

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0394

激光冲击修复后压力容器钢 Q345R 耐腐蚀 及抗疲劳性能研究*

张 浩¹, 蒋 磊², 岑志波³, 张拔杨¹, 谢作然¹, 朱 珏¹

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市特种设备检验研究院, 浙江 宁波 315211;

3. 宁波计量测试研究院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 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研究。通过电化学实验, 并结合扫描电子显微镜分析其耐腐蚀性。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 倍和 2.6 倍; 微观实验结果表明经过激光冲击后腐蚀试样表面裂纹明显少于未处理试样。但随着冲击次数增加, 耐腐蚀性有所下降。疲劳试验结果显示, 相同应力条件下, 腐蚀 1 和 2 h 的疲劳寿命相较于原试样降低 36.8% 和 56.4%, 经过一次或三次激光冲击后试件的疲劳寿命分别提升 43.8% 和 198.2%, 经 XRD 检测, 激光冲击能在表面形成一定深度的残余压应力层并抑制裂纹扩展。

关键词: 激光冲击强化; 电化学腐蚀; 极化曲线; 疲劳寿命; 微观形貌

中图分类号: O346.2; O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

On corrosion and fatigue resistance of pressure vessel steel Q345R after laser shock repair

ZHANG Hao¹, JIANG Lei², CEN Zhibo³, ZHANG Bayang¹, XIE Zuoran¹, ZHU Jue¹

(1. College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. Ningbo Special Equipment Inspection Research Institute, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

3. Ningbo Institute of Metrology and Testing, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Electrochemical corrosion and fatigue tests were carried out to study the corrosion resistance and fatigue resistance of the pressure vessel material Q345R steel after laser shock peening (LSP). The material was cut into samples of 6 mm×10 mm×10 mm, with water as constraint layer and black tape as absorption layer. Laser shock peening was carried out for 1, 3, 5 and 7 times respectively. The samples were immersed in 3.5% NaCl solution for electrochemical corrosion. Tafel extrapolation method was used to obtain the polarization curves of the corrosion resistance of the reactive materials. The results show that the samples have the best corrosion resistance after a single shock, their corrosion resistances decrease after multiple shocks, the corrosion resistance without black tape decreases more obviously, the black tape serving as absorbing layer can effectively protect the sample from the LSP damage. The micro-observations show that surface cracks on corrosion specimen after LSP were significantly less than those on the untreated sample. S-N curves were obtained by MTS fatigue test of samples after different corrosion time and LSP times. The results show that under the same stress condition, the fatigue life of samples after 1- or 2-hours' corrosion decreased 36.8% and 56.4%, respectively compared with that of the original sample. After one

* 收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2021-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(11972203, 11572162); 宁波市自然科学基金(202003N4152)

第一作者: 张 浩(1996—), 男, 硕士研究生, 1281934177@qq.com

通信作者: 朱 珏(1979—), 女, 博士, 教授, zhuju@nbu.edu.cn

and three shocks, the fatigue life of the specimens increases 43.8% and 198.2%, respectively. X-ray diffraction (XRD) was used to analyze the residual stress on the surface of the sample. It was detected that the residual tensile stress on the surface of the untreated sample is 34.4MPa, and the residual compressive stresses on the surface of samples after one and three shocks were 205.6 and 288.5 MPa, respectively. It indicates that the residual compressive stress layer with a certain depth was formed on the surface, which inhibited the crack propagation and improved the fatigue life.

Keywords: laser shock peening; electrochemical corrosion; polarization curve; fatigue life; micromorphology

生物质能一直是人类赖以生存的重要能源之一,也是唯一的可再生碳资源,是国际上化石能源的主流替代品^[1]。目前生物质炭化的主要技术包括热解炭化技术^[2-3]、微波炭化技术^[3-4]、水热炭化技术^[5-6]等。炭化设备需要长时间承受高温高压以及各种介质的侵蚀,因此压力容器往往会受到多重的失效形式,腐蚀和疲劳是材料失效最主要的原因,而且这两种主要的失效形式都始于材料表面。压力容器需要在密封环境下工作,如果出现裂纹造成泄露会引起安全事故,严重时甚至引起爆炸威胁生命安全。

