

# 基于护卫传感器声发射技术的封头分层缺陷安全评估

张晓斌,孙小兵,曾德程,江村

(广西特种设备监督检验院,南宁 530219)

**摘要:**针对椭圆封头存在大面积分层缺陷,计算无应力集中时的封头可靠性,同时根据压力储罐介质和加载特点,采用声发射技术对分层缺陷进行了局部监测。监测过程中采用基于护卫传感器声发射技术减少试验加载过程中介质波动对检测结果的影响。声发射监测结果表明,分层缺陷在交变载荷的作用下,存在缺陷扩展的趋势。

**关键词:**分层缺陷;护卫传感器;声发射检测;安全评估

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2012)02-0028-03

## Safety Valuations of the Ellipsoidal Heads Lamination Defect Based on Guard Sensors in Acoustic Emission Technology

ZHANG Xiao-Bin, SUN Xiao-Bing, ZENG De-Cheng, JIANG Cun

(Guangxi Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Nanning 530219, China)

**Abstract:** Armed at the large areas lamination defect in the ellipsoidal heads, its reliability is analyzed without stress concentration. According to the feature of pressure vessel working medium and loading method, the area monitoring of lamination defect is done by acoustic emission testing technique. In order to reduce the useless signal caused by the change loading during the experiment, the guard sensors technology is adopted. The results indicate that there exists the probability of the lamination defect can spread under the alternating load.

**Keywords:** Lamination defect; Guard sensors; Acoustic emission testing; Safety evaluations

某立式压力储罐 2006 年 11 月制造,2007 年 8 月在某水电站投入运行,其材质为 16MnR;工作参数为设计压力 6.8 MPa,实际工作压力 5.4~6.3 MPa,设计温度 0~55 °C,介质为汽轮机油和压缩空气;其几何参数为直径 1200 mm,壁厚 30 mm,容积 3.94 m<sup>3</sup>;按 1999 版《容规》,其类别为Ⅱ类容器。储罐出厂时有质量证明书、产品合格证、监督检验证书、铭牌完整,但缺少竣工图,封头无单独的质量证明书。对接焊缝经 20% 射线检测,按 JB/T 4730—2005 Ⅱ 级合格,整体热处理后,水压试验( $P_T = 8.5 \text{ MPa}$ )合格。

投入使用两年半后,2010 年 1 月第一次对压力

储罐进行全面检验。测厚检测时,发现封头存在大面积分层缺陷。上封头的整个椭圆面及直边段的部分位置都存在分层缺陷,缺陷深度距表面约为 12.6~15.6 mm,且为连续分层缺陷,缺陷与表面基本平行。2010 年的检验结论是储罐监控使用,封头直边段的分层缺陷作为重点监控部位。2011 年 1 月又对该储罐进行了检测,发现直边段缺陷有扩展。

文献[1]分析了分层缺陷的安全及可靠性,但其所述分层缺陷面积比较少,对大面积分层缺陷参考价值不大。由于本压力容器是在交变载荷下,分层缺陷在其作用下是否具有活性,是判定该容器是否能安全使用的关键。由于压力储罐的充装介质为汽轮机油和压缩空气,且以空气源作为动力源,在容器的下部注入,故拟用基于护卫传感器的声发射方法来排除噪声声发射信号,以便正确对此缺陷进行安

收稿日期:2011-03-14

作者简介:张晓斌(1972—),男,博士,高级工程师,主要从事特种设备安全分析、故障诊断及无损检测新技术研究。

全评估,确定该压力容器是否可继续使用。

## 1 压力储罐的应力计算

分层缺陷如在没有应力集中的情况下已经判为危险,那该容器就可以直接判废。首先分析在没有应力集中的情况下该容器的危险级别,确定其是否安全。

假设封头分层缺陷没有应力集中,其应力为内压引起的薄膜应力和椭圆封头与筒体连接处变形不协调所致的弯曲应力,按薄壳理论求解<sup>[2-3]</sup>。压力储罐受力分析图如图1所示。

为保持连续体,在筒体及封头连接处将产生边缘力 $Q_0$ 和边缘力矩 $M_0$ ,由此引起的弯曲变形与薄膜变形叠加后,筒体及封头的总变形量一定相等,即:

$$\begin{cases} \Delta_1^P + \Delta_1^{Q_0} + \Delta_1^{M_0} = \Delta_2^P + \Delta_2^{Q_0} + \Delta_2^{M_0} \\ \theta_1^P + \theta_1^{Q_0} + \theta_1^{M_0} = \theta_2^P + \theta_2^{Q_0} + \theta_2^{M_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Delta^P, \Delta^{Q_0}, \Delta^{M_0}$ 为在 $P, Q_0, M_0$ 作用下产生的径向位移; $\theta^P, \theta^{Q_0}, \theta^{M_0}$ 为在 $P, Q_0, M_0$ 作用下产生的径向转角。以下标1表示圆筒,下标2表示椭圆壳,得:

$$\begin{aligned} \Delta_1^P &= -\frac{PR^2}{Et}(1-\frac{\mu}{2}) \quad \theta_1^P = 0 \\ \Delta_2^P &= -\frac{Pa^2}{2Et}(1-\frac{a^2}{b^2}-\mu) \quad \theta_2^P = 0 \\ \Delta_1^{M_0} &= -\frac{1}{2\beta^2 D}M_0 \quad \Delta_1^{\theta_0} = -\frac{1}{2\beta^3 D}\theta_0 \\ \theta_1^{M_0} &= -\frac{1}{\beta D}M_0 \quad \theta_1^{\theta_0} = \frac{1}{2\beta^2 D}\theta_0 \\ \Delta_2^{M_0} &= -\frac{1}{2\beta^2 D}M_0 \quad \Delta_2^{\theta_0} = \frac{1}{2\beta^3 D}\theta_0 \\ \theta_2^{M_0} &= -\frac{1}{2\beta D}M_0 \quad \theta_2^{\theta_0} = \frac{1}{2\beta^3 D}\theta_0 \end{aligned}$$

式中 $\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}$ ;  $E$ 为弹性模量; $D = \sqrt{Rt}$

$\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$ ;  $\mu$ 为泊松比。取 $E=2.09 \times 10^5$  MPa, $\mu=0.3$ , $P=6.8$  MPa, $R=0.6$  m, $t=0.03$  m,计算得 $\theta_0=328.772$ , $M_0=0$ , $\beta=9.577$ , $D=0.517 \times 10^6$ 。

发生在封头连接边缘区域壳体处内表面的总应力为:

$$\begin{aligned} \sum \delta_x &= \delta_x^P + \delta_x^M = \delta_x^P \\ \sum \delta_\theta &= \delta_\theta^P + \delta_\theta^M = \delta_\theta^P - \frac{Ewt}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $w=\Delta_2^{M_0}+\Delta_2^{Q_0}$ ,根据胡金伯格方程:

$$\begin{aligned} \delta_x^P &= \frac{P}{2t} \frac{[a^4-x^2(a^2-b^2)]^{\frac{1}{2}}}{b} \\ \delta_\theta^P &= \frac{P}{2t} \frac{[a^4-x^2(a^2-b^2)]^{\frac{1}{2}}}{b} \\ &\cdot \left[ 2 - \frac{a^4}{a^4-x^2(a^2-b^2)} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

当椭圆 $a=2b$ 时,得:

$$\begin{aligned} \sum \delta_x &= 105 \sqrt{1.44-3x^2} \\ \sum \delta_\theta &= \frac{P}{2t} \frac{16b^2-6x^2}{(16b^2-3x^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{Ewt}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

当 $p=6.3$  MPa, $x=0.6$  m, $b=0.3$ , $t=0.03$ 时:

$$\begin{aligned} \sum \delta_x &= 63 \text{ MPa} \\ \sum \delta_\theta &= -129.77 \text{ MPa} \end{aligned}$$

即总应力 $\delta=\sqrt{\delta_x^2+\delta_\theta^2}=144.25$  MPa,设计许用应力 $[\sigma]^t=169$  MPa,故 $\sigma_{\max}<[\sigma]^t$ 。

如分层缺陷无应力集中时,可认为此设备安全。

## 2 分层缺陷声发射检测方案确定

由压力储罐的测厚试验可知,其上封头椭圆面全为分层结构,直边段也有部分分层缺陷,且所有分层都连续。分层缺陷距上表面的厚度在12.6~15.5 mm之间,基本与表面平行。由此可知,设备的上封头椭圆段和部分直边段基本可看作是由两层结构组成。设备在没有受压时,两层之间没有压力;在受到内压时,两层之间有可能存在磨擦、挤压等现象。因此,当受到交变载荷时,分层缺陷有扩展的趋势,就有产生声发射信号的可能,故采用声发射技术来检测分层缺陷是否具有活性。

由于压力储罐的工作介质为汽轮机油和压缩空气,比例为2:1,且由空气源作为动力源,由容器的下部注入。检测过程中,由于空气从油中穿过,可能引起油泡,油泡的破裂引起的声发射信号可能会影响检测的有用信号,同时也可能由于阀门泄漏等原因引起的声发射信号也会影响声发射信号的质量,故选择基于护卫传感器的声发射检测技术来对分层缺陷的活性进行判定。理论上可以较好地屏蔽护卫传感器以下传来的声发射信号,以此来保证得到真实的分层缺陷扩展信号。

