

# 核电站蒸汽发生器传热管与管板胀管段的 涡流检测

冯俊, 张伟, 陈胜宇, 肖镇官, 曾玉华, 杨帆  
(核动力运行研究所, 武汉 430223)

**摘要:** 核电站蒸汽发生器传热管与管板胀接位置在制造完成后, 必须对其进行检测。利用涡流检测方法对胀管段实施了无损检测, 同时对发现的缺陷进行了分析和总结, 可为同行在以后的实际检测工作中提供技术参考。

**关键词:** 蒸汽发生器; 胀管; 涡流检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2021)09-0022-03

## Eddy current testing of heat exchange tube and tubesheet expansion section of steam generator in nuclear power plant

FENG Jun, ZHANG Wei, CHEN Shengyu, XIAO Zhenguan, ZENG Yuhua, YANG Fan  
(Research Institute of Nuclear Power Operation Technology, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** The quality of the expansion joint of the heat transfer tube of the nuclear power plant steam generator and the tube sheet must be strictly tested while being manufactured. The eddy current testing method is used to implement nondestructive testing of the expanded pipe section. At the same time, the defects found in the testing process are analyzed and summarized, which can provide technical reference for the peers in the actual testing work in the future.

**Key words:** steam generator; expand tube; eddy current testing

蒸汽发生器是核电站最大的换热设备, 承担着一次侧与二次侧的热交换任务, 该设备将一回路主冷却剂从反应堆堆芯带出的热量传给二回路给水系统, 使之产生蒸汽, 推动汽轮机做功。同时蒸汽发生器为防止核泄漏的第二道屏障, 属于核安全一级设备。蒸汽发生器的制造工艺极其复杂, 每一道工艺都影响其运行安全, 尤其是传热管与管板的胀接工艺<sup>[1]</sup>, 因此必须对传热管与管板胀接后形成的胀管段以及过渡区进行全范围涡流检测<sup>[2]</sup>, 才能保证其在役期间的安全运行。胀管段涡流检测范围如图 1 所示。

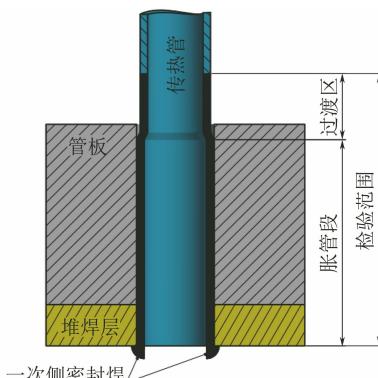


图 1 胀管段涡流检测范围示意

## 1 胀接工艺介绍

核电站蒸汽发生器传热管和管板采用焊接和胀接结合的方式进行连接, 传热管与管板一次侧堆焊层之间为密封封口焊, 传热管与管板管孔之间为胀接固定。胀接工艺消除了传热管与管板管

收稿日期: 2020-02-16

作者简介: 冯俊(1982—), 男, 本科, 工程师, 主要从事核设备的涡流检测和相关技术工作

通信作者: 冯俊, 297154546@qq.com

孔之间的间隙，提高了耐腐蚀性。以 M310 型压水堆为例，传热管在管孔段受到均匀的液压作用，随着液压的增大，传热管先发生弹性形变后再发生塑性扩张<sup>[3]</sup>，将传热管紧密固定在管孔内。胀接工艺如图 2 所示。

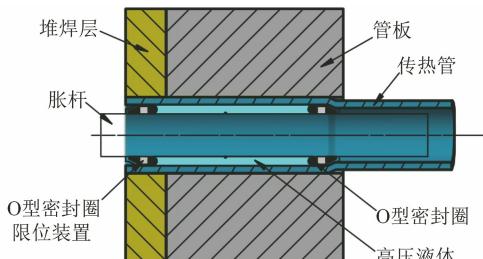


图 2 胀接工艺示意

## 2 胀管段涡流检测

### 2.1 胀管段涡流检测实施方法

由于蒸汽发生器传热管与管板胀接的工艺特殊，无法采用目视、超声等无损检测方法对胀管段及过渡区进行检测，因此，涡流检测成为胀管段质量检测的唯一可行方法，同时涡流检测具有检测效率高、检测可靠等特点。以 M310 型压水堆为例，具体实施方法及检测难点如下所述。

#### 2.1.1 实施方法

通过计算机远程控制多频涡流仪、探头定位器和探头推拔器，实现涡流探头在被检传热管中的前进和后退，在探头后退的过程中完成对传热管涡流数据的采集，同时将采集到的数据存储在硬盘或光盘中。由数据分析人员利用计算机远程调用数据，对传热管涡流信号原始数据进行两次独立的数据分析。