目前压力容器防腐措施主要有使用缓蚀剂、电化学防护、表面涂层处理、提高焊缝质量和强化衬里防护,这些方法各有优缺点,因此研究新型绿色环保的防腐技术具有重要意义^[7]。激光冲击强化 (laser shock peening, LSP) 是一种新的材料表面强化技术,能在材料表面产生塑性变形,有效改善材料的微观组织^[8],提高其力学性能^[9],减少或延迟裂纹的形成和扩展,提高金属材料的疲劳寿命^[10]、耐磨性和耐腐蚀性^[11]。不同于传统喷丸强化技术,激光冲击强化不会造成畸变和机械损伤,不改变表面粗糙度,无污染且适用性广^[12]。目前还未见到中国对 Q345R 钢的激光冲击强化研究,对激光冲击强化后性能的研究主要集中在镁铝合金以及不锈钢上。李兴成等^[13]研究了 AZ31 镁合金在激光冲击后的抗腐蚀性能,研究表明激光冲击后残余压应力可明显提高 AZ31 镁合金的抗应力腐蚀敏感性,但抗腐蚀性能并未提高;汪军等^[14]对 304 钢进行激光冲击强化发现,激光冲击处理能使裂纹源移至试样内部,降低裂纹扩展速率,提升疲劳寿命。本文以压力容器钢 Q345R 为研究对象,通过电化学实验,研究不同参数激光冲击强化对 Q345R 耐腐蚀性能以及疲劳寿命的影响。

1 激光冲击强化实验

1.1 激光冲击原理

激光冲击强化原理如图 1 所示^[15]。通过聚焦透镜,将高功率密度、短脉冲的激光束汇聚成毫米尺度的光斑辐射到材料表面;表面吸收层气化并电离生成高温高压等离子体,在约束层的作用下向材料内部产生一个高压高应力冲击波,其峰值压力远大于材料的动态屈服强度;材料表面产生塑性变形,表层晶粒细化并形成一定深度的残余压应力层^[16]。

本实验采用 YS100-R200A 激光器,波长为 1 024 nm,脉冲宽度为 20 ns,频率为 10 Hz,光斑直径为 3 mm。以水为约束层,以黑胶为吸收层,搭接率为 50%^[17],搭接方式见图 2。

试样材料为 Q345R 钢,常温下屈服强度和抗拉强度分别为 438 和 548 MPa。将钢材切割成厚度为 6 mm,表面 10 mm×10 mm 的方样,将表面打磨至粗糙度 $R_a=0.8 \mu\text{m}$ 。根据激光冲击强化次数和有无吸收层进行分组,试样表面通过涂

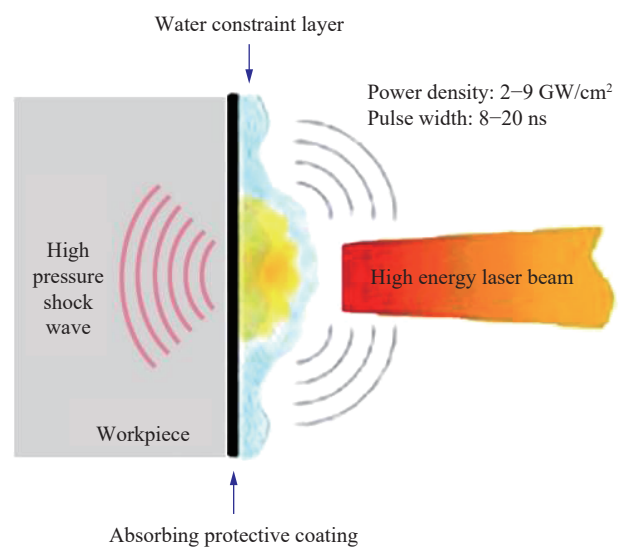


图 1 激光冲击原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser shock

覆黑胶带作为吸收层, 并且每次激光冲击后重新更换黑胶带。表面经过激光冲击强化后的试样见图 3。激光冲击后表面留下多个排列规则的凹坑, 无黑胶带保护的试样在多次冲击后表面有明显损伤, 黑胶带能起到缓冲作用保护试样表面。

