

文章编号:1674-2869(2014)03-0053-05

凝汽器钛管断裂失效分析

袁小会¹,蔡逸飞^{2*}

(1. 武汉软件工程职业学院机械工程学院,湖北 武汉 430205;

2. ALSTOM(武汉)工程技术有限公司,湖北 武汉 430060)

摘 要:核电作为一种高效、清洁可循环利用的能源显得尤为重要. 核电机组的安全运行备受关注. 针对国内某核电机组凝汽器运行中钛管断裂现象进行了失效分析,通过光学显微镜,三维体式显微镜,扫描电镜,对钛管失效部位的化学成分与显微组织及断裂处的微观形貌进行了表征,并结合类似设备失效分析的经验,提出了造成材料失效的因素是管内壁的疲劳腐蚀,对苛刻工况下的凝汽器管道维护和保养提供了参考:(1)加强管材的加工质量控制,消除原始材料缺陷,在运行过程中,重点做好顶部管束的质量监控;(2)凝汽器运行前排空水室顶部的空气,减少启动阶段蒸汽的冲击振动;(3)加强凝汽器的稳定运行控制,减少变工况运行.

关键词:凝汽器钛管;微裂纹;疲劳腐蚀;失效分析

中图分类号:TL353+.13

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.03.011

0 引 言

钛合金管作为一种优异的耐腐蚀材料被广泛用于恶劣条件下的凝汽器等设备中^[1-2],尤其在临海核电站,以海水作为循环冷却介质的凝汽器,其关键热交换部件的管束材料几乎全部采用钛管^[3-5].长期处于矿物盐侵蚀和海水冲击作用等恶劣工况下,钛管时有发生断裂失效,导致管束泄露,严重影响凝汽器的安全运行.

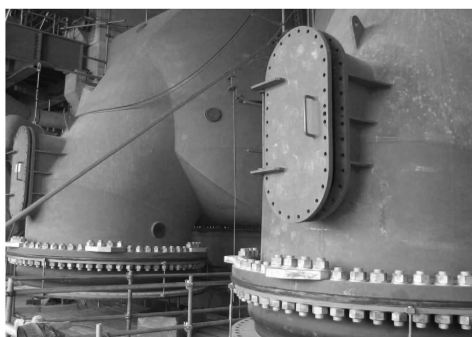
本文针对国内某核电机组凝汽器定期大修中发现的断裂钛管部件出现的材料失效现象展开分析,通过检查分析断裂钛管的宏观位置结构及对失效材料的微观形貌、材料成分等进行分析,并结

合类似设备失效分析的经验,探讨了凝汽器钛管断裂失效的原因,提出了预防和维护措施.

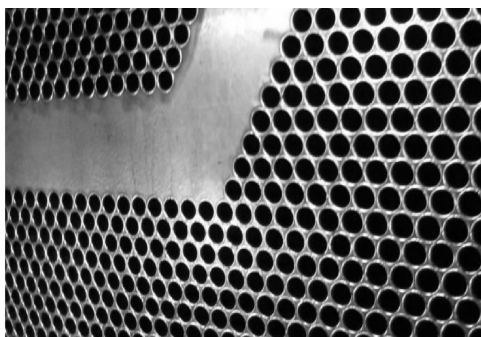
1 凝汽器外观形貌及钛管断裂失效位置检查

图 1 为凝汽器的外观形貌(图 1(a))和内部管板结构(图 1(b))示意图.

图 2 为失效钛管的分布位置示意图,检修过程中发现断裂失效的钛管处于顶端位置(见图 2)在水流方向距离进水端管板 6 800 mm 和 8 660 mm 处发现两处断裂,同时发现裂纹附近管内壁有积垢存在.使用渗透剂检查,发现裂纹呈圆周方向分布,如图 3 所示.



(a) 凝汽器外形



(b) 钛管排列结构

图 1 凝汽器外观形貌及内部钛管管板布置

Fig. 1 Condenser external appearance and titanium tubes structure

收稿日期:2014-02-22

基金项目:湖北省教育厅科研项目(B20128803)

作者简介:袁小会(1980-),女,湖北钟祥人,讲师,工程师,硕士.研究方向:机械设计.*通信联系人.

