

# 反应堆停冷系统阀门接管失效分析

王斐, 朱伟, 温榜, 蒋国富, 唐洪奎, 尹春艳, 彭艳华, 任亮

中国核动力研究设计院, 成都 610041

**摘要** 反应堆检修过程中发现停冷系统的阀门接管出现裂纹, 裂纹出现在焊缝坡口部位, 为分析裂纹产生的原因, 需对阀门接管进行失效分析。采用目视检测和渗透检测方法, 对裂纹出现的区域进行无损检查, 确定了裂纹的数量和方向。根据无损检查结果对典型裂纹区域进行了显微分析和成分分析。检查结果表明, 裂纹从管壁内侧向外侧扩展, 裂纹周围晶粒未发现变形痕迹, 裂纹区域与非裂纹区域晶粒未发现区别; 裂纹横断面呈现脆性断裂特征, 裂纹内部发生了腐蚀, 腐蚀产物的主要成分为氧; 结合阀门接管的运行工况分析认为, 该阀门接管失效原因为应力腐蚀。

**关键词** 阀门接管; 裂纹; 应力腐蚀

反应堆停堆冷却系统既用在反应堆停堆时导出堆内反应剩余热量, 也可以在反应堆发生失水事故时, 从换料水箱或安全壳地坑中将含硼水注射到堆芯, 实现反应堆安全停堆<sup>[1]</sup>, 因此反应堆停堆冷却系统对反应堆安全运行至关重要。

对于压力管道失效问题遍及石油、化工、航空、能源、核工业等部门, 国内相继出现主蒸汽管道<sup>[2]</sup>、发电机组高温蒸汽管道<sup>[3]</sup>、锅炉再热出口管道<sup>[4]</sup>、渣油管道<sup>[5]</sup>的失效问题, 失效原因主要有热疲劳、晶间腐蚀和应力腐蚀等。某核电厂在反应堆大修期间, 对停堆冷却系统进行无损检查时阀门接管焊接坡口顶部存在多条裂纹, 裂纹未贯穿管壁, 停冷系统的阀门接管材质为 SUS 321TP 不锈钢, 采用冷拔方式制造, 并在 1050℃ 条件下进行固溶处理, 阀门接管使用时的介质为含硼水的弱酸环境, 并长期承受 3 MPa 左右的压力。为分析阀门接管裂纹产生的原因, 对阀门接管焊接坡口裂纹区域进行目视检测、渗透检测、扫描电镜分析、能谱分析及金相检查。

## 1 试验方法

### 1.1 无损检测

对阀门接管进行清洗后, 采用 KH7700 视频显微镜对阀门接管坡口位置进行目视检测, 对裂纹等表面缺陷进行观察, 获取表面裂纹分布状况。采用德国 MR 渗透探伤剂对阀门接管坡口、外表面和内表面进行渗透检查, 获得裂纹在整个轴向和环向的分布状况。

### 1.2 裂纹横断面样品制备

为开展裂纹横断面的微观形貌分析, 需获得裂纹的横断面, 但由于裂纹尺寸较小未贯穿整个管壁, 需将裂纹从横断

面处打开, 本次试验将阀门接管中最大裂纹的区域制备成拉伸样品, 采用 MTS 810 万能材料试验机将样品从裂纹处拉伸, 获得裂纹的横断面样品。

### 1.3 微观分析

采用 KYKY-2800 抗辐射扫描电镜对裂纹横断面断裂形貌进行观察, 分析断裂机制; 采用 X 射线能谱仪分析裂纹横断面微区成分, 获得裂纹横断面的成分状态; 采用 Leica MEF4 热室金相显微镜对轴向和径向裂纹进行金相检查, 检查裂纹区域的微观组织, 对比裂纹区域与非裂纹区域显微组织差异, 分析轴向和径向裂纹的扩展方式。

## 2 试验结果

### 2.1 裂纹宏观分布

对阀门接管目视检查发现, 阀门接管裂纹主要聚集在管道顶端内表面(图 1)。最长裂纹沿管道内壁轴向延伸约 32 mm, 最大裂纹深度约 6 mm, 裂纹聚集在约 60 mm 的弧长范围内。