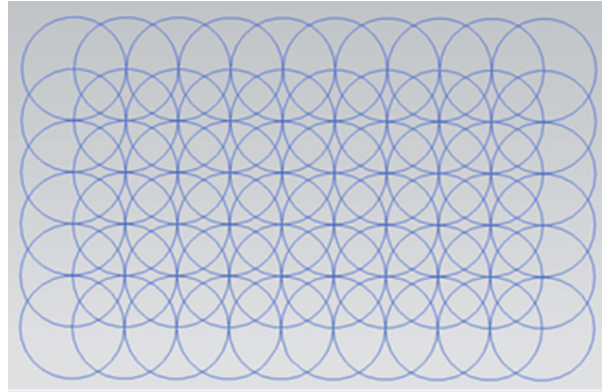
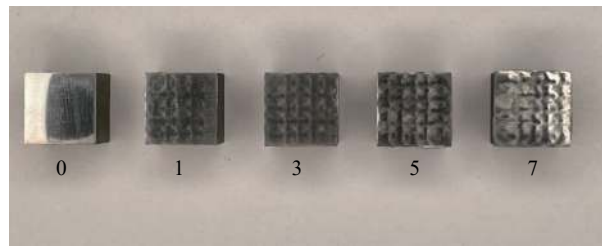
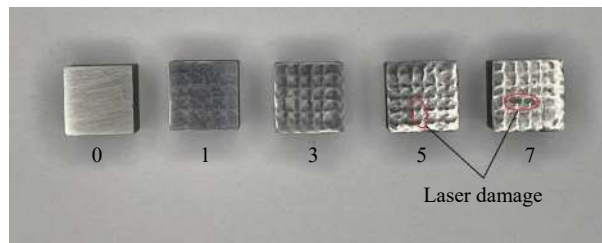


图 2 50% 搭接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 50% lapping



(a) Different times of LSP samples with an absorbing layer



(b) Different times of LSP samples without an absorbing layer

图 3 激光冲击处理后的试样

Fig. 3 The samples after laser shock peening treatment

2 电化学实验

2.1 电化学实验概述

本节对不同次数激光冲击后 Q345R 的耐腐蚀性能进行测试与分析。图 4 给出了电化学实验原理, 主要由工作电极、辅助电极和饱和甘汞电极 3 个部分组成。图中, 工作电极是需要测试的 Q345R 样品, 电解液为 250 ml 的 NaCl 溶液 (NaCl 质量分数为 3.5%)。通过电化学工作站, 对试样进行电化学腐蚀测试。在电化学测试中, 溶液温度保持在室温, 每次实验结束都更换电解液来保证实验的准确性。每组用不同次数的激光冲击 (0 次, 1 次, 3 次, 5 次, 7 次), 强化处理的样品用铜线连接, 并依次用 703 和 704 胶进行封装并留出尺寸为 8 mm×8 mm 的工作面。采用 Tafel 外推法^[18], 从获得的极化曲线来研究经激光冲击后试样的耐腐蚀性能。

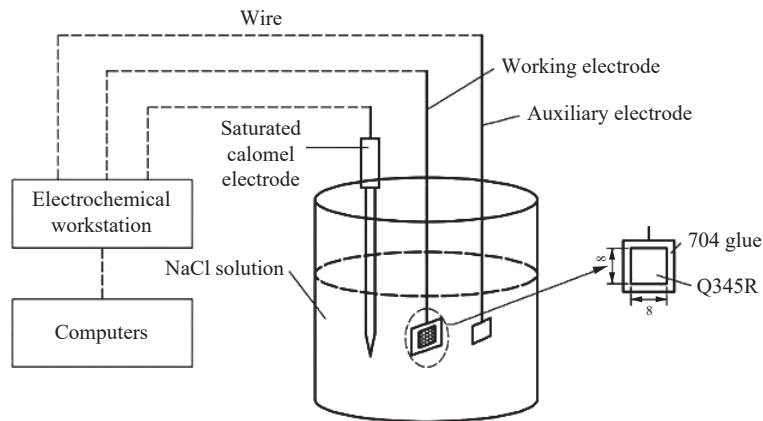


图 4 电化学测试原理(单位: mm)