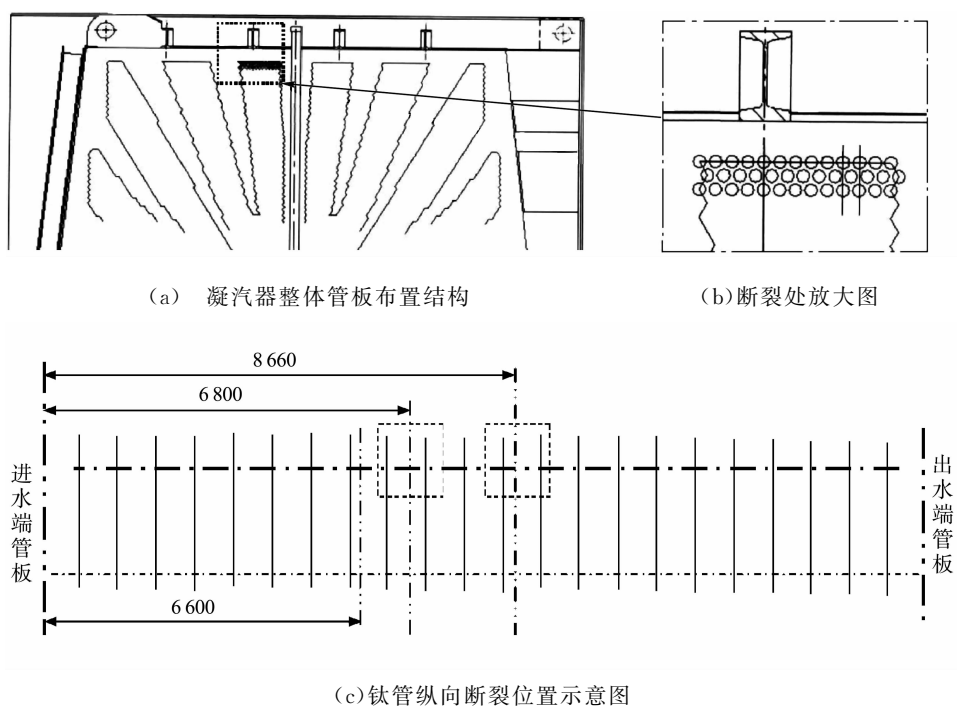


图 2 钛管断裂失效位置
Fig. 2 Titanium tube fracture defects position

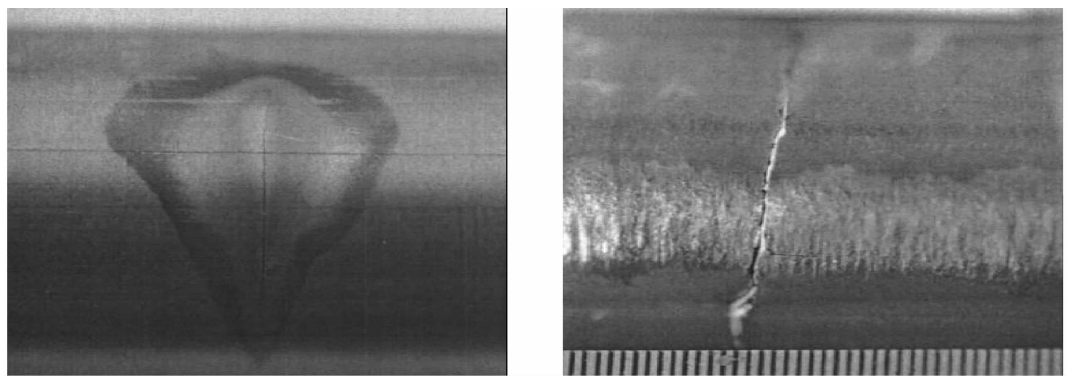


图 3 钛管裂纹检查
Fig. 3 Titanium tube cracks visual inspection

2 钛管材质检验

2.1 化学成分分析

采用等离子体原子发射光谱法、红外碳硫气体分析仪和氮氧氢气体层析仪测定材料中所含 Fe、C、N、O、H 元素的质量分数,测量结果如表 1 所示,所检测的钛管中杂质元素的质量分数低于国家标准中规定的值,可见使用的钛管材质符合设计规范.

| 表 1 失效钛管化学成分 | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Table 1 Chemical compositions of the failed titanium tube | | | | | | |
| 测量值 | 化学成分 $w/\%$ | | | | | |
| | H | O | N | C | F | 其他元素 |
| 标准 | ≤ 0.01 | ≤ 0.15 | ≤ 0.02 | ≤ 0.05 | ≤ 0.10 | ≤ 0.10 |
| 要求值 | ≤ 0.01 | ≤ 0.15 | ≤ 0.02 | ≤ 0.05 | ≤ 0.10 | ≤ 0.10 |
| 实测值 | 0.0020 | 0.1 | 0.01 | 0.035 | 0.08 | — |

