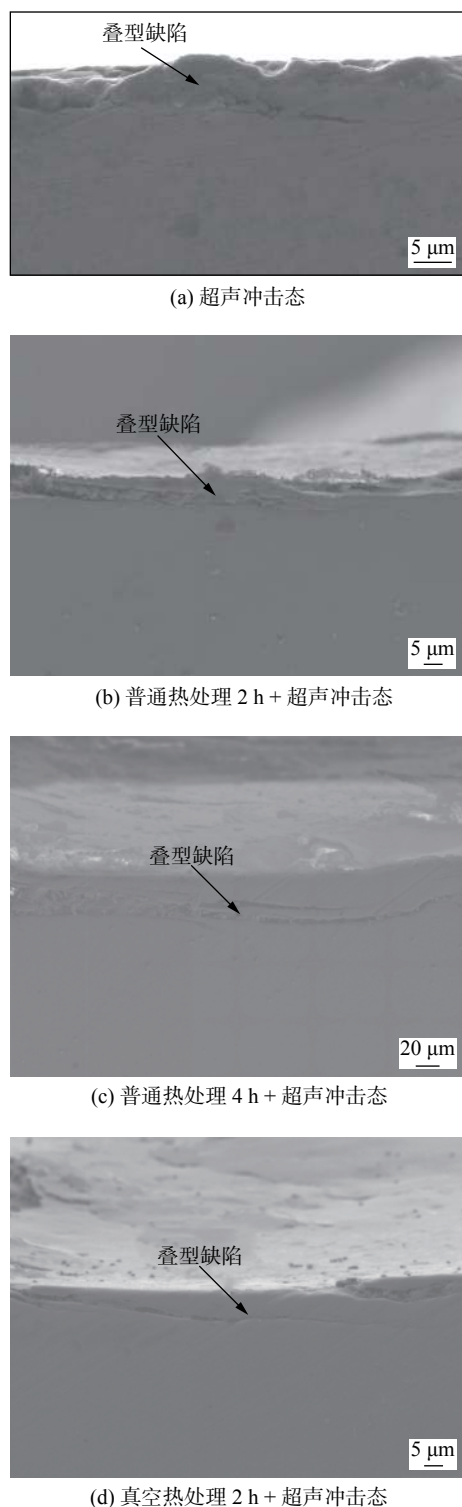


图 8 焊趾断面 SEM 形貌

Fig. 8 SEM morphology of cross-section of weld toe. (a) ultrasonic impact state; (b) conventional heat treatment 2 h plus ultrasonic impact state; (c) conventional heat treatment 4 h plus ultrasonic impact state; (d) vacuum heat treatment 2 h plus ultrasonic impact state

理后焊趾表面缺陷的 SEM 形貌. 从图 8 可以看出, 4 组试件经过冲击后, 在焊趾近表面附近均形成叠型缺陷; 与普通热处理加超声冲击态相比, 直接超声冲击态和真空热处理加超声冲击态生成的叠型缺陷明显减小. 直接超声冲击形成的缺陷近似一条直线, 长度与深度分别为 46 和 6 μm . 普通热处理 2 h 加超声冲击形成的缺陷是圆弧状的曲线, 长度和深度分别达到 98 和 10 μm ; 普通热处理 4 h 加超声冲击形成的缺陷也是圆弧状的曲线, 长度达到 190 μm , 深度达到 35 μm . 而真空热处理 2 h 加超声冲击形成的缺陷相对于普通热处理明显减小, 长度和深度仅为 80 和 8 μm .

3 分析与讨论

对于含焊接残余拉应力试件, 超声冲击形成的残余压应力释放机理: 外加拉应力、焊接残余拉应力与超声冲击形成的平衡拉应力之和超过材料的屈服强度, 试件厚度方向发生较大范围屈服, 残余应力重新分布^[8]. 由于超声冲击形成的压应力主要在厚度方向较小范围实现平衡, 在疲劳加载过程中将优先释放. 因此, 疲劳试件厚度方向存在的残余拉应力越大, 超声冲击产生的残余压应力越容易发生释放. 张海等人^[8]通过过载拉伸消应力再超声冲击的方法显著降低了疲劳加载过程中残余压应力的释放量, 疲劳寿命相较于直接超声冲击处理大幅提高. 通过普通热处理加超声冲击复合处理并没有进一步提高疲劳寿命, 反而比直接超声冲击处理后的疲劳寿命有所下降. 但经过真空热处理加超声冲击复合处理的接头疲劳寿命比直接超声冲击处理提高 59%(应力范围小于 260 MPa).