Fig. 4 Electrochemical test system (unit: mm)

2.2 冲击后动电位极化曲线分析

电位极化曲线是针对低阻抗试样获得相对应的电化学信号。开路电位以 0.5 mV/s 的速度从 -1.4 V 到 0.4 V 进行扫描获得试样电流随着电压的变化曲线。没有吸收层和有吸收层保护的 Q345R 钢的极化曲线分别如图 5 和图 6 所示, 纵坐标电流密度是单位面积上通过的电流大小, 图中电流密度最低点对应的是腐蚀电位, 曲线左半段是 Tafel 阴极部分, 扫描电压小于腐蚀电位时, 外加电压对试样起保护作用; 扫描电压大于腐蚀电位时, 试样失去电子, 金属腐蚀溶解。电流密度是反应速率的体现, 电流密度越大反应越快, 金属腐蚀越快。

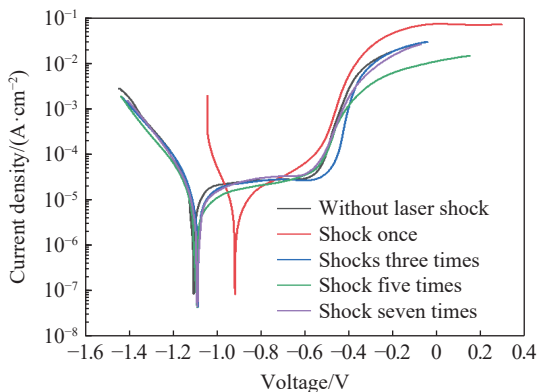


图 5 不同次数激光冲击下无吸收层保护的 Q345R 极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of Q345R without absorption layer protection under different laser shocks

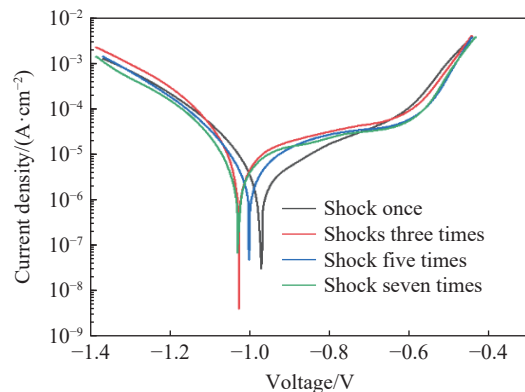


图 6 不同次数激光冲击下有吸收层保护的 Q345R 极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of Q345R with absorption layer protection under different laser shocks

从图 5 可以看出, 在没有黑胶带保护的情况下, 1 次激光冲击后曲线向右移动, 腐蚀电位在 -0.9 V 左右, 相比多次冲击和未处理试样腐蚀电位 -1.1 V 高了 0.2 V 左右, 而腐蚀电位反映了材料腐蚀的难易程度, 电位越高越难发生腐蚀。采用 Tafel 外推法对动电位极化曲线 (potentiodynamic polarization curve, PD) 的线性段数据进行拟合, 可得^[19]:

$$\eta = a + b \lg i \tag{1}$$

式中: η 为过电位, i 为电流密度, a 和 b 为常数。

金属腐蚀速率可用腐蚀失重速率 $V(g/(m^2 \cdot h))$ 或腐蚀深度速率 $d(mm/a)$ 表征。结合式 (1) 和法拉第定律, 可以计算出金属的腐蚀失重速率 V ^[19]:

$$V = \frac{M}{nF} i_0 = 3.73 \times 10^2 \frac{M}{n} i_0 \quad (2)$$

式中: i_0 为腐蚀电流密度(A/cm²); M 为金属的摩尔质量(g/mol); n 为金属的原子价; F 为法拉第常数, 代表每摩尔电子携带的电荷; ρ 为金属的密度(g/cm³)。

