

核电主管道取样管焊缝疲劳开裂案例分析

梁夏香, 段远刚

(中广核工程有限公司设计院核岛设备所, 广东 深圳 518124)

摘要: **目的** 针对某核电机组主管道取样管焊缝水压试验后渗透检测时发现的超标线性显示, 分析失效原因, 探讨制造期间不常见的疲劳裂纹形成及扩展的机制, 分析导致疲劳的交变应力源所在。**方法** 通过宏观分析、金相观察、断口扫描电镜试验。**结果** 材质未见异常, 该线性显示为裂纹所致, 是疲劳裂纹。**结论** 取样管焊缝焊趾部位多源裂纹不是水压试验所产生的, 为水压试验后机械加工去除堵头时, 因切削不良使取样管侧焊趾附近承载的交变载荷过量引起的疲劳开裂; 疲劳应力主要来自水压试验后取样管堵头切除加工工序, 铣削不良是引发疲劳裂纹的关键因素。

关键词: 核电主管道; 水压试验; 焊趾; 疲劳裂纹

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.018

中图分类号: TJ91 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0098-05

Case Analysis of Fatigue Cracking on the Weld of Sampling Connection of Main Coolant Lines

LIANG Xia-xiang, DUAN Yuan-gang

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, NI Equipment Design Dept, Shenzhen 518124, China)

ABSTRACT: Objective According to unacceptable linear indications by liquid penetrant examination on the weld of sampling connection of main coolant lines after hydrostatic test during manufacturing, the failure causes were analyzed, the formation and propagation mechanism for rarely seen fatigue cracks during manufacturing was explored, and the alternating stress source of fatigue was discussed. **Methods** In the paper, macroscopic analysis, optical microscope and scanning electron microscope were used. **Results** The results showed that the material quality was acceptable and the linear indication was caused by fatigue cracks. **Conclusion** The multi-source crack in the weld toe of the sampling pipe was not caused by hydrostatic test, but was fatigue cracking resulted from the excessive alternating current load near the weld toe of the sampling pipe caused by improper cutting during the removal of the plug via mechanical machining after the hydrostatic test. The fatigue stress came from the cutting process of plug after the hydrostatic test. Unreasonable milling was the key factor leading to fatigue crack.

KEY WORDS: main coolant lines; hydrostatic test; weld toe; fatigue cracking

一般说来, 在设备制造期间的失效案例中, 很少 录有疲劳失效的情形, 通常原因在于大型构件在加工

收稿日期: 2015-10-15; 修订日期: 2015-11-11

Received: 2015-10-15; Revised: 2015-11-11

作者简介: 梁夏香(1963—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为核电站核岛主设备设计。

Biography: LIANG Xia-xiang(1963—), Female, Senior engineer, Research focus: design of nuclear island main equipment.

制造期间, 交变应力的占比往往可忽略不计, 特殊情况即使考虑交变受力, 其应力幅值和频率也很难满足能导致疲劳失效的必要条件。近年来笔者从事核电设备制造不符合项处理的设计处理工作, 遭遇到了制造期间疲劳失效损伤的真实案例, 因此选择一大型构件制造期间疲劳失效损伤的案例进行分析探讨。

1 案例介绍

该案例发生在某制造单位承制的某压水堆核电站的主管道上, 其取样管焊缝部位在出厂前的水压试验完成后进行的渗透检验中, 发现密集的线性显示超标, 不满足设计要求。将取样管及焊缝切割下来进行了一系列的试验分析, 开具不符合项处理文件, 提交设计方审查, 以便获准进行返修处理。

压水堆核电站 1000 MW 反应堆冷却剂系统通常由三条环路组成, 每条环路包括一台蒸汽发生器、一台主泵和将这些设备与反应堆压力容器连接起来的反应堆冷却剂管道(简称: 主管道), 设计压力为 17.23 MPa (绝对压力), 设计温度为 343 ℃, 材质为 Z3CN20-09M, 采用离心浇铸成形。为满足核电站运行的水化学监测取样要求, 每个管段上设置有取样管接管座, 材质为 Z2CND18-12 控氮不锈钢, 采用锻造成形, 与主管道之间采用焊接连接, 焊材材质为 ER316L, 具体结构如图 1 所示。



图1 取样管接管座结构

Fig.1 Structure scheme of the sampling connection

取样接管座面外径尺寸为 $\phi 75$ mm, 取样管规格为 $\phi 22.5$ mm \times 6.5 mm, 头部尺寸为 $\phi 60.0$ mm \times 25.5 mm, 取样管插入管座的深度为 147.5 mm。

