

P92 钢焊缝金属高温低周疲劳行为分析

韩永典^{1,2}, 张兆福^{1,2}, 徐连勇^{1,2}, 赵 雷^{1,2}, 荆洪阳^{1,2}

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

摘 要: P92 钢常用于锅炉高温、高压主蒸汽管道等部件, 其焊接接头性能的优劣直接关系到机组的安全可靠运行. 文中通过 P92 钢焊缝金属在 630 ℃ 下的低周疲劳试验, 研究了低周疲劳行为及其循环应力应变关系, 采用塑性应变能密度对其低周疲劳进行了寿命预测, 并根据断口形貌, 分析了 P92 钢焊缝金属的断裂机理. 结果表明, P92 钢焊缝金属表现出循环软化特征; 其低周疲劳寿命与应变幅值满足 Coffin-Manson 关系; 采用塑性应变能密度的方法可以很好地预测 P92 钢焊缝金属低周疲劳寿命. 二次裂纹密度的增加是其在高应变幅下寿命下降的主要原因.

关键词: P92 钢; 焊缝金属; 低周疲劳; 寿命预测

中图分类号: TG 405

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400063

0 序 言

近几十年来, 中国经济不断发展, 工业水平也在突飞猛进, 随之而来的环境压力也越来越大. 为了减少二氧化碳排放, 世界各国正积极倡导超超临界机组的应用. P92 钢因为具有良好的高温强度和蠕变性能已成为世界各国大力倡导的超超临界机组的新型耐热钢材料.

由于锅炉高温、高压主蒸汽管道等部件的材料常采用 P92 钢, 所以其焊接接头性能的优劣直接关系到机组能否安全可靠运行^[1]. 锅炉管道部件在启停时, 内部流体温度的急剧变化会引起沿壁厚方向的温差热应力, 此外, 锅炉结构也会承受内部流体压力变化, 这些都会使锅炉管道在运行过程经受低周疲劳损伤^[2]. 由于焊缝是整个系统的薄弱环节, 因此, P92 钢焊缝在高温下的疲劳性能对于高温组件的服役寿命具有重要影响. Wang 等人^[3]研究了 P92 钢在 650 ℃ 下, 应变幅值对其低周疲劳行为的影响. 毛雪平等人^[4]研究了 P92 钢在 600 和 650 ℃ 下的低周疲劳行为, 并得到了两种温度下的稳定循环应力—塑性应变的关系及低周疲劳寿命和应变的关系. Mariappan 等人^[5]研究了 9Cr-1Mo 钢在室温和 600 ℃ 下, 应变速率对低周疲劳行为的影响, 并且研究了其动态应变时效

行为. Zhang 等人^[6]研究了 P92 钢在室温和 600 ℃ 下的低周疲劳行为并分析了其微观组织演化. Zhang 等人^[7]研究 10% Cr 马氏体钢及其镍基焊接接头的低周疲劳行为.

目前中国火电行业正在推进 35 MPa, 610 ℃/630 ℃/630 ℃ 高效超超临界燃煤机组的示范工程, 二次再热器的出口温度达到 630 ℃. 目前关于 P92 钢在 630 ℃ 下低周疲劳的研究比较少, 关于其焊缝的研究更是未见系统深入的报道. 因此, 为了获得 P92 钢焊缝金属在 630 ℃ 条件下的高温低周疲劳性能, 文中对 P92 钢焊缝金属在该温度下的低周疲劳性能进行了试验研究, 并且通过断口分析研究疲劳断裂机理.

1 试验方法

试验所用材料为 P92 钢, 堆焊材料为德国伯乐蒂森公司针对 P/T92 而研制的钢芯过渡型的 MTS-616 系列焊接材料. 其化学成分如表 1 所示.

P92 钢焊缝金属高温低周疲劳试验在 RPL50 动蠕变试验机上进行, 为了研究焊缝金属纵向的低周疲劳性能, 试样取样位置如图 1 所示. 依据标准为 GB/T 26077—2010. 试验控制方式为总应变控制, 应变速率为 0.001 s^{-1} , 波形为三角波形, 应变比 R 为 -1, 应变范围为 $\pm (0.2\% \sim 0.5\%)$, 试验温度为 630 ℃, 控温精度为 $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

表 1 MTS616 焊接材料化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of standard MTS616 welding material