而在工程上, 金属腐蚀情况采用反映构件变薄特征的腐蚀深度速率 d 来描述相比于采用腐蚀失重速率 V 更加合适^[20]:

$$d = \frac{V}{\rho} = 3.28 \times 10^3 \frac{M}{n\rho} i_0 \quad (3)$$

式中: ρ 为金属的密度(g/cm³)。对于本文采用的碳钢材料: $M=56$ g/mol, $n=2$, $\rho=7.8$ g/cm³。

使用电化学工作, 将动电位极化曲线输入到软件中进行自动分析, 计算出腐蚀速率 d , 不同冲击次数下的腐蚀速率, 见表 1。

表 1 不同激光冲击次数下有无吸收层保护的 Q345R 腐蚀速率

Table 1 Corrosion rate of Q345R with or without absorption layer protection at different LSP times

冲击次数	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	
	无吸收层	有吸收层
0	0.9087	0.9087
1	0.2555	0.1335
3	0.4862	0.3738
5	0.6104	0.3286
7	0.7237	0.3125

2.3 实验结果分析

有吸收层和无吸收层的试样都在经过一次激光冲击后耐腐蚀性能最好, 相比于未处理试样耐腐蚀性能分别提升 5.81 和 2.56 倍。有吸收层保护的试样在多次冲击后腐蚀速率略微上升, 最后稳定在 0.32 mm/a 左右, 见图 7。无吸收层的试样随着冲击次数增加腐蚀速率不断上升, 并不断向未处理试样腐蚀速率接近。

图 8 是激光冲击后的试样微观形貌, 表面在激光冲击下形成残余压应力, 且在厚度约为 350 μm 的晶粒细化区域内形成了大量位错和孪晶, 使得耐腐蚀性提升。图 8(a) 和图 8(b) 是 7 次冲击后试样表层和深层微观形貌图, 表层晶粒细化明显, 深层微观形貌变化不大。多次冲击后表面完整性下降、残余应力分布不均匀, 表面凹凸不平。随着冲击次数增加, 表面粗糙度增加: 未处理试样粗糙度 $R_a=0.87$ μm; 有黑胶保护经 1、3、5、7 次冲击后粗糙度 $R_a=1.18, 1.66, 2.19, 2.34$ μm; 无黑胶保护经 1、3、5、7 次冲击后粗糙度 $R_a=1.37, 2.03, 2.78, 3.11$ μm。粗糙度随着冲击次数逐渐增加且没有黑胶层作为保护时粗糙度增加更明显。无吸收层的试样经激光多次冲击后, 材料表面会出现损伤^[21], 导致耐腐蚀性进一步下降。图 8(c) 是 7 次冲击后试样横截面微观图, 多次冲击后表面完整性下降、残余压应力分布不均匀、粗糙度增加, 表面凹凸不平更容易聚集氯离子加快腐蚀速率。

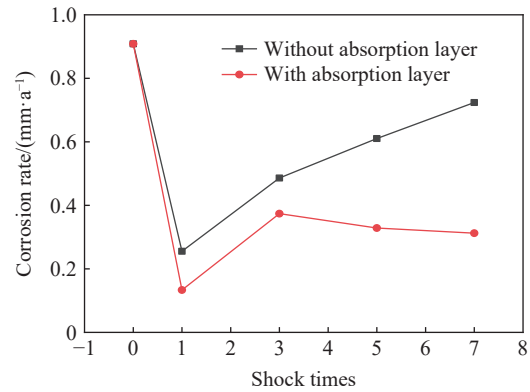


图 7 不同冲击次数下有无吸收层保护的 Q345R 的绝对腐蚀速率

Fig. 7 The absolute corrosion rate of Q345R with and without absorption layer protection at different impact times