根据容器的尺寸及结构特点,选择四个传感器作为定位组,封头顶部布置一个,封头与筒体环焊缝下50 mm处周向均布三个传感器,在环焊缝下500 mm处与主传感器交叉布置三个护卫传感器,如

图 2 所示。

由压力储罐设备特点可知,设备噪声声发射信号主要由底部产生,在测定衰减、波速和背景噪声后,根据主传感器和护卫传感器之间的最大距离,确定主传感器的闭锁时间为  $1\text{ }200\ \mu\text{s}$ ,因此在护卫传感器被触发后,令主传感器在闭锁时间内闭锁,不产生定位<sup>[4]</sup>。但记录所有超过阈值的声发射撞击,以利于数据的事后分析处理。



图 2 传感器布置图

### 3 声发射对分层缺陷的检测

由于设备的工作压力是交变压力,工作载荷运行如图 3 所示,交变周期是  $20\sim30\text{ min}$ ,压力波动范围在  $5.4\sim6.3\text{ MPa}$ 。声发射设备采用 PAC 公司的 SAMOS16,仪器具体设置参数为:检测方式为局部监测;检测频率  $100\sim400\text{ Hz}$ ;传感器型号 R15I;固定方式为磁夹具;耦合剂为凡士林;传感器数量为 7 个;传感器平均灵敏度为  $98\text{ dB}$ ;最大灵敏度  $99\text{ dB}$ ;背景噪声  $<35\text{ dB}$ ;门槛电平  $40\text{ dB}$ ;最小灵敏度  $98\text{ dB}$ ;增益  $40\text{ dB}$ ;模拟源为  $0.5\text{ mm HB}$  笔芯断铅信号;传感器最大间距  $1\text{ }320\text{ mm}$ ;模拟源距离为  $1\text{ }350\text{ mm}$ ;衰减测量传感器编号为 1 号;信号幅度  $74\text{ dB}$ 。

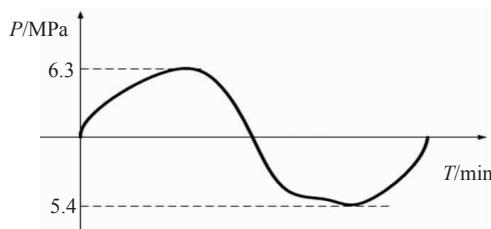


图 3 工作载荷运行图

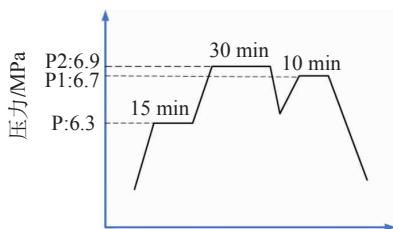
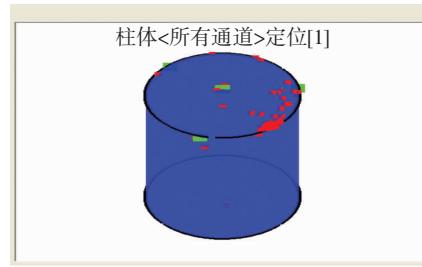
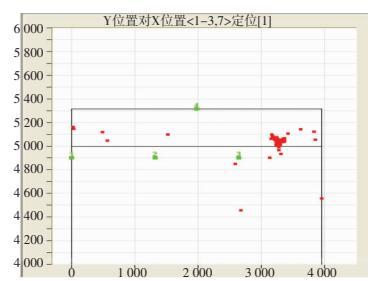


图 4 声发射压力加载图

各通道阈值设定为  $40\text{ dB}$ ,在  $6.7\text{ MPa}$  压力开通护卫传感器功能的情况下,封头声发射定位图如图 5 所示,共有 287 个定位事件。通过软件设置,对



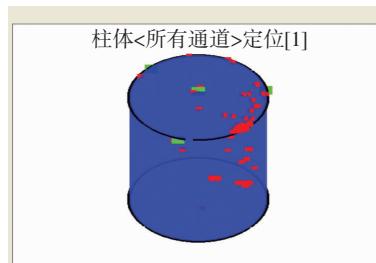
(a) 三维柱体定位图



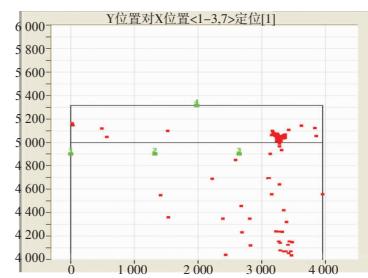
(b) 二维平面定位图

图 5 有护卫传感器时的保压声发射定位图

同一组数据关闭护卫传感器功能时,定位结果如图 6 所示,共有 423 个定位图。



(a) 三维柱体定位图



(b) 二维平面定位图

图 6 无护卫传感器时的保压声发射定位图

由图 5 和 6 对比分析可知,有护卫传感器时,检测到的声发射信号很明显比没有护卫传感器时得到的声发射信号干净,更利于判断真实的声发射信号源。

根据 GB/T18182—2000《金属压力容器声发  
(下转第 64 页)