C	Mn	Si	Ni	N	Cr	W	Mo	V	Nb
0.11	0.6	0.2	0.7	0.04	8.8	1.6	0.5	0.2	0.05

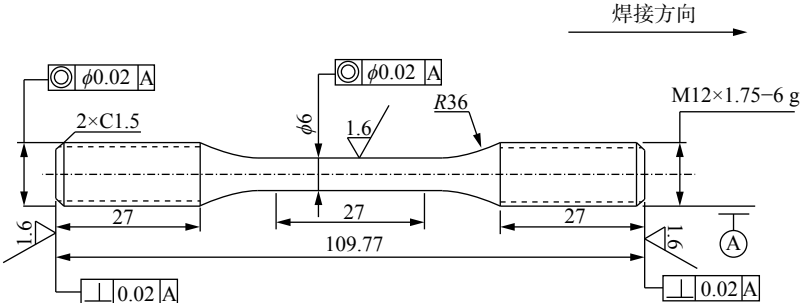


图 1 试样取样位置示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic of sampling location

2 试验结果与分析

试验研究了 P92 钢焊缝金属 630 ℃ 不同应变幅下的低周疲劳行为和循环应力—应变特性, 以及对低周疲劳循环寿命的预测。

2.1 低周疲劳行为

当循环拉应力峰值下降到稳定循环拉应力峰值的 90% 时认定材料发生失效^[3], 取该循环周次为材料的疲劳寿命 N_f 。图 2 为在不同应变幅下最大循环拉应力随寿命比的变化曲线。

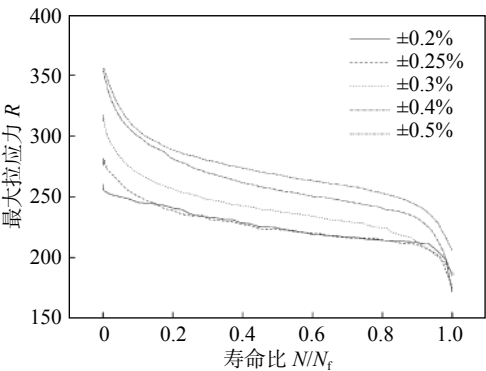


图 2 循环拉应力峰值随寿命比变化曲线
Fig. 2 Curves of maximum tensile stress vs. percent of cycle life

由图 2 可知, 随着循环周次的增加, P92 钢焊缝金属的循环拉应力峰值在不断下降, 这表明 P92 钢焊缝金属发生了循环软化行为。并且在其疲劳寿命的前 20% 阶段发生了快速的循环软化, 之后软化的速率下降到稳定值, 在 90% 的疲劳寿命之后, 由于宏观裂纹的产生, 循环拉应力峰值又迅速下

降。循环软化的发生是由于当对材料施加了循环载荷后, 材料微观结构中高密度的位错发生了重新分布从而向低能态发生了转化, 从而减小了变形阻力^[6]。

通过将总的应变幅值分成弹性应变幅值和塑性应变幅值, 低周疲劳寿命可以由 Coffin-Manson 公式^[8]表示, 即

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

式中: $\Delta \epsilon_e/2$ 为一半寿命处弹性应变幅值; $\Delta \epsilon_p/2$ 为一半寿命处塑性应变幅值; $2N_f$ 为材料失效时负荷的反转周次; σ'_f 为疲劳强度系数; b 为疲劳强度指数; E 为弹性模量, 值为 146 GPa; ϵ'_f 为疲劳延性系数; c 为疲劳延性指数。应变幅值与反转周次的关系如图 3 所示。

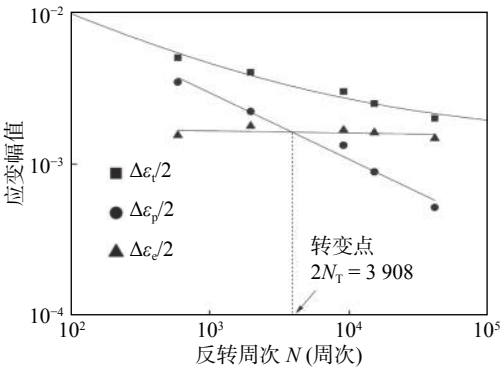


图 3 应变幅—反转周次曲线
Fig. 3 Curves of strain amplitude vs. reversal cycles
通过试验数据拟合得到 P92 焊缝金属的 Coffin-Manson 公式, 即

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.002(2N_f)^{-0.014} + 0.060(2N_f)^{-0.436} \quad (2)$$

弹性应变幅值与塑性应变幅值相等时的循环周次为材料的过渡疲劳寿命 N_T , 由图 3 可知, P92 钢焊缝金属的过渡疲劳寿命 $N_T=1\ 954$. 当低周疲劳寿命低于 N_T , 塑性应变对疲劳寿命起主导作用, 当低周疲劳寿命高于 N_T , 弹性应变对疲劳寿命起主导作用. 通常情况下, 材料的强度越高, 塑性越差, 过渡疲劳寿命越低.

2.2 循环应力—应变关系

在低周疲劳条件下, 材料不仅会发生弹性变形, 还会发生塑性变形. 取一半寿命处的应力和塑性应变幅值数据进行研究, 应力与塑性应变幅值的关系可由 Ramberg-Osgood 公式表示, 即

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (3)$$

式中: $\Delta \sigma/2$ 为循环应力幅值; K' 和 n' 分别为循环强度系数和循环应变硬化指数. 图 4 所示为应力幅值与塑性应变幅值的关系.

