

表面压应力对 10Ni5CrMoV 钢疲劳性能的影响

薛 钢

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所,河南 洛阳 471039)

摘 要:分别采用精磨和冲击加工在 10Ni5CrMoV 钢试样表面形成不同的残余压应力,对具有不同表面压应力的试样进行高周和低周疲劳试验,采用扫描电子显微镜对疲劳断口进行分析,并测试经不同周次高应变幅循环加载后的试样表面应力。结果表明,较高的表面压应力能有效抑制小应力幅下疲劳裂纹在表面的起裂,从而有效的提高了高周疲劳性能;在高应变幅作用下,初始的表面压应力迅速发生松弛而失去对疲劳裂纹在表面起裂的抑制作用,因而对低周疲劳性能无明显影响。

关键词:表面压应力;高周疲劳;低周疲劳;应力松弛

中图分类号: TG 142.1*2 **文献标识码:** A

焊接接头的疲劳破坏是焊接钢结构失效的重要形式,为提高焊接接头的疲劳性能,研究人员提出了在焊趾处进行锤击、针击、碾压、喷丸等工艺措施,人们将由此改善焊接接头疲劳性能的原因归功于将焊趾处的焊接残余拉应力改变为很高的残余压应力^[1-6]。但大部分研究人员忽略了这些工艺的另一个作用,即改善了焊趾处的几何外形,降低了其应力集中程度;另外,人们对残余应力对疲劳性能影响的关注主要集中在高周疲劳范畴,而残余应力对低周疲劳性能的影响则未见有太多研究,尤其是高强钢。因此,残余压应力对疲劳性能的影响并未得到全面而准确的评估。

本文通过不同的表面加工工艺在圆形截面试样表面引入初始压应力,研究了表面压应力对屈服强度大于 785MPa 级的 10Ni5CrMoV 钢高、低周疲劳性能的影响及其作用机理。

1 试验材料与方法

试验材料为板厚为 26 mm 的 10Ni5CrMoV 钢板,将试样加工成两组如图 1 所示的疲劳试样,采用圆形截面试样目的是排除试样几何外形

不连续导致应力集中这一影响因素。一组试样在精车加工后采用精磨方式对表面进行精加工,另一组则在精车加工后采用表面冲击加工设备对表面进行高频冲击加工,使试样表面产生高压应力层。采用 2904-A1 型 X-射线应力仪对表面应力的测试结果表明,不同的表面加工工艺在试样表面引入了不同的初始压应力:精磨加工试样的表面轴向压应力值为 478MPa,冲压加工试样的表面轴向压应力值则高达 813MPa。

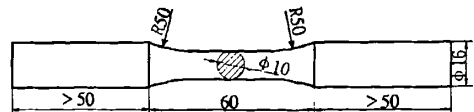


图1 疲劳试样形状与尺寸

分别按标准 GB 3075-82《金属轴向疲劳试验方法》和 GB/T 15248-94《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》对两组试样进行高周和低周疲劳试验,高周疲劳试验采用应力控制,应力比为 -1,频率为 10Hz;低周疲劳试验采用应变控制,应变比为 -1,频率为 0.3Hz。采用 Quanta 600 型扫描电子显微镜(SEM)对典型的疲劳断口进行分析。

为了研究表面应力层在高应变循环加载过

收稿日期:2008-11-24

作者简介:薛钢,男,1978年生,工学硕士,工程师。主要从事船用高强钢的应用研究工作,发表论文10余篇。

程中的变化情况,从两组试样中各选定一件试样进行应变幅值为 $\pm 0.8\%$ 的循环加载,每隔一定循环次数后采用 2904 - A1 型 X - 射线应力仪对表面应力进行测量。

2 结果与分析

2.1 表面压应力对疲劳性能的影响

高周疲劳试验结果表明,表面压应力能有效提高 10Ni5CrMoV 钢的高周疲劳性能,如图 2 所示,在相同的疲劳载荷下,表面压应力值高的试样比压应力值低的试样疲劳寿命平均提高了 186%;低周疲劳试验结果表明,表面压应力值的高低对低周疲劳性能无明显影响,如图 3 所示,不同表面压应力状态的试样在不同应变幅下的疲劳寿命基本相当。