渗透检查裂纹形貌如图 2 所示, 裂纹在端口位置较粗, 而远离端口位置裂纹较细, 说明裂纹在轴向的扩展方向是从端口开始, 沿轴向扩展。

### 2.2 裂纹横断面微观分析

采用拉伸方式打开裂纹, 由于原有裂纹已经断裂, 拉伸时仅针对未断裂部分拉伸, 而本次研究仅针对原有裂纹分析, 因此, 拉伸方式打开裂纹对本次分析不会造成影响。裂纹横断面宏观形貌如图 3 所示, 裂纹横断面已腐蚀变色, 靠近管壁内侧区域颜色较深, 呈黑褐色, 向外颜色变浅, 呈黄褐

收稿日期: 2015-05-08; 修回日期: 2015-11-27

作者简介: 王斐, 助理研究员, 研究方向为核材料辐照效应, 电子信箱: reshiwangfei@163.com; 蒋国富(通信作者), 研究员, 研究方向为核燃料及材料辐照效应, 电子信箱: jiangguofu05@163.com

引用格式: 王斐, 朱伟, 温榜, 等. 反应堆停冷系统阀门接管失效分析[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 93-96; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.012

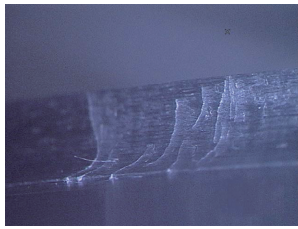


图1 目视检查裂纹形貌  
Fig. 1 Morphology of cracks by visual test

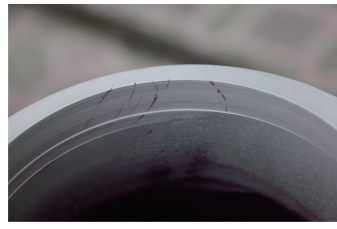


图2 渗透检查裂纹显示  
Fig. 2 Morphology of cracks by penetrate test

色, 腐蚀产物的厚度由内侧到外侧逐渐减小, 说明腐蚀程度逐渐减轻, 由此说明裂纹是从管道内表面向外表面扩展的, 扩展过程中裂纹与介质发生腐蚀的时间不同, 造成裂纹断面的颜色差异。



图3 裂纹横断面宏观形貌  
Fig. 3 Morphology of crack transverse

对裂纹横断面扫描电镜分析发现靠近管壁内侧表面有较薄腐蚀产物附着, 原始形貌被覆盖, 部分区域断口形貌呈现出河流状的准解理断裂特征(图4)。裂纹尖端腐蚀较轻, 裂纹形貌为河流状花样, 呈现脆性断裂特征, 未发现气孔、夹杂、第二相等特征, 如图5所示。

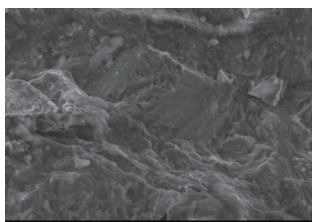


图4 裂纹横断面腐蚀形貌  
Fig. 4 Morphology of corroded crack transverse

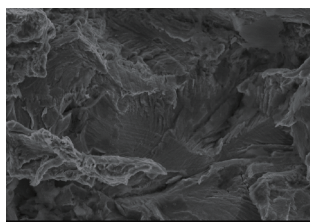
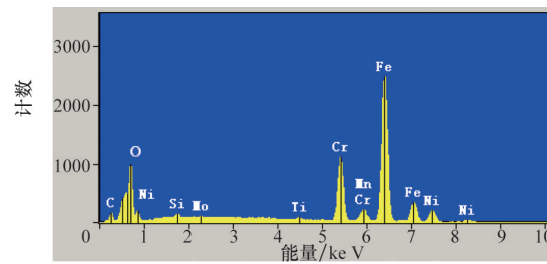


图5 裂纹横断面河流状花样  
Fig. 5 River pattern of crack transverse

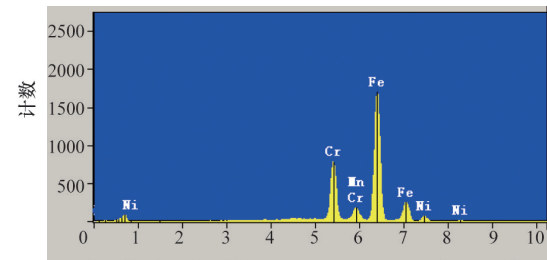
### 2.3 裂纹横断面微区成分分析

采用EDS定性分析裂纹横断面微区成分, 腐蚀层EDS谱图如图6(a)所示(横坐标为EDS分析中的元素计数), 裂纹尖端EDS谱图如图6(b)所示; 裂纹横断面主要成分为Fe、Cr、Ni和Mn等元素, 未发现F、Cl、S等有害杂质离子, 腐蚀较严重的