据现场了解, 该单位之前已多次出现过出厂水压试验后渗透检验发现该部位线性显示超标现象, 为共性问题。试验分析这些线性显示定性为裂纹, 裂纹位于主管道取样管焊缝焊趾边缘部位, 水压试验前堵头

安装位置和试验后出现裂纹的位置如图 2 所示。虽然之前的案例均已返修处理予以消缺, 产品均已出厂交付核电站使用, 但同部位重复出现渗透检验超标的线性显示现象, 说明一直未能真正找到开裂的根本原因, 给产品制造质量和运行安全带来很大隐患。

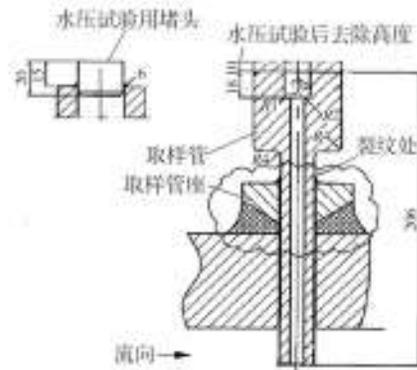


图2 堵头位置及裂纹位置

Fig.2 The position diagram of plug and crack

2 裂纹的主要特征

在该案例中, 宏观上线性显示主要集中在环向相对的两个区域, 相对取样管轴线呈对称分布, 两区域中心连线相对主管道轴线偏转一定角度, 如图 3 所示。密集断续显示或连续线性显示位于焊缝与取样管的焊趾部位熔合线附近, 环向长度分别为 30 mm 和 41 mm, 附近母材及焊缝外观无明显的塑性变形。经分析, 渗透检验的可见线性显示为裂纹。

