

## 5 通道铁磁探测仪的研发与锅炉管堵塞检测<sup>\*</sup>

王玺润<sup>1,2</sup>, 张双楠<sup>1</sup>, 蔡桂喜<sup>1</sup>, 李建奎<sup>1</sup>, 张博<sup>1</sup>, 杨亮<sup>1</sup>, 武玉鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院金属研究所 沈阳, 110016) (2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院 合肥, 230026)

**摘要** 描述了 5 通道铁磁探测仪的研发和应用, 该仪器能在管外发现发电锅炉过热器管和再热器管内是否有铁锈堆积, 并评估堵塞程度, 目的是通过检测防止爆管事故。采用磁学探测方法, 在管外表面的 1 条圆周线上布置 5 个测量点, 进行了有限元数值模拟和标定曲线的计算。对计算结果进行了实验验证, 与计算值相比较, 测量值的标准误差(相对误差)为 5.2%。现场检测得到的堵塞面积与管内孔的面积之比, 与 X 射线摄影测得的结果比较, 确定铁磁探测仪检测的标准误差(绝对误差)为 3.9%。通过为 5 家热电厂进行过热器管和再热器管堵塞检测, 发现超标堵塞 30 多处, 解剖验证无一误报, 所以用该仪器进行堵塞检测能够防止上述锅炉管爆管事故。

**关键词** 铁磁探测仪; 过热器管; 再热器管; 铁锈碎屑堵塞检测

**中图分类号** TH878

### 引言

发电厂锅炉热管失效不仅给发电企业带来了巨大的经济损失, 还给企业员工的生命造成严重的威胁<sup>[1]</sup>。超临界/超超临界火电机组锅炉的过热器管和再热器管, 在锅炉热管中工作温度最高, 工作压力最大, 爆管事故最多。绝大多数爆管事故是由于管的内表面受到强烈的水蒸气氧化作用, 管道内壁发生锈蚀, 锈蚀薄膜剥落堆积, 导致了管壁局部高温蠕变, 由此引发爆管事故<sup>[2]</sup>。因此, 及时检测与评估管道内铁锈碎屑堵塞的程度, 对维护管道的安全运行具有重要意义<sup>[3-6]</sup>。

锅炉管内铁锈碎屑堵塞的无损检测方法主要有超声检测、射线检测、涡流检测和磁学检测, 其中超声检测受到管壁厚度、超声波入射角及铁锈碎屑的离散状态等因素的影响, 难以保证检测的准确性<sup>[7]</sup>。射线检测虽能够显示出管内铁锈碎屑堆积状态, 但检测工艺较复杂, 检测时间长, 对检测条件和射线防护要求高, 只能用于过热器管和再热器管的小比例抽检<sup>[8]</sup>。涡流检测容易受到工作频率、管的电导率、磁导率、管径、壁厚以及铁锈碎屑的电导率、磁导率、厚度、分布等因素的影响, 不易确定具体参数<sup>[9]</sup>。Ohtomo<sup>[10]</sup>提出用磁学技术进行铁锈碎屑检测, 此后国内学者将磁学检测技术进一步发展<sup>[11]</sup>。磁学检测技术通过在奥氏体不锈钢管外壁放置磁化器,

施加磁场将堆积的铁锈碎屑磁化, 利用磁敏传感器测量管外的磁场, 实现对奥氏体钢受热面管内铁锈碎屑堵塞程度的测量。当管内铁锈碎屑堆积厚度较大时, 单通道检测的检测信号很容易趋于饱和, 难以实现管内铁锈碎屑堵塞的定量检测<sup>[12]</sup>。

