

12CrMoV 钢主蒸汽管道的蠕变疲劳失效分析

王海燕¹ 高雪云² 刘宗昌¹ 王玉峰¹

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 包头第一热电厂, 包头 014010)

摘要 研究和分析了电厂 12CrMoV 钢(% :0. 12C, 0. 45Cr, 0. 31Mo, 0. 22V) $\Phi 273$ mm \times 22 mm 主蒸汽管道服役 30 000 h 后疲劳蠕变交互作用的失效裂纹特征。结果表明, 裂纹延晶前扩展, 蠕变诱发钢管表面氧化物缺陷产生的应力集中, 粗大碳化物的存在, 高温冲击载荷引起的热疲劳是钢管内表面形成裂纹的主要原因。

关键词 12CrMoV 钢管 蠕变 疲劳 夹杂物 碳化物 失效

An Analysis on Creep-Fatigue Failure of Main Steam Pipe of 12CrMoV Steel

Wang Haiyan¹, Gao Xueyuan², Liu Zongchang¹ and Wang Yufeng¹

(1 Material and Metallurgy College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2 The First Power Station of Baotou, Baotou 014010)

Abstract Failure crack character of $\Phi 273$ mm \times 22 mm main steam pipe of 12CrMoV steel (0. 12C, 0. 45Cr, 0. 31Mo, 0. 22V) serviced for 30 000 h under the condition of creep-fatigue interaction serviced at power station has been studied and analyzed. Results showed that the crack developed and spread along grain-boundary, and the stress concentration formed at oxide defect of steel tube surface induced by creep, existence of coarse carbide and thermal fatigue induced by high temperature impact load were main cause to form crack of inner surface of steel pipe.

Material Index 12CrMoV Steel Pipe, Creep, Fatigue, Inclusion, Carbide, Failure

发电机组的启停、变负荷状况要求转子、缸体、阀门等部件材料有低的热疲劳和蠕变疲劳敏感性^[1,2]。本实验对国内电厂应用较广的 12CrMoV 合金钢在长期使用后的老化特征及蠕变强度极限和持久强度极限进行了研究, 综合分析该类锅炉管失效的原因。

1 检测与分析

实验所用 12CrMoV 钢主蒸汽管道的尺寸为 $\Phi 273$ mm \times 22 mm, 工作温度为 540 $^{\circ}$ C, 化学成分(%)为: 0. 12C、0. 45Cr、0. 31Mo、0. 22V、0. 27Si、0. 51Mn、0. 026P、0. 030S。该蒸汽管道在服役 30 000 h 后定检时发现裂纹。宏观检查可断定裂纹始于管壁里层的内表面(蒸汽侧), 内层先腐蚀开裂后, 外层依次腐蚀, 裂纹整体形貌见图 1 (a)。在高倍下观察, 图 1 (b) 清楚地显示裂纹呈树枝状, 由微观分析证实为蠕变裂纹。观察裂纹尖端, 可以看出裂纹均沿晶发展, 由多个蠕变孔洞扩展连接而成。

晶界裂纹首先形成, 使得材料的高温强度严重降低。

在扫描电镜下观察到的裂纹断口氧化层形貌如图 2 (a), 表面氧化层约 2 μ m。材料中的氧化物夹杂对热疲劳裂纹的形成起着重要作用。在高温下, 氧化物夹杂和第二相粒子与周围基体的结合力减弱, 其与基体界面成为该地区最薄弱的环节, 则裂纹可能在該处形成^[3]。由图 2 (b) 中的能谱分析可知, 断口存在大量氧化物。氧化物夹杂是影响断裂的重要因素, 极易成为应力集中的存在位置^[2]。同时, 在断裂试样的纵截面发现了起始于氧化物的微裂纹, 表明氧化物充当了断裂形核核心。

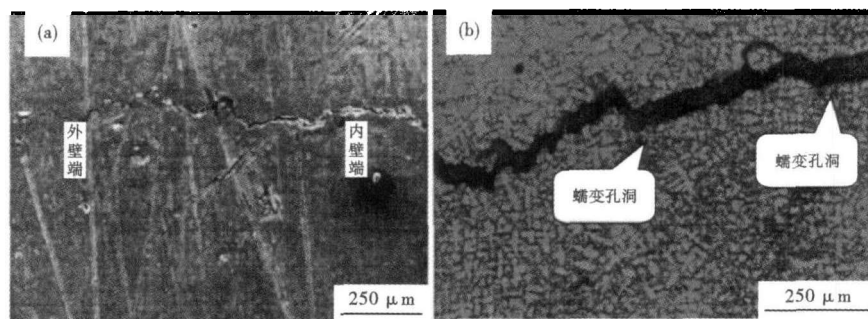


图 1 管道内表面裂纹: (a) 裂纹整体形貌; (b) 呈树枝状蠕变裂纹形貌

Fig. 1 Inner surface crack of pipe: (a) whole crack morphology of crack; (b) dendritic creep crack morphology