2.2 力学性能试验

按照 ASME SA370《钢制品力学性能试验方法及定义》对失效钛管进行拉伸试验及扩口、压扁和反压扁测试,试验结果如表 2 和图 4 所示.试验结果表明,在役钛管的力学性能符合国家标准 GB/T 3620.1-2007 和 ASTM B338 标准的要求.

| 表 2 钛管力学性能 | | | |
|---|---------------------------|-----------------------|-------------|
| Table 1 Tensile properties of the titanium tube | | | |
| 测试项目 | $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | σ_b/MPa | $\Delta/\%$ |
| GB/T3620.1 ^[6] | ≥ 250 | 370~530 | ≥ 20 |
| SB338 标准值 ^[7] | 275~450 | ≥ 345 | ≥ 20 |
| 实测值 | 425 | 502 | 35 |

注: $\sigma_{0.2}$ 为条件屈服强度; σ_b 为屈服强度; Δ 为延伸率.

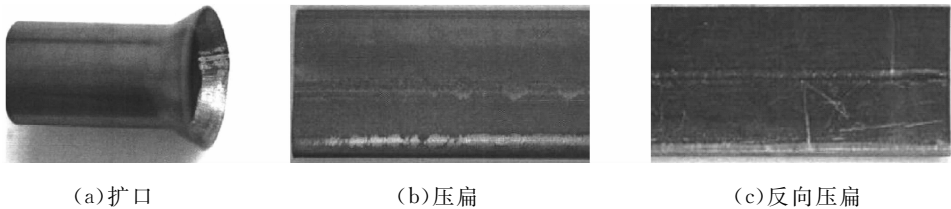


图 4 钛管力学性能检查

Fig. 4 Mechanical Tests of Titanium tube

2.3 金相组织检验

对在役钛管进行了金相组织检验,如图 5 所示,结果显示材料为典型 α 相钛显微组织,晶粒分布及大小均匀,未见晶间缺陷,符合钛金属材料的金相组织特征。

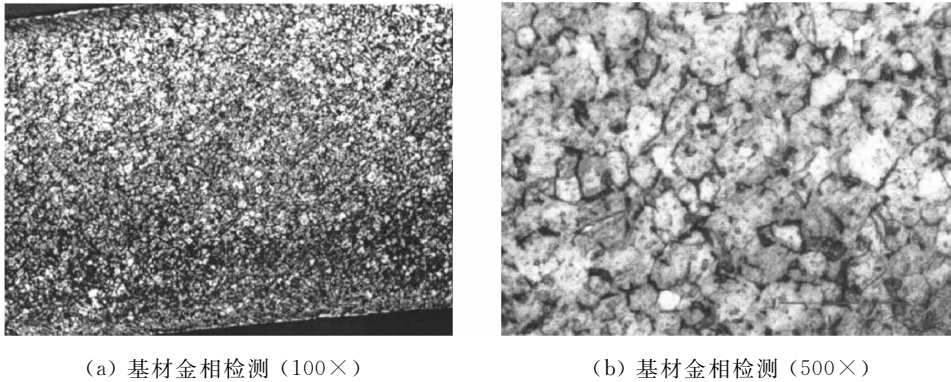


图 5 钛管金相组织检查

Fig. 5 Microstructure inspection on Titanium tube

3 断口微观形貌检查

采用扫描电子显微镜(SEM)对断裂处的显微形貌进行观察和分析,如图 6 所示,可以看到断口

的裂纹源于钛管的内壁,逐渐向外扩展.图 6(b)中显示管内壁存在裂纹,而在图 6(c)中所示的外表面完整.图 6(d)更清晰地表征了内表面的微裂纹,证明裂纹萌生于钛管的内壁。