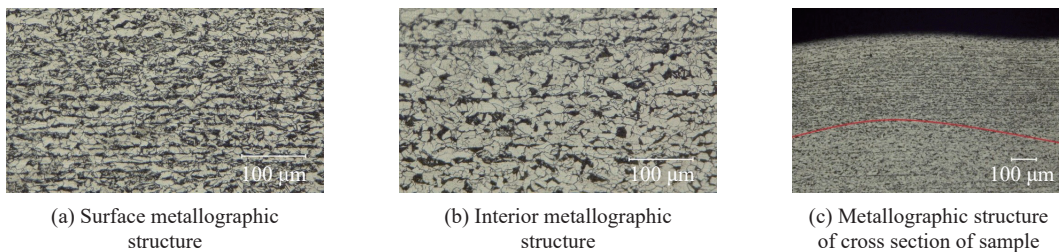


图 8 激光冲击后金相组织

Fig. 8 Metallographic structures after LSP

3 预腐蚀试样疲劳实验

3.1 试样制备

疲劳实验采用和上述实验相同的 Q345R 材料, 试样根据国家标准^[22] 进行设计, 如图 9 所示。

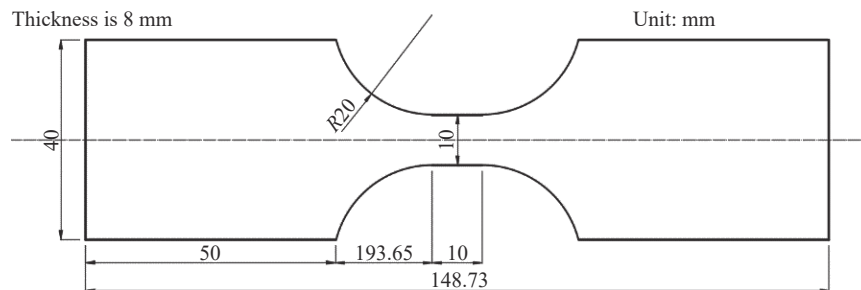


图 9 疲劳试样尺寸

Fig. 9 The size of the fatigue specimen

电源正极通过导线连接腐蚀试样, 负极连接不锈钢作为惰性电极, 连接时用有机硅胶进行密封。将腐蚀试件和惰性电极共同置于质量分数为 10% 的醋酸溶液中, 再补入质量分数为 3.5% 的氯化钠形成电解池来腐蚀。用绝缘黑胶对腐蚀试样的两端进行密封, 中间待腐蚀区域裸露于电解液溶液中。腐蚀试验过程符合国家标准^[23], 腐蚀后疲劳试样如图 10 所示。

3.2 疲劳实验结果

以原试件、腐蚀 1 h、腐蚀 2 h、激光冲击 1 次、激光冲击 3 次做五组对比试验, 每组采集 6 个有效点的应力状态绘制应力-疲劳寿命曲线^[24]。应力比为-1, 采用正弦波加载, 实验结果见下图 11。

在同一水平拉伸应力下, 试样疲劳寿命随腐蚀时间提升而下降, 腐蚀 1 h 的试样在 289.5 MPa 的应力下寿命约为 18 万次; 腐蚀 2 h 的试样在 288.5 MPa 的应力下寿命约为 13 万次; 与未腐蚀试样在 287.5 MPa 应力下 28.5 万次的寿命相比较, 疲劳寿命分别减少了 36.8% 和 54.4%。疲劳失效总是由最高的应力和应变、位向最薄弱晶粒或夹杂等缺陷处起始, 并沿着一定的结晶面扩展; 而经过腐蚀后使得原本存在的缺陷更加突出, 应力集中现象更加严重, 裂纹更容易发生扩展造成疲劳失效。

采用 XRD 沿试样表面深度方向测得残余应力。未处理试样表面残余拉应力 34.4 MPa, 这是由于机械加工和打磨时留下的应力, 一般厚度在 30 μm 左右, 在振动过程中会快速释放。1 次冲击后表面残余压应力为 205.6 MPa, 3 次冲击后表面残余压应力为 288.5 MPa。1 次冲击后残



图 10 腐蚀后疲劳试样

Fig. 10 Fatigue specimens after corrosion

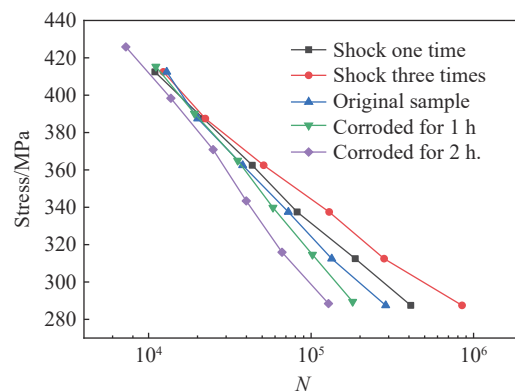


图 11 不同表面状态下 Q345R 的疲劳寿命(N)