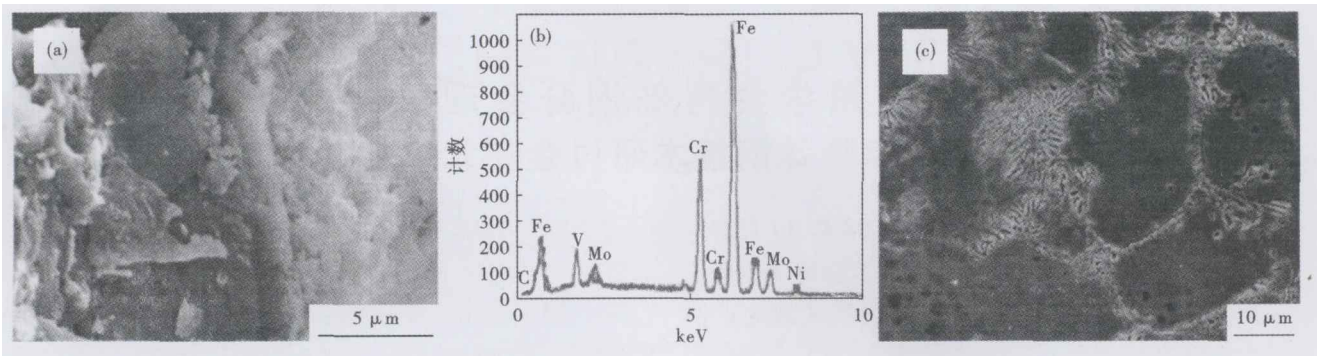


图 2 12CrMoV 钢管裂纹断口处氧化物形貌,SEM (a);裂纹断口 X-射线能谱分析(b);基体中粗大碳化物,SEM (c)
Fig. 2 Morphology of oxide at crack fracture, SEM (a), energy dispersive X-ray spectrometer analysis of crack fracture (b), and coarse carbide in matrix of 12CrMoV steel pipe, SEM (c)

蒸汽管道内部为高温高压的过热水蒸气,产生水蒸气的水是经过软化并深度脱氧处理的,氧含量较低,因此管子的腐蚀应当是低氧压环境下氧化和水蒸气氧化的合成,并以水蒸气氧化为主。研究表明,水蒸气将显著加速 FeCr 合金的高温氧化。由于长期运行的主蒸汽管道形成内壁氧化皮,其导热系数仅为母材金属的十几分之一,恶化了管子的传热性能,因此容易导致超温现象。一些研究者通过金相组织对比,发现试验材料在运行过程中确实出现了一定程度的超温现象^[4]。热疲劳的本质是热应力导致的循环塑性应变使材料产生累积损伤,当局部材料塑性耗尽时,便导致热疲劳开裂,因此材料的热疲劳抗力主要决定于高温时的屈服强度和极限塑性^[5,6]。同时,交变应力的作用致使材料产生疲劳,加速晶间裂纹的扩展,最终形成宏观疲劳裂纹。

在图 2(b)中还发现了碳化物峰值。图 2(c)的扫描电镜观察显示,基体中存在粗大碳化物。电厂常用的 CrMoV 钢在长期使用过程中,基体内合金元素向碳化物相中转移,成为电厂蒸汽管道部件逐渐老化的基本特征之一。

一般来说,高压导汽管、主蒸汽管部件蠕变孔洞或裂纹的形成往往伴有较为显著的碳化物颗粒的聚集长大。锅炉管部件在高温环境下长期工作时,会发生碳化物相分布形式的变化、碳化物相尺寸、成分的改变、碳化物相的粗化、相结构的改变^[7]。合金碳化物相的粗化使得塑性下降,晶界脆性明显增加,材料的损伤程度非常严重。 $M_{23}C_6$ 等脆性碳化物沉淀极易造成晶间断裂。

同时,研究者对长期使用后蠕变疲劳条件下碳化物粒子尺寸的粗化规律进行了研究表明,蠕变疲劳交互作用条件下,碳化物粒子粗化速率明显高于蠕变条件下的行为,这表明,交变应力以及机组的振

动作用加速了碳化物粒子的粗化。碳化物相的晶界聚集与粗化,会导致蠕变孔洞形核,明显降低基体的强化作用,使得断裂强度降低,最终造成部件强度不足而出现失效。

2 改进建议

降低钢中氧和氧化物夹杂含量有利于提高 12CrMoV 钢管蠕变疲劳稳定性,提高使用寿命。

稀土元素可以改善钢的机械性能,尤其是韧性^[8]。稀土元素的添加可以降低裂纹敏感性,增加 823 K 到 890 K 时的延展性,因此可以考虑在钢中添加适量稀土元素。考虑到具体生产与使用条件,其工艺改进措施还有待于进一步研究。

3 结论

12CrMoV 钢主蒸汽管道在蠕变疲劳的交互作用下,形成了热疲劳裂纹,材料中的氧化物夹杂和粗大碳化物相起着重要作用。

参考文献

- 周荣灿,范长信,李耀君. 电站用材的现状与发展趋势. 钢管, 2006, 35(1): 19
- 邓增杰,周敬恩. 工程材料的断裂与疲劳. 北京:机械工业出版社, 1995
- 刘江南,赵彦芬,耿波,等. T91 钢高温高压水蒸汽氧化膜微观组织结构研究. 铸造技术, 2005, 26(3): 202
- 王正品,张路,刘江南,等. 电站用 T22 及与 T91 管高温蒸汽氧化的失效分析. 铸造技术, 2004, 25(7): 523
- 杨显科. 金属高温强度及测试. 上海:上海科技出版社, 1986
- 刘瑞堂,侯彦芬,王忠华,等. 电厂用锅炉水冷壁辐射过热器管弯头开裂原因分析. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(1): 105
- 束国刚,丁辉,刘树涛,等. 国产 9Cr-1Mo-V-Nb-N 钢的组织及热处理工艺研究. 武汉大学学报, 2003, 36(5): 111
- Lan Jie, He Jun-jie, Ding Wen-jiang, et al. Effect of Rare Earth Metals on the Microstructure and Impact Toughness of a Cast 0.4C-5Cr-1.2Mo-1.0V Steel. ISIJ International, 2000, 40(12): 1275

王海燕(1975-),女,讲师,2004 年内蒙古科技大学毕业,金属材料各向异性与相变机理研究。

收稿日期:2008-07-21