区域O元素偏高, 说明在该区域的腐蚀主要是由于不锈钢发生了氧化而造成的, 与图3中宏观照片中的形貌一致。



(a) 腐蚀层



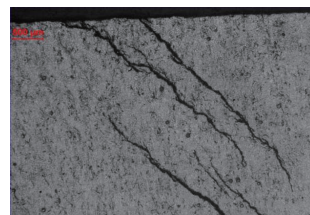
(b) 裂纹尖端

图6 EDS谱

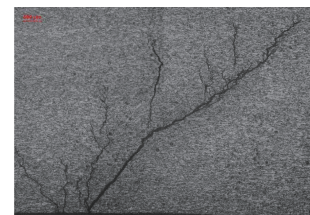
Fig. 6 EDS image

### 2.4 裂纹扩展方式

对径向裂纹和轴向裂纹进行金相分析, 每个样品进行了两个层面的检查, 轴向裂纹样品磨制面为管道内表面, 检查发现裂纹在端口位置较粗, 沿轴向向下裂纹变细(图7(a)), 因此判断裂纹在轴向的扩展方向为由端口位置沿轴向向下扩展, 与无损检查结果一致。对径向裂纹来说, 裂纹在管壁内侧较粗, 而裂纹向外侧发展中出现较多的分支, 且裂纹变细(图7(b)), 可以看出径向裂纹从内壁向外扩展, 裂纹分叉较多, 尖端较锐利, 裂纹整体呈现树枝状特征。



(a) 轴向裂纹



(b) 径向裂纹

图7 显微形貌

Fig. 7 Microstructure

从裂纹形貌看, 热疲劳所产生的裂纹通常在裂纹源位置发生不均匀的塑性应变, 再在塑性应变最剧烈的局部相继形成微裂纹, 此后其中一条微裂纹逐渐发展成主裂纹, 其他微

裂纹应力松弛而不再扩展或扩展很慢,热疲劳形成的典型裂纹为楔形裂纹<sup>[6]</sup>,而本次检查的树枝状裂纹在起始位置未发现塑性变形区,裂纹程序树枝状发展,与应力腐蚀裂纹扩展的方式一致<sup>[7]</sup>。

裂纹的微观形貌如图8所示,裂纹在管壁内扩展方式以穿晶为主,局部沿晶发展,裂纹周围晶粒未发现变形痕迹,说明裂纹属于脆性断裂,与扫描电镜检查裂纹断裂面的结果一致。裂纹附近晶粒与非裂纹区晶粒无明显差别。从晶粒组织看,未发现晶粒呈现网状腐蚀特征<sup>[8]</sup>,因此,引起失效的原因不是晶间腐蚀。

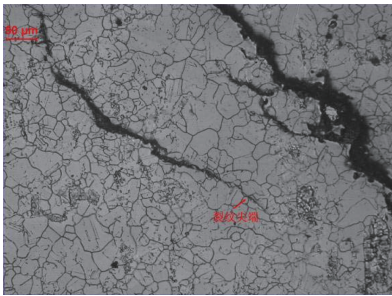


图8 裂纹尖端显微形貌

Fig. 8 Microstructure of crack tip

### 3 分析与讨论

对阀门接管使用前后均开展过无损检测,相关记录显示阀门接管使用前后均未发现相关缺陷显示,阀门裂纹断裂面呈现脆性断裂,裂纹内部腐蚀严重,裂纹的微观形态为树根状,裂纹在管壁内扩展方式以穿晶为主,裂纹尖端较锐利,裂纹周围晶粒未发现变形痕迹,检查结果与应力腐蚀断裂特征<sup>[7-9]</sup>完全相符,因此判断阀门接管产生裂纹的原因是应力腐蚀。

金属材料在拉应力和对其敏感的腐蚀介质共同作用下所引起的脆性断裂称为应力腐蚀开裂,应力腐蚀开裂没有任何预兆,一旦腐蚀萌生的微裂纹扩展成为临界裂纹,在极低的应力下即可迅速扩展而导致断裂<sup>[10]</sup>。发生应力腐蚀的条件必须是介质、应力和材质3个条件同时满足时才产生。