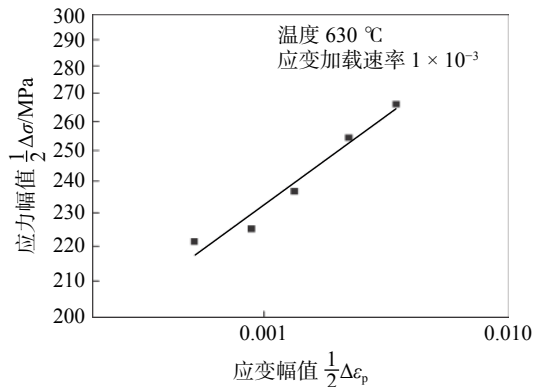


图 4 应力幅—塑性应变幅曲线

Fig. 4 Curves of stress amplitude vs. plastic strain amplitude

最终拟合得到的 P92 钢焊缝金属 630 °C 下的 Ramberg-Osgood 关系为

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = 475 \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \right)^{0.104} \quad (4)$$

2.3 疲劳寿命预测

塑性应变能密度 (ΔW_p) 为材料在单个循环内单位体积吸收的机械能. 在材料受循环载荷时, 塑性应变能密度可以作为一种手段来代表材料内部受到的损伤^[9]. 因此, 塑性应变能密度可以作为低周疲劳寿命预测的一种方法. 塑性应变能密度可以通过应力—应变滞后环的面积来计算. 在实际中,

为了简化计算, 塑性应变能密度的值可以通过式 (5) 获得, 即

$$\Delta W_p = \left(\frac{1-n'}{1+n'} \right) \Delta \sigma \Delta \varepsilon_p \quad (5)$$

式中: n' 由公式获得. 在高温低周疲劳寿命预测中, 塑性应变能密度与材料的低周疲劳寿命满足幂律关系. 塑性应变能密度与疲劳寿命关系为

$$\Delta W_p = k_p (N_f)^{\alpha} \quad (6)$$

式中: k_p 为塑性应变能系数; α 为塑性应变能指数. 图 5 所示为塑性应变能密度与疲劳寿命的关系. 由图 5 可知, 所有的点均位于拟合直线 ± 2 倍的标准偏差之内. 因此该方法可以很好地预测 P92 钢焊缝金属低周疲劳寿命. 最终拟合得其关系为

$$\Delta W_p = 51.6 N_f^{-0.486} \quad (7)$$

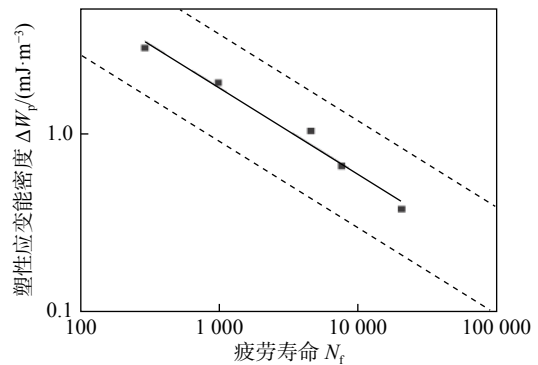


图 5 塑性应变能密度—疲劳寿命曲线

Fig. 5 Curves of plastic strain energy density vs. fatigue life

3 试样断口形貌分析

图 6 所示为应变幅为 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.4\%$ 下的试样宏观断口和微观形貌. 如图 6a, 6c 所示, 在循环载荷作用下, 疲劳断裂区通常分为三个区域面, 裂纹源、扩展区和断裂区. 裂纹源通常处于试样表面, 并且可能有多个裂纹源. 以裂纹源为中心可观察到向四周辐射的放射台阶. 从图 6b, 6d 中可以观察到在断口表面覆盖着一层致密的氧化膜, 并且可以观察到与疲劳裂纹扩展方向垂直的二次裂纹, 裂纹尖端的氧化膜破裂会增加位错滑移的不可逆性, 从而降低疲劳寿命^[6]. 随着应变幅的增大, 二次裂纹的密度急剧增加. 因此可以得出, 随着应变幅的增加, 高温低周疲劳寿命降低的主要原因是二次裂纹密度的增加.