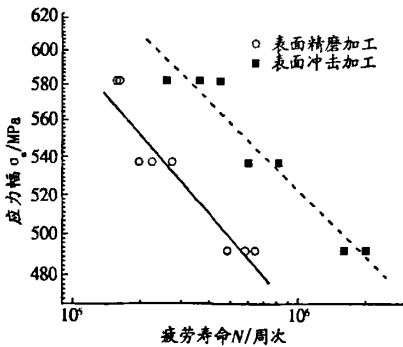


图2 高周疲劳 S - N 曲线

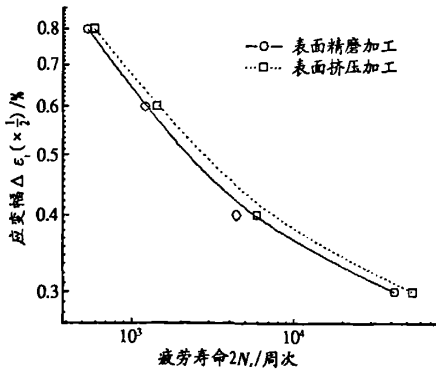


图3 低周疲劳 $\Delta \epsilon_r / 2 - 2N_f$ 曲线

2.2 表面压应力对疲劳裂纹源的影响

对高周疲劳断口的 SEM 分析结果表明,表面压应力的不同改变了高周疲劳裂纹源位置:低初始压应力值试样的疲劳裂纹起源于试样表面,如图 6

和图 7 所示;高初始压应力值试样疲劳裂纹则起源于试样内部夹杂物处,如图 5 所示。对低周疲劳断口的 SEM 分析结果表明,不同大小的表面初始压应力对低周疲劳裂纹源位置无影响,所有试样的低周疲劳裂纹均起源于试样表面,如图 6 和图 7 所示。