#### 3.1 腐蚀介质

奥氏体不锈钢发生应力腐蚀的敏感介质包括氯化物溶液、高温高压含氧高纯水、水蒸气、海水、90%湿度空气、磷酸三钠溶液等,本次检查的阀门接管冷端连接安注系统,用于在冷停堆或事故状况下充注含硼水,压力约3 MPa,阀门接管使用时的介质为含硼水的弱酸环境,且由于该阀门接管处于死管段,死管段内会出现汽-水分层现象<sup>[11]</sup>,因此在管壁顶部内表面的腐蚀介质为高温水蒸气<sup>[12]</sup>,据文献[13]显示在核反应堆冷却系统奥氏体不锈钢遇到高温高压水会发生应力腐蚀,影响这类应力腐蚀的主要因素为溶氧量和Cl<sup>-</sup>浓度,一般随溶氧量增加,奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂敏感性增加,阀门接管气腔内存在一定量的氧,在高温高压条件下,阀门接管

极易发生氧致应力腐蚀。

#### 3.2 应力条件

阀门接管在运行期间主要承受由温度产生的热应力、内压产生的压应力和周向拉应力,另外,在阀门接管内还可能

存在焊接的残余应力。热应力是从热端向冷端传递的应力,在阀门接管中表现为压应力。焊接的残余应力方向与焊接方式有关,但阀门接管已经服役20多年,阀门接管通过塑性变形基本消除了残余应力。

阀门接管在运行过程中承受内压,使该位置处于周向拉应力和径向压应力共同作用的二向应力状态,且拉应力与裂纹的扩展方向垂直,因此判断阀门接管产生应力腐蚀的诱因主要是内压产生的拉应力。

#### 3.3 材质

SUS 321TP 不锈钢为奥氏体不锈钢,奥氏体不锈钢的晶体结构为面心立方,在存在应力和腐蚀的条件下容易发生应力腐蚀。

综上所述,SUS 321 TP 不锈钢材质的阀门接管,从运行工况的腐蚀介质、应力条件和材质本身均具备产生应力腐蚀的条件。

## 4 结论

通过目视检测和渗透检测的无损检测方式,确定了阀门接管内裂纹的位置和方向,采用扫描电镜分析了裂纹的断裂方式和裂纹内部腐蚀产物成分,采用金相检查的方式获得了裂纹的扩展方式及晶粒的微观组织,通过对阀门接管裂纹区域的检查获得以下结论:

- 1) 裂纹内部存在腐蚀,裂纹横断面呈现典型脆性断裂特征,裂纹由管壁内侧向外侧扩展。
- 2) 裂纹形貌为树根状,裂纹在管壁内扩展方式以穿晶扩展为主,裂纹尖端较锐利,裂纹周围晶粒未发现变形痕迹,裂纹附近晶粒与非裂纹区晶粒无明显差别。
- 3) 阀门接管使用前后无损检测均未发现相关缺陷显示,从阀门接管材料、使用工况条件及裂纹微观形貌,判断阀门接管失效为应力腐蚀开裂。

#### 参考文献(References)

- [1] 庄毅, 黄兴蓉, 姜百华, 等. CARR 应急堆芯冷却系统停堆冷却措施分析[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 79-83.  
Zhuang Yi, Huang Xingrong, Jiang Baihua, et al. Analysis of cooling measures for ECCS at CARR shutdown[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 79-83.
- [2] 孙丙新, 尹毅, 陆波, 等. 4号炉主蒸汽管道排空气管孔裂纹的原因分析及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2004, 22(1): 17-18.  
Sun Bingxin, Yin Yi, Lu Bo, Zhou Yan. Cause analysis and treatment on craze of ventilation pipe's hole of main steam pipes for No.4 boiler [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2004, 22(1): 17-18.
- [3] 李中伟, 张东文, 赵纪峰, 等. 600MW 机组高温再热蒸汽管道放气管