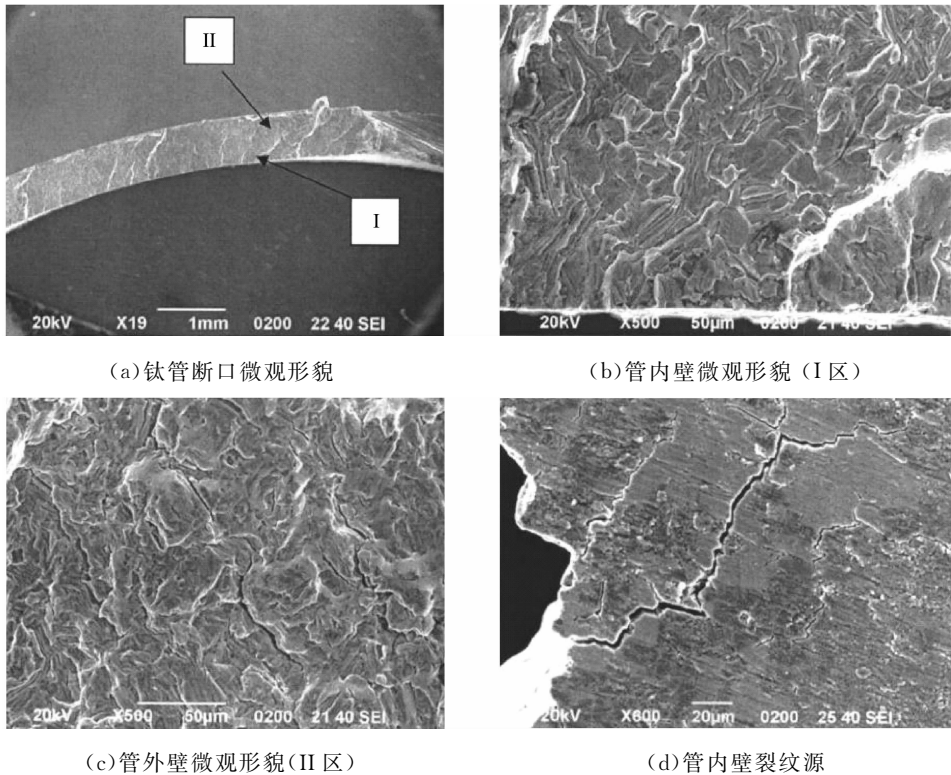
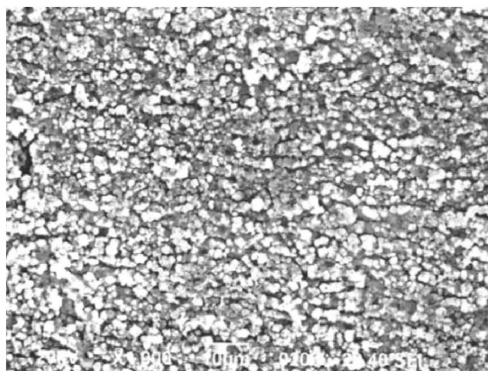


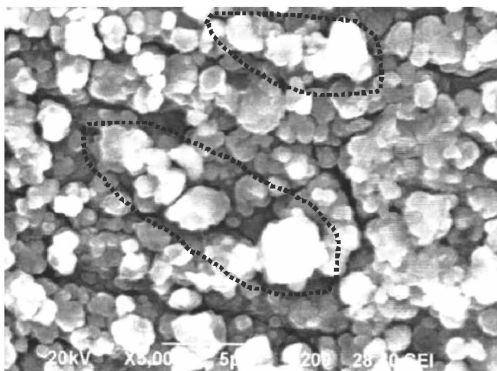
图 6 钛管裂纹断口 SEM 照片

Fig. 6 SEM morphologies of the cracks on titanium tube

为了进一步分析钛管材料微裂纹产生的原因,对管内壁裂纹源处采样进行微观分析,如图 7



(a) 裂纹源微观形貌 (1000×)



(b) 裂纹源微观形貌 (5000×)

图 7 钛管裂纹源晶体 SEM 照片

Fig. 7 SEM morphologies of the failed titanium crystal

4 失效机理分析

两处断裂失效钛管的位置均在凝汽器管束的最上层,开裂位置位于钛管长度方向两管板的中间位置(如图 2 所示),该位置为蒸汽冲击振动最为严重的地方.在机组的调试、运行工况下,尤其是调试阶段,机组的启停、变工况运行均会对凝汽器冷却管造成严重的冲击作用,导致材料的破坏.

凝汽器顶部蒸汽温度最高,进入顶部钛管内部的海水在一定的条件下可能汽化形成液气两相,管内壁局部海水会蒸发析出异质盐分结晶.虽然钛金属的耐腐蚀能力较高,在钛管的局部表面仍然会发生海盐的侵蚀现象.