笔者介绍了 5 通道铁磁探测仪的研发以及在检测过热器管和再热器管铁锈碎屑堵塞方面的应用。现场检测结果表明, 该仪器能够定量地评估堵塞程度, 从而防止爆管事故。

### 1 仪器的原理、硬件和软件

图 1 为 5 通道铁磁探测仪和探头的照片。探头由外壳、手柄和 5 个铁磁探测器组成。探测器是用来探测铁磁性物体的敏感器件, 由磁化器和磁场测量元件组成。2 个条状钕铁硼永久磁铁和 1 个条状磁轭组成“Π”字形磁化器, 在 2 个磁铁的中间, 放置 1 个 SHJ5 型霍尔元件作为磁场测量元件, 如图 2 所示。当“Π”形磁化器开口的正前方不远处有铁磁性物体时, 霍尔元件测得的磁通密度减小, 这是由于一部分磁力线不再经过霍尔元件, 而是经过铁磁性物体由 N 极到达 S 极, 即铁磁物体的介入改变了无铁磁体条件下的磁场分布, 使霍尔元件所在处的磁场强度减小。铁锈碎屑的堆积形状见图 3, 起始于垂直管向水平过渡的转弯处, 向水平方向延伸, 表面比较平坦, 这可能与蒸汽流冲刷有关, 截面呈弓形。

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0209703); 国家自然科学基金资助项目(51605468, 51705470)  
收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-11-16

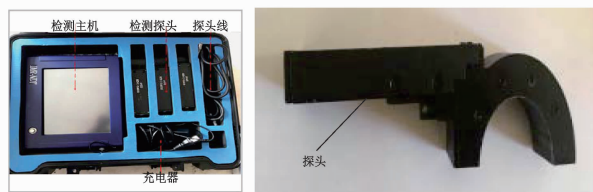


图1 铁磁检测仪及探头的照片

Fig. 1 Pictures of the tester detecting ferromagnetic objects and the probe

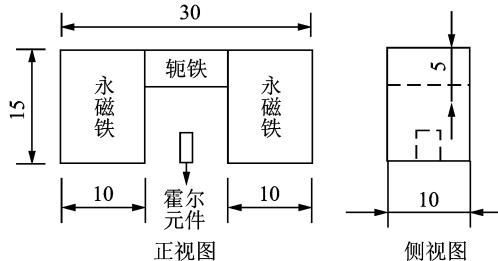


图2 探测器图(单位:mm)

Fig. 2 Diagram of the detector(unit:mm)

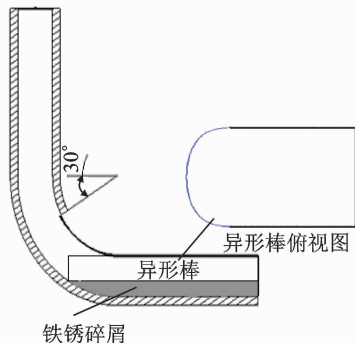


图3 弯管中加入铁锈碎屑的方法示意图

Fig. 3 The process of adding rust fragments into the bended tube

单通道铁磁检测仪因测量值饱和不能定量检测铁锈碎屑堵塞程度,如果铁锈碎屑堵塞面积与管内孔面积之比(简称堵塞面积比)达到10%,单通道铁磁检测仪的指示值便趋于饱和。笔者采用5通道检测克服测量值饱和的困难,5个探测器位于同一个圆周上,相邻探测器的中心(霍尔元件)之间的周向距离为30°,如图4所示。一般来说检测点越多、越密集则检测精度越高;但是检测点距离太近,相邻探测器之间容易发生互相干扰。实验结果表明,相距30°检测效果较好。

下面定性地说多通道检测克服测量值饱和的原理。单通道测量值饱和的原因是铁磁探测器的有效探测距离比较小,实验结果表明,笔者制作的探测器探测铁锈碎屑的有效距离是14mm。如图4所示,当铁锈堆积厚度超过堵塞面积比10%,处于高位置的铁锈堆积(图4中用蓝颜色表示的

铁锈堆积)因为距离远,对位于0°的探测器的作用极其微弱,0°探头的输出信号趋于饱和。另一方面,这部分铁锈处在30°和-30°探测器的探测范围之内,这2个探测器有输出信号,全部5个探测器的输出信号之和在增加。0°探测器的作用主要是测量堵塞面积比为0~10%的铁锈堆积(图4中用紫颜色表示的铁锈堆积);30°和-30°探测器的作用主要是测量堵塞面积比为10%~30%的中层铁锈堆积(图4中用蓝颜色表示的铁锈堆积);60°和-60°探测器的作用主要是测量堵塞面积比为30%~50%的高层铁锈堆积(图4中用红颜色表示的铁锈堆积)。总之,以5个探测器输出信号之和为基础的5通道检测,扩大了仪器的测量范围,堵塞面积比从10%提高到50%。