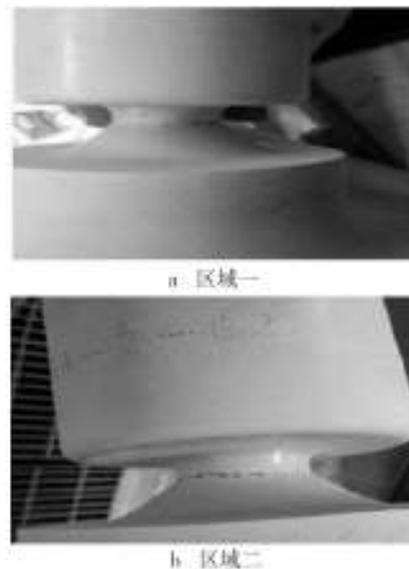


图3 焊趾处的PT线性显示

Fig.3 PT linear indications at weld toe

图4中金相分析表明,焊缝、焊接热影响区、母材金相组织未见异常,未发现晶粒粗大及结晶裂纹、高温低塑性裂纹、未熔合、夹渣等缺陷。

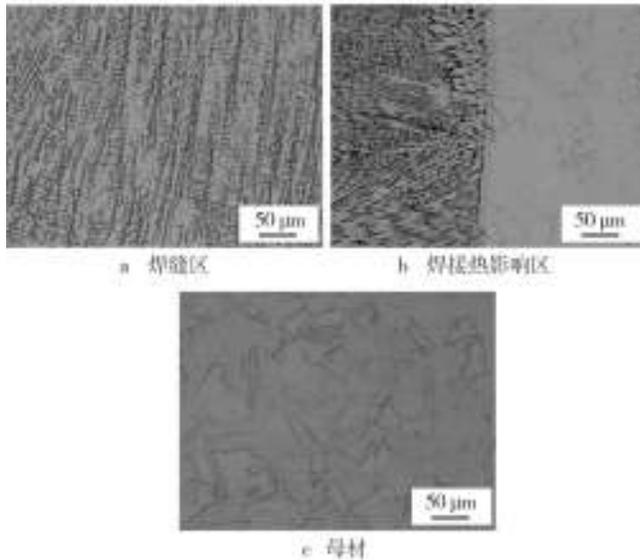


图4 取样管焊缝焊趾部位微观组织

Fig.4 Microstructures of the weld toe of the sampling tube

裂纹形貌如图5所示,其中裂纹均起源于焊趾处外表面,为多点萌生并平行地沿径向往内壁扩展。裂纹主要呈穿晶状,主裂纹穿越焊缝、热影响区、母材。

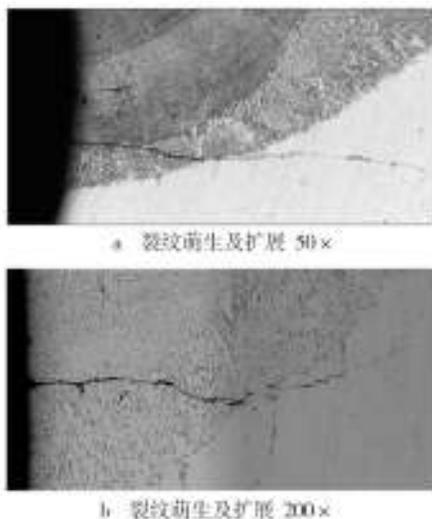


图5 裂纹形貌

Fig.5 Crack morphology

采用机械方法将主裂纹打开,获得的断口形貌如图6所示。由图6可知,断口表面较平坦,裂纹起裂于外表面焊趾附近的机加工沟槽,沿与外表面垂直方向向内扩展,高倍观察扩展区存在清晰可见的疲劳辉纹。

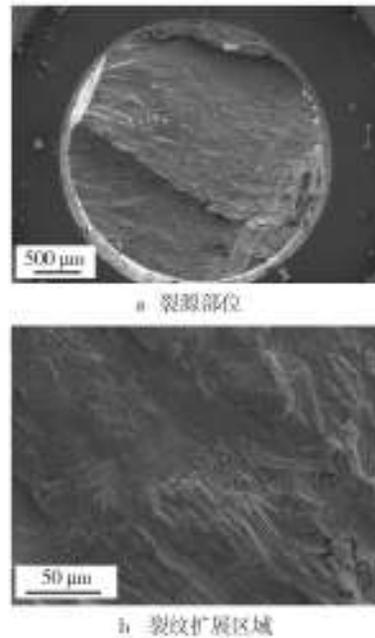


图6 裂纹断口形貌

Fig.6 Crack fracture morphology

3 制造加工过程及材质核查

制造时,将取样管插入管座,然后进行插套管的环缝焊接,为四层(七道)手工氩弧焊焊接成形,焊后表面打磨,进行渗透检验,检验合格则安装堵头。将取样管头部和堵头焊接,密封完成后与主管道本体一起进行水压试验。水压试验完成后,先机加工去除堵头,然后进行渗透检验,如无缺陷,则产品合格。主要工艺流程为:组配—焊接—检验—堵头安装—水压试验—去除堵头—渗透检验—包装发运。

根据走访和核查情况,主管道及取样管的化学成分和力学性能均符合设计要求,焊接材料及焊接工艺无异常,焊缝、热影响区、母材等区域的金相组织均正常^[1-3]。产品在生产过程中,首次渗透检验、水压试验均未见异常,水压试验后二次渗透探伤时发现焊趾附近出现裂纹。

4 开裂原因分析

4.1 同类开裂事件原因分析报告上的结论意见

相似的问题在该制造单位已经发生数次,当时的原因分析报告显示,制造加工过程及材质情况均相同。在裂纹特征上,唯一不同的是断口分析微观特征

证据为滑移线,与该次证据的疲劳辉纹虽在形态上有着某些相似性,但两者所揭示的金属断裂机理却大不相同。

以前原因分析的关键微观证据是基于滑移线,因此断裂分析角度和路径都较宽泛,每个可能的分析路径又缺乏证据支持,分析结论具有不确定性,未能给出明确的结论,仅推断到可能的原因即止步不前,所列原因包括:母材存在夹杂物;取样管装配时插入过深,取样管头部下底面至管座顶面间距偏小,导致焊趾处应力集中加大;角焊缝尺寸偏大,增加了焊接残余应力;焊趾处存在打磨产生的凹坑和划痕,为裂纹;水压试验过程中变化的压力载荷是导致裂纹开裂的应力来源。

4.2 对原因分析报告结论的商榷意见

之前的原因分析报告列出的五项原因,归纳起来均围绕着材质和应力角度展开,以猜测性推断为主,缺乏有效证据支持,其结论值得商榷。

1) 关于母材存在夹杂物。报告未提供夹杂物和裂纹有关的支持性证据,也未明确母材存在的夹杂物是否已经超过标准或设计规定。材料存在着小级别夹杂物为正常状况,但夹杂物存在和因夹杂物导致的开裂之间,还存在很大的裂纹形成和扩展的路径空间,不能简单地推断其为开裂原因。一般而言,夹杂物并未密集分布在高应力部位或位于裂纹扩展路径上,其对金属构件开裂的贡献效应实际很小。