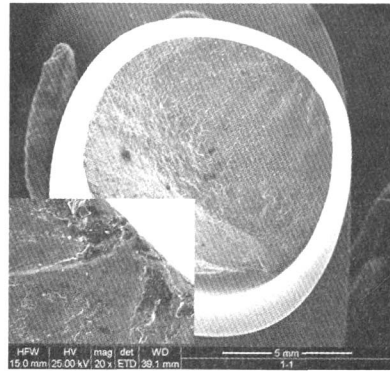


图4 低初始压应力试样高周疲劳断口

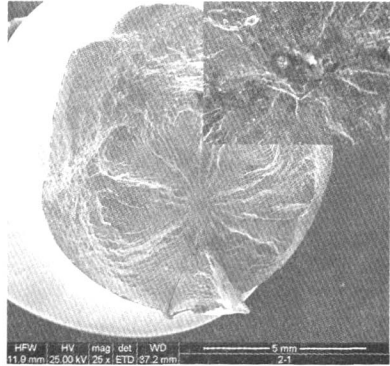


图5 高初始压应力试样高周疲劳断口

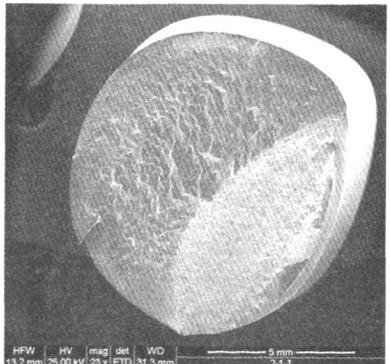


图6 低初始压应力试样低周疲劳断口

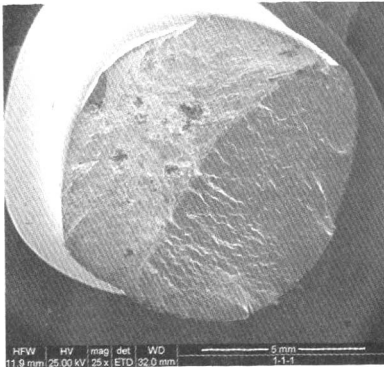


图7 高初始压应力试样低周疲劳断口

2.3 高应变幅循环加载条件下表面应力的变化

在高应变幅循环加载条件下,表面压应力随着循环载荷的施加而迅速松弛,降至较低的应力水平,如图8所示:在经历了5次循环加载后,精磨加工试样的表面轴向压应力值由加载前的478MPa降至31MPa,冲击加工试样的表面轴向压应力值则由加载前的813MPa降至160MPa;经过55次循环后,精磨加工试样的表面轴向压应力值进一步降低至22MPa,冲击加工试样的表面轴向压应力值进一步降低至91MPa。

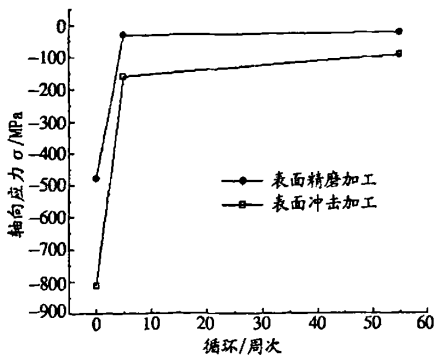


图8 表面应力值随循环周次的变化

3 讨论

疲劳裂纹的起源遵循在薄弱部位优先起裂的竞争模式。钢的内部缺陷如夹杂物等位置由于应力集中而成为疲劳裂纹源,材料表面是天然的面缺陷,在循环应力作用下,表面比内部更容易发生滑移,形成凹槽、凸脊而导致疲劳裂纹的产生。在目前的冶炼和轧制水平下,钢中的夹杂物被控制在很低的含量和很小的尺寸,因此,在

试样表面和内部的应力状态基本一致的情况下,疲劳裂纹在材料内部夹杂物起裂时的寿命要远高于在试样表面的起裂寿命,在这种条件下疲劳裂纹一般均优先起源于试样表面并向内部扩展形成断裂。

在表面存在较高的残余压应力时,当疲劳载荷较小、在试样上形成的工作拉应力极值小于试样表面存在的残余压应力值时,残余应力不易随疲劳载荷的循环加载而松弛,同时表面也不易发生滑移而起裂,在一定程度上表面残余压应力抑制了疲劳裂纹在表面的形成,疲劳裂纹源继而转向材料内部如夹杂物等缺陷处,总体上延长了裂纹起裂寿命,从而提高了材料的高周疲劳性能。

当疲劳载荷较大,试样在循环载荷下发生塑性变形,试样表面的初始压应力将由于试样发生循环塑性形变而迅速松弛,应力值降至较低水平,试样内部和表面具有相同的应力状态,在如此条件下,疲劳裂纹将优先在表面起裂,初始表面应力对疲劳性能将不再有影响。正如本试验结果所示,不同程度的表面压应力试样具有一致的低周疲劳性能。

4 结论

(1)较高的表面压应力能有效抑制低应力幅下疲劳裂纹在表面起裂,从而提高了10Ni5CrMoV钢的高周疲劳性能,本试验条件下,表面压应力值高的试样比应力值低的试样疲劳寿命平均提高了186%。

(2)初始表面压应力在高应变幅循环载荷作用下迅速发生松弛,失去对疲劳裂纹在表面起裂的抑制作用,从而对10Ni5CrMoV钢的低周疲劳性能无明显影响。

致谢

本研究中试样的表面冲击加工处理在山东华云机电科技有限公司进行;中国船舶重工集团公司第七二五研究所的邓晚平工程师参与了本试验工作,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Haagensen P J. Fatigue improvement techniques advantages and limitations[J]. Welding in the World. 2003,47(7):43~63.

(下转第16页)

22(6):18.

[6] ATI Allegheny Techn ology. Technical Data Sheet TI - 040 - Allvac Titanium 6Al - 4VAlloy [M]. Mon-roe, NC 281 10 · 5030, USA . ATI Properties Inc, 2004. 1.