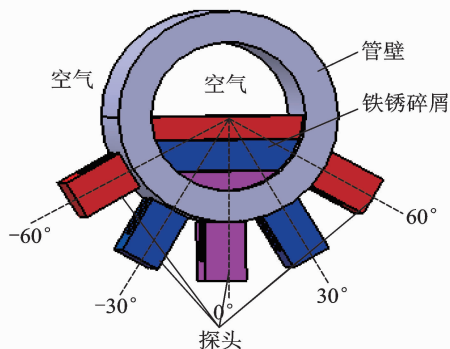


图4 5个探测器围绕被检测管的分布图

Fig. 4 The five detectors around the tested tube

假定在管内有铁锈碎屑的情况下,设在5个测量点上霍尔元件测得的磁通密度分别用 $B_1(a\%)$ ,  $B_2(a\%)$ ,  $\dots$ ,  $B_5(a\%)$ 来表示。其中: $B$ 为磁通密度;下标1,2, $\dots$ ,5为各通道的编号。对应于霍尔元件的位置-60°, -30°, 0°, 30°和60°,  $a\%$ 表示堵塞面积与 $\pi r^2$ 之比, $r$ 为管的内径。笔者将 $a\%$ 称为铁锈堵塞面积比,将 $\Delta B_n(a\%)$ 和 $Q$ 分别称为各通道磁通密度差与5通道磁通密度差之和

$$\Delta B_n(a\%) = B_n(0) - B_n(a\%) \quad (1)$$

$$Q = \sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%) \quad (2)$$

测量 $\Delta B_n(a\%)$ 的电子电路如图5所示,霍尔元件和电阻 $R_1$ 设在探头壳内,霍尔元件为SHJ5型神化镓霍尔元件。由于霍尔元件的灵敏度变化范围较大(4~20 mV/mA100mT),为了达到各通道性能一致,使用的霍尔元件要经过挑选,选择灵敏度在10mV/mA100mT左右的元件,并且对控制电流 $I_c$ 稍加调节,即调节电阻 $R_1$ ,使霍尔元件的控制电流 $I_c$ 在2 mA左右,从而可获得一致的转换系数20 mV/100mT。 $IC_1$ ,  $IC_2$ 和 $IC_3$ 是3个普通运放, $IC_1$ 、数字电位器 $P_1$ 和电阻等连接成放大倍数为1.5的平衡放大器。 $P_1$ 由计算机控制,用触摸屏操

作。 $P_1$  用于平衡霍尔元件的不等位电势和管道内无铁锈碎屑时的霍尔电势,此时的霍尔电势正比于  $B_n(0)$ ,调节  $P_1$  保持管道内无铁锈碎屑时  $IC_1$  的输出电压是零, $P_1$  只是在更换探头时需要调节。用  $IC_2$  和  $IC_3$  组装两级放大器,总放大倍数为 100 倍。由上述电路设计不难看出,放大器的输出电压  $V_n$  正比于  $\Delta B_n(a\%)$

$$V_n = K \Delta B_n(a\%) = 30 \Delta B_n(a\%) \quad (3)$$

这里  $K = 30$  是总放大倍数 150 倍与霍尔元件转换系数 20 mV/100mT 之积。放大器的输出信号输送到计算机的 A/D 转换器的输入端,A/D 转换器的分辨率为 8 bits,采样速度为 500 kHz。

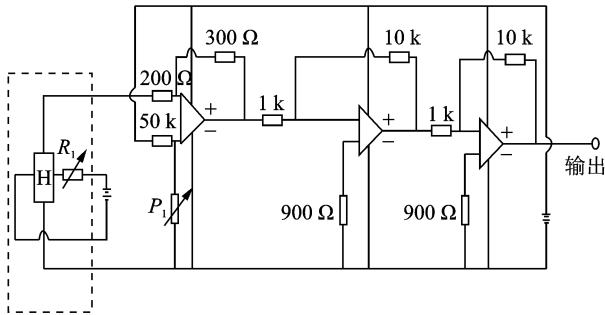


图 5 铁磁探测仪中的放大器电路图

Fig. 5 Electronic circuit diagram of the amplifier in the tester detecting ferromagnetic objects