$L_1$  分别为 55 和 30 mm,  $L'$  和  $L_2$  分别为 67 和 36 mm。

## 2 役前/在役射线检查技术的探讨

核电站主回路系统射线检测从检测器材的准备、检测的实施、结果的记录及验收是一系列复杂、细致、严格的检测技术的结合,对于如何提高射线检测质量,尽量减少工作时间,降低工作人员的受辐照剂量,笔者提出以下几方面建议:

(1) 优化射线检测中所使用的工具架。工具架的设计开发与优化是提高射线检测技术的重要前提,包括工具架的定位、精度及现场可操作性,还需考虑工具架的重量能否满足操作人员要求等。

(2) 射线源尺寸、活度及位置、焦距、胶片系统、增感屏、滤光板类型、曝光时间等参数的系统性组合优化,从而提高射线底片质量。

(3) 射线检测的自动化和实时成像。射线检测的自动化要求高质量的机械和电气控制系统和相关软件的辅助,同时需要尝试引进和提高实时成像技术。

## 3 结语

核电站主回路系统是核电站役前/在役检查的主要检测对象,笔者从射线检测中透照方式入手,比

较系统地介绍了核电站主回路系统的主要设备蒸汽发生器 SG、反应堆压力容器 RPV 以及稳压器 PRZ 的透照方式及实施方法,并对各透照中使用的专用工具架,如 SG 专用工具架、TENIS-G 检查装置以及“钓鱼”工具架做了介绍。以岭澳核电站 3,4 号机组役前检查顺利完成的实际经验为依托,为以后役前/在役检查打下基础,并为如何提高射线检测质量提了几点探讨性建议。

### 参考文献:

- [1] 强天鹏. 射线检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2007.
- [2] 周大禹. 恰希玛 300 MW 核电站役前  $\gamma$  射线检验[J]. 无损检测,2001,23(11):499—501.
- [3] 夏焕澄,孙凯,刘彧. 岭澳核电站  $\gamma$  射线探伤工艺改进[J]. 吉林电力,2004(2):24—26.
- [4] 周大禹. 岭澳核电站役前  $\gamma$  射线检验技术[J]. 无损检测,2003,25(10):544—545.
- [5] 郑世才. 射线实时成像检测技术与射线照相检测技术的等价性讨论[J]. 无损检验,2003,25(10):500—503.
- [6] 李衍. 射线实时成像检测技术(4)[J]. 无损检测,1996,18(10,11):290—294,324—327.
- [7] 郭伟灿,马夏康,毛建军. 铝合金管道焊缝射线检验工艺研究及缺陷评定[J]. 无损检测,2004,26(05):239—243.

(上接第 30 页)

射检测及结果评价方法》<sup>[5]</sup>,对检测结果进行分析,得到如下结论:在压力  $>6.0$  MPa 时,强度  $Q < 60$  dB,为弱强度,活性为强活性,源的综合等级为 D 级;在压力  $<6.0$  MPa 时,强度  $Q < 60$  dB,为弱强度,活性为非活性,源的综合等级为 A 级。

根据上述判定结果可知,此封头的分层缺陷局部区域存在强活性,在交变载荷下存在扩展的可能。缺陷的扩展也在 2011 年的检验中得到了验证。

## 4 结论

由于椭圆封头存在大面积分层缺陷,采用应力分析验证了无应力集中时缺陷封头的可靠性。根据压力储罐的工作介质和加载特点,采用基于护卫传感器的声发射技术对分层缺陷进行了局部监测。监测结果表明,在有护卫传感器的条件下,声发射的信

号更能真实地反映缺陷声发射源产生的信号;分层缺陷在交变载荷的作用下,存在缺陷扩展的可能。根据检测结果,建议使用单位更换封头,在未更换封头前尽量使压力保持在 6.0 MPa 以下使用。

### 参考文献:

- [1] 王志文,蔡仁良. 化工容器设计[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 郑津洋,董其伍,桑芝富. 过程设备设计[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [3] 盛水平. 80 m<sup>3</sup> 液化气卧罐封头夹层缺陷的安全分析[J]. 压力容器,1993,10(5):76—79.
- [4] 林春明,康叶伟,王维斌,等. 护卫传感器在拱顶储罐底声发射检测中的应用[J]. 无损检测,2010,32(8):620—622.
- [5] GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法[S].