检测过程中所需设备和参数设置如下。

(1) 涡流仪：型号为 OMNI-200R；频率为  $1\text{ kHz} \sim 1000\text{ kHz}$ ；采样率不低于  $2000\text{ 点}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2) 涡流探头：BOBBIN 探头型号为 SBBU-15.5-MH-4A/N，用于传热管全管检测；MRPC 旋转探头型号为 +Point-.610-MRPC，用于胀管过渡区检测。

(3) 标定管：基于 RSEM 标准设计，用于信号基准设置。

(4) 检测频率：550 kHz(主检测频率)，300 kHz(低频辅助检测频率)，100 kHz(消除支撑板信号的辅助频率)，900 kHz(传热管胀管区轮廓曲线内径测量频率)，20 kHz(显示定位、泥渣高度测量及胀管区轮廓曲线止胀点位置测量频率)。

### 2.1.2 检测难点

对于胀管段及过渡区的检测，涡流检测较其他无损检测方法具有明显优势，但也存在一些技术难点，这些难点降低了该区域的缺陷检出率，近年来，针对这些难点提出了一些解决措施，以下列举了 3 条实际检测过程中遇到的技术难点及对应的解决措施。

(1) 二次侧管板边缘信号的影响，采用旋转探头检测能够明显区分 TTS(管板顶端)信号和缺陷信号。

(2) 采用三混频(通道 1-5-9)技术能够有效抑制胀管过渡区信号<sup>[4]</sup>。

(3) 胀管轮廓曲线的测量采样率应至少为  $5\text{ 点}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，否则测量结果会出现较大偏差。

### 2.2 胀管段缺陷

#### 2.2.1 肿胀

肿胀发生在传热管胀管区域，形成原因为：

- ① 管板在钻孔时产生加工误差，使管孔孔径发生局部变化，胀管时造成传热管出现向外凸出的现象；
- ② 胀管工艺不当，局部压力过大导致胀管局部直径超过设计要求，造成肿胀。一般在主检测频率差分通道可明显分辨；由于肿胀缺陷沿传热管内部周向向外凸出，与 DNT(向内凹陷，相位角一般为  $180^\circ$  左右)缺陷的形成原因正好相反，且类似于内环槽的缺陷信号，所以形成相位角接近  $0^\circ$  或者为内壁显示角度的涡流信号<sup>[5]</sup>。肿胀结构及其涡流信号如图 3 所示。

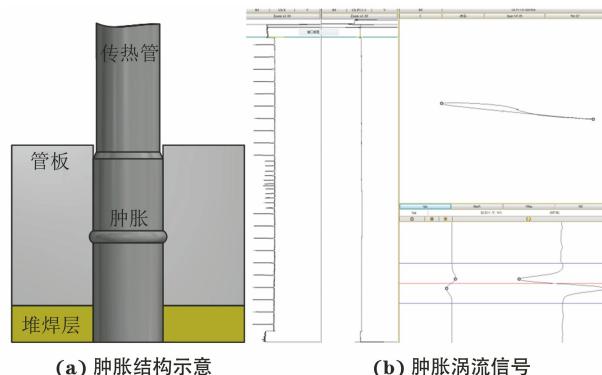


图 3 肿胀结构及其涡流信号

#### 2.2.2 漏胀

漏胀发生在蒸汽发生器制造期间，其产生原因是传热管和管板管孔之间未进行胀接。漏胀涡流信号特征与正常胀管信号比较长条图无明显“台阶”；且分量图无明显内径突变信号。漏胀检测基于涡流提离效应，正常胀管段检测时，探头在胀管区和非胀管区的运动过程中，由于内径突变将产生提离效应，但无胀管的传热管不会产生提离效应，就不会形成