2) 关于装配质量欠佳增大了应力集中和焊接残余应力。报告未提供装配不符合加工图纸规定的证据,实际工程中构件不可能完全没有应力集中和焊接残余应力。在焊接工艺评定已经合格的前提下,使用低碳奥氏体不锈钢材质的主管道和取样管,结构因素造就的应力集中和焊接残余应力一般沿整个焊缝分布,这样状态的应力基本不足以造成取样管焊缝被对称地撕裂。又因奥氏体不锈钢的高韧特性,即使表面产生了少量微裂纹,也因开裂而释放了应力,裂纹前沿达成新的应力平衡,裂纹较大程度地丧失了持续扩展的动力,致使其裂纹长度和深度都十分有限,与宏观观察存在的裂纹尺寸特征不相符。

3) 关于水压试验过程中变化的压力载荷是导致裂纹开裂的应力来源。主管道设计压力为17.23 MPa,制造厂按设计要求进行水压试验,符合规范规定。该次制造不符合项的处理中尝试按31.7 MPa压力进行了初步核算,结果显示轴向拉应力最大值仅为6.88

MPa,远远低于取样管材质的屈服强度,可见水压试验过程中变化的压力载荷会导致裂纹开裂的可能性是微乎其微。

4.3 该案例的裂纹定性分析

看到出现在焊缝附近的裂纹,一般首先会联想到焊致开裂,之前的报告对此已予以排除,报告的分析过程提供了大量的试验验证,并未找到关联证据。该案例的裂纹具有多点起源、裂纹起源于外表面和并未位于焊致薄弱部位、裂纹为穿晶裂纹和并未仅沿着焊致材质薄弱路径扩展等特征,与由焊接工艺原因引起的裂纹一般特征不相符合,可以排除是焊接质量致裂的推测^[4]。

对于奥氏体不锈钢,理论上不存在铁素体钢具有的延迟开裂机制,可以排除焊接质量致裂^[5]。焊接后进行的渗透检验是合格的,也证明了这一点。共性事件多次重现使得各方关注度极高,制造厂质保控制体系运行有效,且材质和工艺控制均在有效范围,焊接试验验证结果均有效,从管理角度完全可以排除焊接质量致裂的假设状况。

裂纹所具有的多点起源,裂纹起源于外表面应力集中部位,裂纹分布在环向相对区域、沿主应力垂直方向,裂纹沿着径向往内部穿晶扩展等特征,在金属断裂理论上均趋向于归结为疲劳失效,结合扫描电镜分析展示的微观疲劳辉纹特征,可得出取样管开裂机理是疲劳失效所致的初步结论^[6]。

4.4 交变应力来源分析

焊后渗透检验合格,而水压试验后再次渗透检验则发现开裂,前面又排除了水压试验致裂。根据制造工艺流程,取样管开裂可能出现在堵头机加工工序。

水压试验后机加工去除堵头的断面铣削如图7所示。水压试验后,为了将堵头去除,需要在距取样管上端面10 mm深度处铣削去除取样管和堵头的密封焊连接体,切削量为10 mm深。

机加工选用的是新型面铣刀,因缺乏切削力数据,只能用反证方式验证计算:假定铣削刀头施加的切削力为7000 N,距切削点约80 mm的焊缝部位,仅轴向拉应力即可达到517 MPa,这已经是材料的抗拉强度极限,再综合考虑推进力、焊接残余拉应力、几何不连续区应力集中,铣削加工中一个较小的切削力足以导致微区开裂。从制造经验看,铣削刀头进行面铣,7000 N切削力并不算很大,达到并不难,因此推断