Fig. 11 Fatigue life (N) of Q345R under different surface conditions

余压应力提升明显, 3 次冲击相比 1 次冲击残余压应力增加幅度较小, 通过喷丸、激光冲击等外部手段加强金属表面残余压应力所能达到的强度为材料屈服强度的 70% 左右^[25]。3 次冲击后造成组织细化层在 280 μm 左右, 而 1 次冲击细化层在 200 μm 左右。材料在疲劳载荷实验时需要抵抗外部拉应力引起的表面微小裂纹的扩展, 残余压应力可以抵抗外部载荷引起的拉应力阻滞裂纹扩展, 3 次冲击残余压应力比 1 次冲击提升约 82.9 MPa, 残余压应力作用深度增加 80 μm 。采用 XRD 沿试样表面深度方向测得残余应力。未处理试样表面残余拉应力 34.4 MPa, 这是由于机械加工和打磨时留下的应力, 一般厚度在 30 μm 左右, 在振动过程中会快速释放。1 次冲击后表面残余压应力 205.6 MPa, 3 次冲击后表面残余压应力 288.5 MPa。1 次冲击后残余压应力提升明显, 3 次冲击相比 1 次冲击残余压应力增加幅度较小, 通过喷丸、激光冲击等外部手段加强金属表面残余压应力所能达到的强度为材料屈服强度的 70% 左右^[25]。3 次冲击后造成组织细化层在 280 μm 左右, 而 1 次冲击细化层在 200 μm 左右。材料在疲劳载荷实验时需要抵抗外部拉应力引起的表面微小裂纹的扩展, 残余压应力可以抵抗外部载荷引起的拉应力阻滞裂纹扩展, 3 次冲击残余压应力比 1 次冲击提升约 82.9 MPa, 残余压应力作用深度增加 80 μm 。

4 结 论

本文主要对多次激光冲击修复后的压力容器 Q345R 材料进行抗电化学腐蚀和抗疲劳性能的研究。改变激光冲击的工艺参数与冲击次数, 通过对激光冲击强化后的试样进行电化学腐蚀实验, 分析了激光冲击强化对试样耐腐蚀性能的影响, 并进行疲劳实验比较激光冲击和腐蚀对材料疲劳强度的影响。

(1) 激光冲击后能明显提升 Q345R 表面耐腐蚀性能, 在冲击 1 次时电流密度明显减小, 耐腐蚀性提升; 但表面完整性随着冲击次数增加而下降, 导致多次冲击的耐腐蚀性下降。

(2) 激光冲击在有黑胶作为吸收层时防腐蚀效果较无吸收层好, 无吸收层多次冲击后粗糙度增加更显著, 缺少黑胶作为缓冲的试样表面凹凸更加明显, 更容易造成局部腐蚀。

(3) 试样在激光冲击后表层晶粒细化, 残余压应力在多次冲击后接近材料屈服强度, 表面存在的压应力可以有效减缓机械拉应力造成的裂纹扩展, 提升材料的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 马隆龙, 唐志华, 汪丛伟, 等. 生物质能研究现状及未来发展策略 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(4): 434–442. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.008.
MA L L, TANG Z H, WANG C W, et al. Research status and future development strategy of biomass energy [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(4): 434–442. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.008.
- [2] BRIDGWATER A V, MEIER D, RADLEIN D. An overview of fast pyrolysis of biomass [J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(12): 1479–1493. DOI: 10.1016/S0146-6380(99)00120-5.
- [3] MAŠEK O, BUDARIN V, GRONNOW M, et al. Microwave and slow pyrolysis biochar: comparison of physical and functional properties [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 100: 41–48. DOI: 10.1016/j.jaap.2012.11.015.
- [4] GRONNOW M J, BUDARIN V L, MAŠEK O, et al. Torrefaction/biochar production by microwave and conventional slow pyrolysis: comparison of energy properties [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 144–152. DOI: 10.1111/gcbb.12021.
- [5] LIU Z G, QUEK A, HOEKMAN S K, et al. Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization [J]. *Fuel*, 2013, 103: 943–949. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.07.069.
- [6] THEEGALA C S, MIDGETT J S. Hydrothermal liquefaction of separated dairy manure for production of bio-oils with simultaneous waste treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 456–463. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.12.061.
- [7] 沈书乾, 郭福平, 李海三, 等. 化工压力容器腐蚀影响因素及防腐策略 [J]. *石油化工设备*, 2017, 46(2): 59–63. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7466.2017.02.013.
SHEN S Q, GUO F P, LI H S, et al. Influence factors of corrosion of pressure vessels in chemical industry and corrosion protection strategy [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2017, 46(2): 59–63. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7466.2017.02.013.