内径突变信号,利用提离原理能够对漏胀实施有效检测。漏胀结构及其涡流信号如图 4 所示。

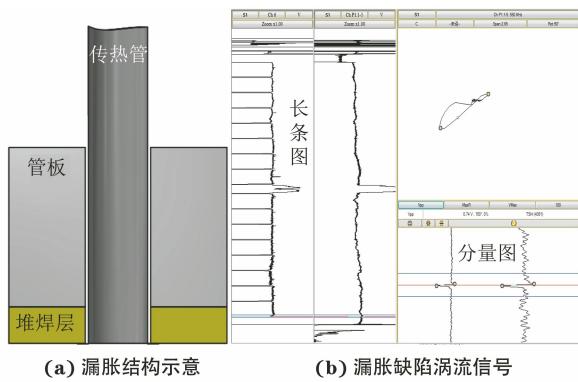


图 4 漏胀结构及其涡流信号

### 2.2.3 超胀和欠胀

超胀发生在传热管胀管期间,为了保证传热管不被胀破,止胀点不得超出管板,即止胀点和二次侧管板之间(见图 5)必须保持一定距离(距离为  $x$ ),M310 堆型  $x$  通常为 0~6 mm,但在实际胀接过程中,各种误差使得止胀点和二次侧管板之间距离小于  $x$ ,即形成超胀。欠胀正好与之相反,即止胀点和二次侧管板的距离大于  $x$ 。止胀点是胀接工艺中非常重要的一个参数,超胀易造成传热管胀破,欠胀易造成二次侧泥渣堆积,加速传热管腐蚀,严重时会造成一次侧核物质外泄。

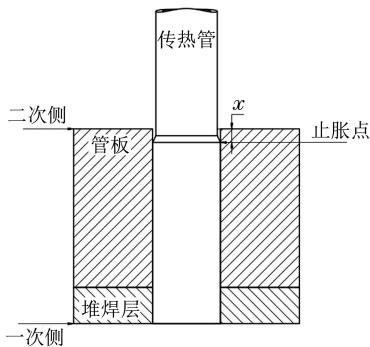


图 5 止胀点与管板二次侧距离示意

鉴于止胀点和管板二次侧之间间隙距离  $x$  的重要性,胀接工艺完成后必须对其进行精确测量。目前通用的测量方法为涡流轮廓曲线检测技术,其与人工机械测量相比具有更高的灵敏度,且检测效率高。轮廓曲线检测原理为涡流的提离效应,检测信号与线圈和被检测对象距离的平方成反比,该方法可以精确检测出传热管内径变化量,同时能够精确确定止胀点位置。涡流轮廓曲线测量结果如图 6 所示。

### 2.2.4 胀管过渡区内壁缺陷

传热管与管板采用液压胀接工艺之前,通用的

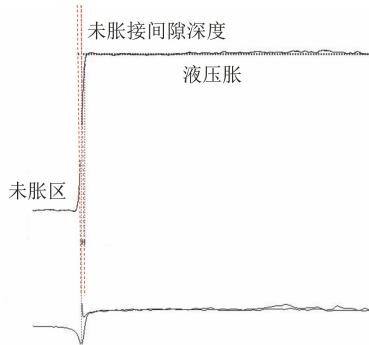


图 6 涡流轮廓曲线测量结果

胀接工艺为机械胀,由于机械胀工具结构复杂,在胀接时胀管工具易对传热管内壁造成损伤,形成周向缺陷,该缺陷涡流信号幅值一般较大,在主检测频率差分通道可明显分辨,且相位角小于 40° 呈内壁角度(大于 40° 呈外壁角度)。典型胀管过渡区内壁缺陷目视检测结果及其涡流信号如图 7 所示。

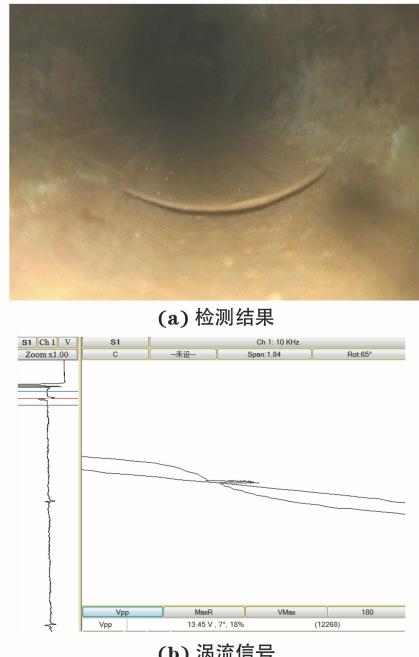


图 7 典型胀管过渡区内壁缺陷检测结果及其涡流信号

## 3 结语

(1) 机械加工可使传热管与管板胀接时形成肿胀,该缺陷涡流信号特征为:一般在主检测频率差分通道可明显分辨;相位角接近 0° 或者为内壁显示角度。

(2) 传热管和管板胀接时,施工人员的疏忽可导致漏胀发生,该缺陷涡流信号特征为:与正常胀管信号比较,长条图无明显“台阶”;分量图无明显内径突变信号。

(下转第 38 页)