在凝汽器长期的运行过程中,一方面管束顶部的钛管受变工况蒸汽冲击产生振动,在管板中间处的管束容易产生材料的疲劳失效;另一方面在管内局部高温位置,钛管内壁存在材料的侵蚀.在冲击振动和材料表面侵蚀的双重作用下,钛管局部形成材料的疲劳腐蚀,最终导致断裂失效.

5 结论和建议

通过对凝汽器两处断裂失效钛管的宏观检查和微观表征,分析发现钛管受疲劳腐蚀导致了最终的断裂失效;管材局部受冲击振动作用是材料失效的因素之一,管内壁表面发生的侵蚀是导致材料疲劳破坏的起因.

针对以上分析,提出以下预防和维护措施:

(1)加强管材的加工质量控制,消除原始材料缺陷,在运行过程中,重点做好顶部管束的质量监控;(2)凝汽器运行前排空水室顶部的空气,减少启动阶段蒸汽的冲击振动;(3)加强凝汽器的稳定

中虚线所示,发现裂纹附近内表面存在疑似矿物盐等异质结晶现象.

运行控制,减少变工况运行.

致 谢

感谢湖北省教育厅科学技术研究项目组对本研究的支持与帮助.

参考文献:

- [1] YANG Z G, GONG Y, YUAN J Z. Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchangers in a nuclear power plant, Part II: Mechanical degradation[J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(1): 18-28.
- [2] 杨振国. 核电装置换热器的失效分析及其解决对策[J]. 金属热处理, 2007, 32(1): 28-35.
YANG Zhen-Guo. Failure analysis and countermeasure of heat exchangers in nuclear power facility[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(1): 28-35. (in Chinese)
- [3] 陈明辉, 厉日竹, 何晓艳, 等. 一体化核反应堆套接管束式换热器设计与试验[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(12): 29-33.
CHEN Ming-hui, LI Ri-zhu, HE Xiao-yan, et al. Design and tests of a double-tube bundle heat exchanger for an integrated nuclear reactor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(12): 29-33. (in Chinese)
- [4] GONG Y, YAO C, YANG Z G, et al. Acidic/Caustic alternating corrosion on carbon steel pipes in heat exchanger of ethylene plant[J]. Materials and Corrosion, 2011, 62(10): 967-978.
- [5] 陈锡雄. 防止海水腐蚀的措施与效果[J]. 电力建设, 2001, 22(5): 34-36.
CHEN Xi-xiong. Measures to protect corrosion of seawater and results[J]. Electric Power Construc-

tion,2001,22(5):34-36. (in Chinese)

[6] GB/T 3620. 1-2007 钛及钛合金牌号和化学成分 [S]. 北京:中国标准出版社,2007.

GB/T 3620. 1-2007 Designation and composition of titanium and titanium Alloys [S]. Beijing: China Standards Publishing House,2007. (in Chinese)

[7] ASME SEC II B SB-338-2001. Standard specification for seamless and welded titanium and titanium alloy tubes for condensers and heat exchangers. ASTM B338-99[S]. 2001.

Failure analysis on titanium tubes in condenser

YUAN Xiao-hui¹,CAI Yi-fei²

(1. School of Mechanical Engineering,Wuhan Vocational College of Software and Engineering,Wuhan 430205,China;
2. ALSTOM (Wuhan) Engineering & Technology limited company,Wuhan 430060,China)

Abstract:Nuclear power as a kind of efficient, clean and recyclable energy becomes more and more particularly important. The safe operation of nuclear power plants attracted much highly attention. A failure analysis on the titanium tubes rupture of a nuclear power plant was studied in this article. In order to ascertain the failure causes,chemical composition and microscopic structure of the failed tubes,were carried out by using optical microscope,three-dimensional stereo microscope and scanning electron microscope. Combined with the similar equipment failure analysis experience,this article demonstrated the factors causing the material failure is corrosion fatigue on the tube inner surfaces,and provided reference maintenance for the condenser tubes under harsh working condition:(1)Strengthen the quality control process for the titanium tubes manufacture,eliminate the defects in tubes raw material,and focus quality control on the top of the bundle;(2)Draining and emptying the air at the top of the water boxes to reduce the vibration during the condenser start-up phase;(3) Improve the stability operation control of the condenser,reduce the variable running condition.

Key words:condenser titanium tubes;micro-cracks;corrosion fatigue;failure analysis

本文编辑:陈小平