普通热处理加超声冲击处理后的硬化层硬度、屈服强度及超声冲击产生的残余压应力, 与直接超声冲击态相比均有所下将. 由于超声冲击产生的残余压应力与材料的屈服强度密切相关, 热处理后材料发生软化, 屈服强度降低, 导致超声冲击产生的残余压应力有所下降, 进而会削弱超声冲击改善疲劳寿命的效果. 普通热处理使得材料表面发生氧化, 表面的凹坑增多和不平整度加剧, 表面质量降低. Feng 等人^[10]研究发现, 超声冲击过程中, 原始表面形貌为了匹配冲击针压痕, 通过自我调节粗糙度会形成叠型缺陷. 叠型缺陷与试件原始表面质量有关, 表面质量越差, 越易形成缺陷, 且缺陷的长度

和深度随表面质量的降低而增大。结合图7和图8可知,普通热处理后,试件表面出现的氧化,凹坑和不平整度加剧极大地增加了叠型缺陷产生的风险,进而导致疲劳寿命的降低。因此,普通热处理加超声冲击处理虽然也能消除焊接残余拉应力,有利于疲劳寿命的提高,但是由于材料软化和表面质量降低均会导致疲劳寿命降低。三者综合的结果,最终导致焊接接头的疲劳寿命比直接超声冲击的疲劳寿命短。

尽管真空热处理加超声冲击态也存在材料软化的现象,但由于表面未发生表面氧化、表面质量降低现象,使得叠型缺陷的尺寸降低;另外焊接残余拉应力的消除使疲劳加载过程中超声冲击产生的压应力不易释放,最终疲劳寿命比直接超声冲击有所提高,且疲劳破坏位置由焊趾转移到母材或焊根。

4 结论

(1) 与直接超声冲击处理相比,普通热处理加超声冲击复合处理的焊接接头疲劳性能有所降低,且随热处理保温时间的延长,疲劳性能下降越明显;真空热处理加超声冲击处理比直接超声冲击处理的疲劳性能有所提高,应力范围为260 MPa的疲劳寿命提高了59.4%,且疲劳破坏位置由焊趾转移到母材或焊根。

(2) 由于热处理的软化效果,试件冲击硬化层硬度和屈服强度降低,超声冲击产生的残余压应力降低;同时由于表面氧化和表面不平整度的加剧,增加了叠型缺陷产生的可能性,从而导致普通热处理加超声冲击复合处理后焊接接头的疲劳性能低于直接超声冲击处理后焊接接头的疲劳性能。

(3) 尽管真空热处理加超声冲击复合处理存在软化现象,但由于焊接残余拉应力的消除及材料表面不发生氧化现象,因此相较于直接超声冲击处理疲劳寿命有所提高。

参考文献

- [1] 饶德林,陈立功,倪纯珍,等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 48-50.
- [2] Rao Delin, Chen Ligong, Nie Chunzhen, *et al.* Effect of ultrasonic impact treatment on residual stress of welded structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 48-50.
- [3] Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment[J]. Materials and Design, 2015, 87(8): 1072-1086.
- [4] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤, 等. 超声冲击法提高低碳钢焊接接头疲劳强度的研究[J]. 机械强度, 1999, 21(4): 289-291.
- [5] Wang Dongpo, Huo Lixin, Zhang Yufeng, *et al.* Investigation of improving fatigue strength of welded joints on low carbon steel by ultrasonic peening method[J]. Mechanical Strength, 1999, 21(4): 289-291.
- [6] Cheng X, Fisher J W, Prask H J, *et al.* Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1259-1269.
- [7] Yekta, R T, Ghahremani K, Walbridge S. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 55: 245-256.
- [8] Deguchi Takanori, Mouri Masashi, Hara Junya, *et al.* Fatigue strength improvement for ship structures by ultrasonic peening[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 17(3): 360-369.
- [9] Yildirim H C, Marquis G B. Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 168-176.
- [10] 张海. 基于焊接结构服役行为的超声冲击疲劳延寿技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [11] Zhang Hai. Study on the fatigue life improvement of welded structures by ultrasonic impact treatment under service condition[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [12] 蒋文春, 王炳英, 巩建鸣, 等. 焊接残余应力在热处理过程中的演变[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 45-48, 115.
- [13] Jiang Wenchun, Wang Bingying, Gong Jianming, *et al.* Development of welding residual stress during post-welding heat treatment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 45-48, 115.
- [14] Feng Yanyan, Hu Shengsun, Wang Dongpo, *et al.* Influence of surface topography and needle size on surface quality of steel plates treated by ultrasonic peening[J]. Vacuum, 2016, 132: 22-30.

第一作者简介: 王东坡, 1972年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事焊接结构断裂韧性和疲劳寿命方面的研究工作; 发表论文100余篇; Email: wangdp@tju.edu.cn.
通信作者简介: 邓彩艳, 教授; Email: dengcy@tju.edu.cn.

(编辑: 戴红)