[7] ATI Allegheny Technology. Technical Data Sheet TI - 020 - AHvac Titanium 6Al. 4V , Alloy [M]. Mon-

roe, NC281 10 - 5030, USA; ATI Properties Inc, 2004. 1.

[8] 恒磊,赵永庆,朱知寿,等. 一种低成本损伤容限钛合金及其制备方法 [P]. CNP200510001210. 3, 2005.

[9] 郭萍,赵永庆,吴玮璐,等. [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 526.

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TC4 - DT Alloy

YANG Hai-ying, CHEN Jun, ZHAO Yong-qing

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Effect of series heat treatment on microstructure and room temperature mechanical properties of TC4 - DT alloy bar in diameter 300mm was investigated. The results show that in the microstructure of 300mm bar forged in $\alpha + \beta$ region, the grains are coarse and vague with obvious grain bindery in some field, which suggests that the big TC4 - DT bars has poor uniform in-forgings. The tensile properties and fracture toughness of big bars being treated after $\alpha + \beta$ double annealing can reach to $R_m \geq 825\text{MPa}$, $R_{P0.2} \geq 750\text{MPa}$, $A \geq 8\%$, $Z \geq 15\%$; $K_{IC}(T-L) \geq 90\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, indicating excellent match properties between strength and plasticity. The fatigue crack propagation vacuity can reach $2.833036 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ and $7.294209 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ respectively after heat treated at $965\text{ }^\circ\text{C}/1\text{h AC} + 550\text{ }^\circ\text{C}/6\text{h AC}$ and $940\text{ }^\circ\text{C}/1\text{h AC} + 570\text{ }^\circ\text{C}/6\text{h AC}$ heat treatments.

Keywords: Titanium alloy; Heat treatment processing; Microstructure; Medical properties

(编辑:全识俊)

(上接第 3 页)

[2] Cheng Xiaohua, Fisher J W, Prask H J. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures [J]. International Journal of fatigue. 2003, 25 (9/11): 1259 ~ 1269.

[3] Byeong Choon Goo, Jaehoon Kim, Jungwon Seo, et al. A study on the effect of welding residual stress and weld bead profiles on fatigue behavior [J]. Key Engineering Materials. 2004, 270/273: 2302 ~ 2307.

[4] Efim Statnikov. Physics and mechanism of ultrasonic im-

pact treatment [R]. IIW Document XIII - 2004 - 04.

[5] Kyung Kab-Soo, Lee Seung-Yong, Lee Sung-Geun, et al. Evaluation of fatigue strength of fillet welded connections with respect to different post - weld treatment methods [J]. Key Engineering Materials. 2007, 348/349: 921 ~ 924.

[6] Statnikov E S, Muktepavel V O, Trufyakov V I, et al. Efficiency Evaluation of ultrasonic impact treatment (UIT) of welded joints in weldox 420 steel in accordance with the IIW program [R]. IIW/IIS - Document XIII - 1817 ~ 00.

Effect of Compressive Surface Stress on the Fatigue of 10Ni5CrMoV Steel

XUE Gang

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The residual compressive stresses were introduced into the samples of 10Ni5CrMoV steel by grinding or impacting on the surface. High-cycle and low-cycle fatigue tests were carried out on the samples with different stress values. The fatigue fractures were analyzed under scanning electron microscope. The surface stresses of the samples after a number cycles of high-strain fatigue loading were tested. The results indicate that the high compressive surface stress can restrain the rising of the fatigue crack on the surface and improve the high-cycle fatigue capacity of 10Ni5CrMoV steel when the stress amplitude is low. The initial compressive surface stress relaxes and cannot restrain the rising of the fatigue crack on the surface and cannot influence the low-cycle fatigue capacity when the strain amplitude is high.

Key words: Compressive surface stress; High-cycle fatigue; Low-cycle fatigue; Stress relaxation

(编辑:段玉琴)