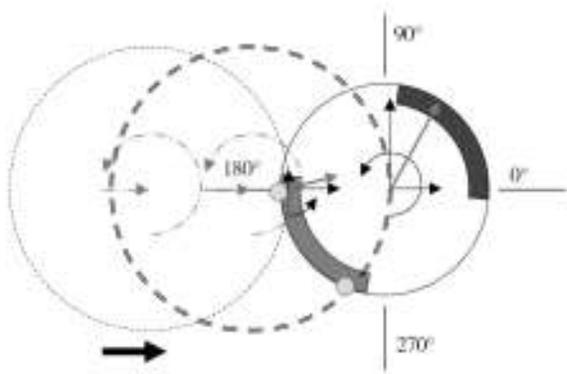


图7 堵头去除工艺

Fig.7 Schematic diagram of plug removal process

铣削刀头面铣取样管时,由于等效与较大的弯矩作用,吃刀瞬时结构应力已处于较高水平,若再叠加加工过程中震动产生的交变应力,制造阶段出现疲劳损伤就不难解释。

铣削加工过程中,随着铣刀盘的行进,刀盘切削力和推进力的合力偏离基轴一定角度出现最大值,并且在叠加吃刀瞬时结构应力和焊接残余应力的部位产生最大拉、压应力。由于推进力基本稳定不变,刀盘旋转一周,极大值的切削力会由小变大再变小,最终的合力造成最大拉应力点在 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 区间交替摆动。在制造现场了解到,堵头切削量为10 mm,铣削每次吃刀深度为0.2~0.3 mm,需要反复多次铣削才能去除堵头。当反方向铣削时,切削方向不变,推进力不变,刀盘旋转一周中极大值的切削力会由小变大再变小,最终的合力造成最大拉应力点在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 区间交替摆动。

在铣削加工过程中,随着铣刀盘的行进,刀盘每触及工件初始吃刀点产生最大拉应力,相对的背刀侧则产生最大压应力,铣除后原吃刀点释放回弹造成最大压应力,相对的背刀侧则因释放回弹变成最大拉应力,完成一个交变应力循环。奥氏体不锈钢属面心立方结构,晶内易发生位错滑移,材料的抗疲劳损伤能力相对较弱,即使不存在原始缺陷,在应力的作用下也较易因滑移萌生初始裂纹,面临这样的循环交变应力,再叠加相对高的焊接残余应力以及几何不连续区域的应力集中,一个较小的刀头切向力就可以在图7中 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 及 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间区域产生疲劳裂纹。

综上所述,来回往复多次的铣削,造成在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 及 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间持续萌生微裂纹,反复出现,不断沿径向向内扩展,最终形成宏观疲劳裂纹。

5 结语

该取样管焊缝焊趾部位多源裂纹不是水压试验所产生,而是疲劳裂纹。疲劳应力主要来自水压试验后取样管堵头切除加工工序,铣削不良是引发疲劳裂纹的关键因素。

制造阶段应保证合格产品交付工程现场,每个工序都不能大意,应严格控制焊接工艺,保证角接环缝的型面质量,圆滑过渡,尽量减少存在形状突变;应磨除已存较深的加工沟槽,改善应力集中状况;加强加工前的准备,对角接环缝附近区域采取稳固措施后再进行加工,以降低加工操作的瞬态应力水平;在取样管堵头切除加工时,应优选刀头,避免高切削力,并严格控制操作手法,减少发生摇摆、扭转现象,尽量减小疲劳载荷,施治根除水压试验后由于加工操作导致的开裂。

参考文献:

- [1] 周振丰. 金属熔焊原理及工艺[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
ZHOU Zhen-feng. The Principle and Technology of Metal Welding[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [2] 孙志雄. 焊接断裂力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1990.
SUN Zhi-xiong. Welding Fracture Mechanics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1990.
- [3] 孟广吉,贾安东. 焊接结构强度和断裂[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
MENG Guang-ji, JIA An-dong. Welding Structures Strength and Fracture[M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [4] 李旭东,穆志韬,刘治国,等. LY12CZ航空铝合金腐蚀疲劳断口研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 9—12.
LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo, et al. Corrosion Fatigue Fracture Analysis of LY12CZ Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 9—12.
- [5] 何健宏,唐祥云,陈南平. 晶粒大小对双相不锈钢的强度和氢致开裂的影响[J]. 金属学报, 1990, 26(4): 257—261.
HE Jian-hong, TANG Xiang-yun, CHEN Nan-ping. Influence of Grain Size on Strength and Hydrogen Induced Cracking of Duplex Stainless Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1990, 26(4): 257—261.
- [6] 王华庭,李建新,冯淑华,等. 发动机排气管联接螺栓断裂失效分析[J]. 金属加工, 2013(1): 55—56.
WANG Hua-ting, LI Jian-xin, FENG Shu-hua, et al. Fracture Failure Analysis of Connecting Bolt of Engine Exhaust Pipe[J]. Metal Working, 2013(1): 55—56.