G18 辊 2 号试验辊振动消应力后的检测结果如图 5 所示, 检测线的位置标记如图 3 所示, 图 5(a), (b) 分别为消应力处理后的环向、轴向残余应力分布; 为观察不同设计压力下的消应力效果, 绘制的消应力工艺与消除效果曲线如图 5(c) 所示。

从消除应力检测结果可以看出, 检测结果具有以下特点。

(1) 消应力处理后, 残余应力的平滑分布变为跳动分布, 即其分布由平滑、离散分布变为跳动、集中分布。

(2) 随着消应力工艺压力的改变, 最终残余应力的分布与消应力的压力曲线吻合良好。距离驱动端 600~700 mm 处的测量点的轴向应力最低、环向应力最低, 此时消应力工艺的压力绝对值最大。

(3) 从降低应力效果来讲, 消应力压力超过 0.3 MPa 时, 会出现过大的压应力, 实际生产中可不采用。

#### 4 结语

(1) 3 种工艺制造的阴极辊的残余应力分布(沿测量线)较为平缓, 其表面以压应力为主。

(2) 采用毫克能超声振动设备进行消除残余应力处理后, 残余应力的分布由平滑、离散分布变为跳动、集中分布, 残余应力的降低效果与振动消应力的压力密切相关。

#### 参考文献:

- [1] 许俊如, 吉毅松. 对电解铜箔装备发展的思考[J]. 原材料与设备, 2015(6): 43-47.
  - [2] 许俊如, 吉毅松, 蔡瑞, 等. 生箔机设计中的关键技术[J]. 原材料与设备, 2016(5): 43-48.
  - [3] 张永清, 吉毅松, 孙丽红. 国内外电解生箔机及铜箔发
  - (上接第 24 页)
  - [4] 传热管与管板胀接时误差可导致未胀接间隙深度偏离设计范围, 从而形成超胀或欠胀, 此类缺陷需通过涡流轮廓曲线检测技术来进行测量。
  - [5] 机械胀工艺易造成胀管过渡区内壁周向缺陷, 该缺陷涡流信号特征为: 幅值一般较大, 在主检测频率差分通道可明显分辨; 相位角小于 40°, 呈内壁角度。
- 参考文献:**
- [1] 石曾伟, 高俊根, 刘世辉. 核级热交换管子管板胀接及展情况的介绍[J]. 河北建筑工程学院学报, 2013, 31(4): 80-82.
  - [2] 任利娜, 张建勋, 鞠鹤. 钛焊接阴极辊接头及母材均晶化研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 32-35.
  - [3] 任利娜, 侯智敏, 牛清, 等. 电解铜箔用阴极辊的研究进展及发展趋势[J]. 精密成形工程, 2020, 12(2): 84-92.
  - [4] LU H, LIU X S, YANG J G, et al. Ultrasonic stress evaluation on welded plates with Lcr wave[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(1): 70-74.
  - [5] LU H, MA Z Q, LIU X S, et al. Ultrasonic residual stress measurement of 300 km/h high speed train body [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 29-32.
  - [6] 路浩, 刘雪松, 杨建国, 等. 激光全息小孔法验证超声波法残余应力无损测量[J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 77-79, 117.
  - [7] 路浩, 刘雪松, 孟立春, 等. 高速列车车体服役状态残余应力超声波法无损测量及验证[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 81-83, 117.
  - [8] 路浩, 马子奇, 刘雪松, 等. 300 km/h 高速列车车体残余应力超声波法无损测量[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 29-32.
  - [9] 路浩, 李军. 箱型搅拌摩擦焊结构残余应力超声波法测量[J]. 焊接, 2014(3): 27-30, 70.
  - [10] 路浩. 铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊残余应力超声波法测量[J]. 焊接, 2015(1): 25-28, 70.
  - [11] 路浩. 焊接残余应力场声弹性不稳定分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 105-108, 118.
  - [12] 路浩. 基于全包络权重算法的超声波法残余应力无损测量系统[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 101-104.
  - [13] 路浩, 邢立伟, 邢敬伟. 超声波法焊接残余应力测量技术[J]. 焊管, 2019, 42(8): 50-55.
  - [14] 路浩, 朱政, 邢立伟. 高钢级管道残余应力超声波法检测及小孔法验证[J]. 油气储运, 2021, 40(5): 533-538.
  - [15] 路浩. 核电蒸汽发生器管子管板液压胀工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
  - [16] 任吉林, 林俊明, 徐可北. 涡流检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
  - [17] 刘一舟, 曹刚, 王晓翔. 核电站钛管内壁缺陷判伤曲线[J]. 无损检测, 2010, 32(9): 719-721.