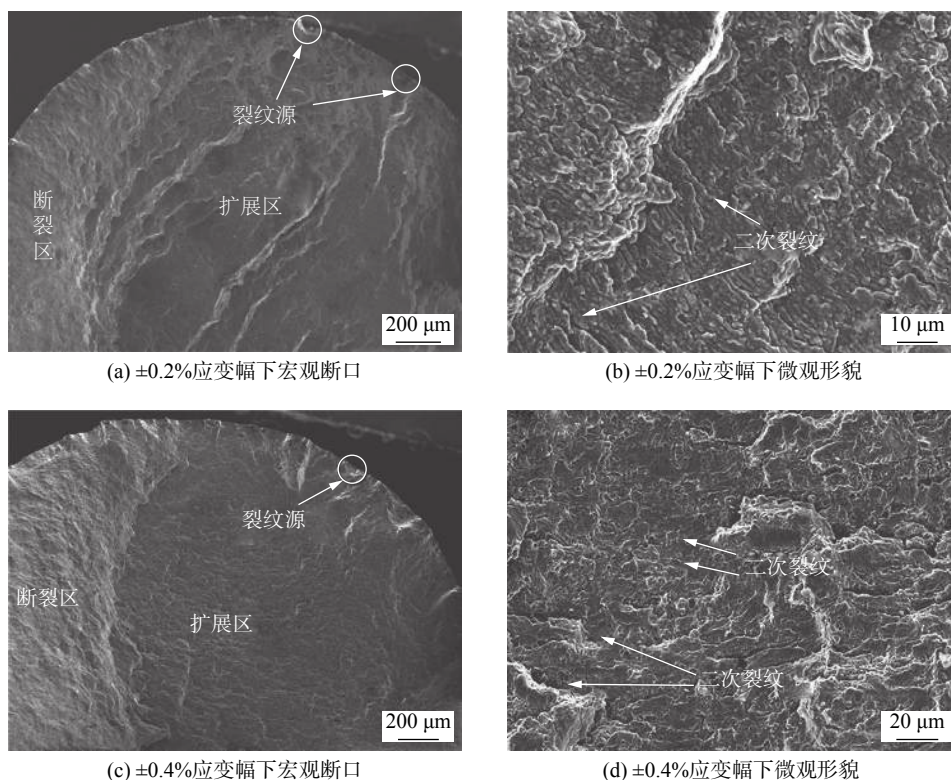


图 6 两种应变幅下宏观疲劳断口形貌和微观形貌

Fig. 6 Macrofractography and microtopography under two kinds of strain amplitude

4 结 论

(1) P92 钢焊缝金属在 630 ℃ 下表现出循环软化特征, 并且在其寿命的前 20% 阶段发生了快速的循环软化。

(2) P92 钢焊缝金属在 630 ℃ 下低周疲劳寿命与应变幅值满足 Coffin-Manson 关系, 其过渡疲劳寿命 N_T 为 1 954。

(3) P92 钢焊缝金属在 630 ℃ 下, 塑性应变能密度与低周疲劳寿命满足幂律关系, 采用塑性应变能密度的方法可以很好地预测 P92 钢焊缝金属低周疲劳寿命。

(4) P92 钢焊缝金属在 630 ℃ 下, 其低周疲劳断口包含裂纹源、扩展区和断裂区三部分。疲劳裂纹起源于试样表面, 并且可能含有多个裂纹源。

参考文献:

- [1] 王淦刚, 赵 军, 赵建仓, 等. P92 新型耐热钢焊接接头的力学性能研究及其工程应用 [J]. 电力设备, 2007, 8(5): 1 - 5.
Wang Gangang, Zhao Jun, Zhao Jiancang, *et al.* Mechanical properties and engineering applications of P92 new type heat resistant steel welded joint[J]. Power Equipment, 2007, 8(5): 1 - 5.
- [2] 张 振, 胡正飞, 范立坤, 等. 国产 P92 钢低周疲劳性能与断裂特征研究 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(4): 330 - 336.
Zhang Zhen, Hu Zhengfei, Fan Likun, *et al.* Study on low cycle fatigue performance and fracture characteristic of domestic P92 steel[J]. Journal of Power Engineering, 2014, 34(4): 330 - 336.
- [3] Wang X W, Gong J M, Zhao Y P, *et al.* Characterization of low cycle fatigue performance of new ferritic P92 steel at high temperature: effect of strain amplitude[J]. Steel Research International, 2015, 86(9): 1046 - 1055.
- [4] 毛雪平, 陆道纲, 徐 鸿, 等. P92 钢高温低周疲劳的实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2010, 44(10): 1212 - 1216.
Mao Xueping, Lu Daogang, Xu Hong, *et al.* Experimental study on low cycle fatigue of P92 steel at high temperature[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(10): 1212 - 1216.
- [5] Mariappan K, Shankar V, Sandhya R, *et al.* Dynamic strain aging behavior of modified 9Cr - 1Mo and reduced activation ferritic martensitic steels under low cycle fatigue[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 435(1-3): 207 - 213.
- [6] Zhang Zhen, Hu Zhengfei, Fan Likun, *et al.* Low cycle fatigue behavior and cyclic softening of P92 ferritic-martensitic steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(6): 534 - 542.