- [8] MONTROSS C S, WEI T, YE L, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(10): 1021–1036. DOI: 10.1016/S0142-1123(02)00022-1.
- [9] OCAÑA J L, MORALES M, GARCÍA-BALLESTEROS J J, et al. Laser shock microforming of thin metal sheets [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5633–5636. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.10.084.
- [10] 葛茂忠, 张永康, 项建云. 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2925–2930. DOI: 10.3788/CJL20L03711.2925.
- GE M Z, ZHANG Y K, XIANG J Y, et al. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2925–2930. DOI: 10.3788/CJL20L03711.2925.
- [11] 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(12): 15–19. DOI: 10.3788/LOP20084512.0015.
- LI W, LI Y H, HE W F, et al. Development and application of laser shock processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(12): 15–19. DOI: 10.3788/LOP20084512.0015.
- [12] 吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 激光冲击强化技术的应用现状与发展 [J]. *光电工程*, 2018, 45(2): 170690. DOI: 10.12086/oee.2018.170690.
- WU J J, ZHAO J B, QIAO H C, et al. The application status and development of laser shock processing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170690. DOI: 10.12086/oee.2018.170690.
- [13] 李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403002. DOI: 10.3788/cjl201441.0403002.
- LI X C, ZHANG Y K, LU Y L, et al. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0403002. DOI: 10.3788/cjl201441.0403002.
- [14] 汪军, 李民, 汪静雪, 等. 激光冲击强化对 304 不锈钢疲劳寿命的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102003. DOI: 10.3788/CJL201946.0102003.
- WANG J, LI M, WANG J X, et al. Effects of laser shock processing on fatigue life of 304 stainless steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102003. DOI: 10.3788/CJL201946.0102003.
- [15] 车志刚, 史一宁, 唐楠, 等. 激光诱导等离子体在材料表面强化中的应用 [J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 465–468. DOI: 10.3788/AL20133304.465.
- CHE Z G, SHI Y N, TANG N, et al. Applications of plasma induced by laser shock on surface treatment [J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 465–468. DOI: 10.3788/AL20133304.465.
- [16] THORSLUND T, KAHLEN F J, KAR A. Temperatures, pressures and stresses during laser shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 39(1): 51–71. DOI: 10.1016/S0143-8166(02)00040-4.
- [17] 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, 53. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.001.
- 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, 53. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.001.
- [18] 周颖, 马晓录, 高顺. Tafel 外推法测定镁电极材料腐蚀速率 [J]. *科技展望*, 2016, 26(5): 88. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8289.2016.05.075.
- [19] MCCAFFERTY E. Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method [J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(12): 3202–3215. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.05.046.
- [20] 郑波. 循环冷却水中微生物对金属腐蚀的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012. DOI: 10.7666/d.D323733.
- ZHENG B. Research on metal corrosion by microorganisms in circulating cooling water [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. DOI: 10.7666/d.D323733.
- [21] 刘世伟. 激光冲击处理技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000. DOI: 10.7666/d.y348172.
- [22] 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法: GBT 15248—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 金属和合金的腐蚀试验一般原则: GB/T19291—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [24] SCHÜTZ W. A history of fatigue [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1996, 54(2): 263–300. DOI: 10.1016/0013-7944(95)00178-6.
- [25] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys: application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 210(1/2): 102–113. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10084-9.

(责任编辑 王小飞)