- 裂纹原因分析与处理[J]. 热加工工艺, 2010, 39(1): 157-159.  
Li Zhongwei, Zhang Dongwen, Zhao Jifeng, et al. Cause analysis and settlement of exhaust pipes crack in high temperature reheated steam pipe of 600 MW unit[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(1): 157-159.
- [4] 李中伟, 冯砚厅, 张东文, 等. 300MW 锅炉再热出口管道焊缝开裂原因分析[J]. 热加工工艺, 2011, 40(19): 196-197.  
Li Zhongwei, Feng Yanting, Zhang Dongwen, et al. Analysis on welding seam crack of 300 MW boiler reheater output pipes[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(19): 196-197.
- [5] 邱宏斌. 奥氏体不锈钢输油管道焊缝的应力腐蚀失效分析[J]. 化工设备与管道, 2011, 48(4): 68-72.  
Qiu Hongbin. Stress corrosion failure analysis for weld in austenitic steel piping for oil transportation[J]. Process Equipment & Piping, 2011, 48(4): 68-72.
- [6] 刘瑞堂, 刘文博, 刘锦云. 工程材料力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 114-117.  
Liu Ruitang, Liu Wenbo, Liu Jinyun. Mechanical properties of engineering materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001: 114-117.
- [7] 苗中辉, 焦增庚, 蔡琦. 0Cr18Ni10Ti 管道腐蚀失效模式诊断不确定推理研究[J]. 核动力工程, 2007, 28(3): 78-81.  
Miao Zhonghui, Jiao Zengeng, Cai Qi. Uncertainty reasoning of mode diagnosis for 0Cr18Ni10Ti pipe corrosion failure[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(3): 78-81.
- [8] 贺彩红, 王世宏. 不锈钢的腐蚀种类及影响因素[J]. 当代化工, 2006, 35(1): 40-42.  
He Caihong, Wang Shihong. Corrosion type and influence factor of stainless steel[J]. Contemporary Chemical Industry, 2006, 35(1): 40-42.
- [9] 顾宝珊, 纪晓春, 刘建华. 奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2005, 22(6): 41-44.  
Gu Baoshan, Ji Xiaochun, Liu Jianhua. Stress corrosion cracking of austenitic steel[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2005, 22(6): 41-44.
- [10] 奚明华, 张静江. 316 不锈钢应力腐蚀断裂扫描电镜研究[J]. 理化检验: 物理分册, 1999, 35(4): 155-157.  
Xi Minghua, Zhang Jingjiang. SEM Study on stress corrosion cracking of 316 stainless steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis: Physical Testing, 1999, 35(4): 155-157.
- [11] 梁汉生, 蒋定功, 张朝文, 等. 阀门组件老化敏感点预警值的确定及老化缓解对策[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 97-102.  
Liang Hansheng, Jiang Dingong, Zhang Chaowen, et al. Establishment of alarm value for aging susceptibility point of valve subassembly and countermeasures for aging mitigation[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(6): 97-102.
- [12] 曹雪明, 李世伟, 薛飞. 秦山核电厂死管段筛选及管理对策[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 148-152.  
Cao Xueming, Li Shiwei, Xue Fei. Screening and management of Dead-end pipe in Qinshan NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(6): 148-152.
- [13] 刘金华, 文燕, 张雪梅, 等. 反应堆压力容器密封面材料非正常工况下的腐蚀性能研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(1): 83-87.  
Liu Jinhua, Wen Yan, Zhang Xuemei, et al. Corrosion properties of sealing surface material for RPV under abnormal working conditions [J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(1): 83-87.

## Failure analysis for valve nozzle of shutdown cooling system in reactor

WANG Fei, ZHU Wei, WEN Bang, JIANG Guofu, TANG Hongkui, YIN Chunyan, PENG Yanhua, REN Liang

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China

**Abstract** Cracks found in the weld groove parts of valve nozzle of the shutdown cooling system of a reactor in repairing is analyzed. The reasons of the cracks, the crack number and orientations are confirmed by visual inspection and penetrant testing. According to the results of nondestructive inspection, typical cracks regions are cut into some samples including crack transect samples, longitudinal crack samples and transverse crack samples. Scanning electron microscopy is used to investigate the microstructure and micro zone composition of the crack transect. Optical microscopy is used to analyze the microstructures of the longitudinal crack and the transverse crack. The results show that cracks may extend from the inside to outside wall and that grain deformation around the crack is not found. There are no obvious grain differences between crack and non-crack regions. Brittle fracture characteristic exists in crack cross section, and the internal corrosion of crack is found. The main component of corrosion products is oxygen, and the corrosion is caused by oxidation of stainless steel. Combined with the valve nozzle operating conditions, the reason for the failure of valve nozzle is believed to be stress corrosion cracking.

**Keywords** valve nozzle; crack; stress corrosion cracking

(责任编辑 刘志远)