仪器的软件可分为仪器操作软件和数据处理软件。仪器操作软件有 2 个界面:检测界面;回放和报告界面。回放和报告界面用于将已存储的数据调出和重新显示,同时还包括形成、显示和输出检测报告,用这个界面可以重新设定报警阈值,并按新设阈值重新评定超标与否。回放和报告界面如图 6 所示,其中 B 和 C 显示探头扫查时得到的信号,A 为检测结果统计表格。表格内数据是通过检测得到的堵塞面积百分数:红色方格表示数据超标;绿色表示未超标;黄色表示 B 和 C 所示的信号是得到黄色方格内数据的探头扫查信号。点击 A 中红色或绿色方格可使之变黄,B 和 C 所示信号也随之改变。B 和 C 的横轴都表示时间,B 的纵轴表示 5 个通道信号电压之和,它正比于  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%)$ 。C 用色阶表示 5 个通道各自的信号电压,该电压正比于  $\Delta B_n(a\%)$ 。检测界面的功能包括:①调节数字电位器  $P_1$ ,此项操作只在更换探头时需要;②按被检管道的规格(管的外径和壁厚)调用相应的标定曲线,即  $a\% \sim \sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%)$  关系曲线;③设置报警阈值;④开始和停止检测;⑤存储或删除检测结果。检测界面显示的内容及形式与回放和报告界面相同,不同之处有:①操作按钮多,例如数字电位器按钮、检

测开始按钮、调用标定曲线按钮等;②显示的数据是正在进行的检测采集数据,而不是已往的检测采集和存储数据。数据处理软件的主要功能是按堵塞检测原理处理测得的数据,将处理后的数据与标定曲线相比较得出堵塞面积百分数  $a\%$ 。

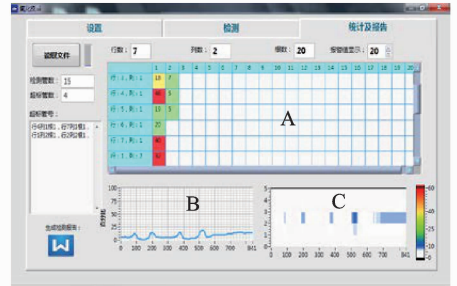


图 6 回放与报告界面

Fig. 6 Interface for replay of the data and for formation and output of reports

由磁化器和霍尔元件组成的探测器,它们的性能不可能完全一致,需用标准试样测试每一个探测器,选择性能相近的 5 个探测器组成 5 通道探头。对于每只 5 通道探头都要给予编号,要用标准试样测量各通道的输出信号,反复调节  $R_1$  和  $P_1$  使各通道的测量值尽量靠近相应的标定曲线。

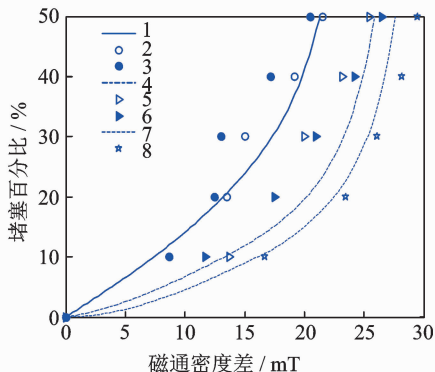
## 2 有限元模拟与标定曲线计算

采用商业有限元软件 Comsol Multiphysics 5.3a,对单通道和 5 通道铁磁探测仪检测管道内铁锈碎屑堵塞进行有限元数值模拟,在此基础上计算标定曲线。假定待检测管的外径和壁厚分别为 54 和 8 mm,待检测管的材料为 TP347 奥氏体不锈钢,这种不锈钢的相对磁导率为 1。有限元模型如图 4 所示,图中显示了管、铁锈碎屑及探测器的位置。永磁铁的材料为钕铁硼,相对磁导率为 1.05,剩余磁通密度为 1.38T。管内铁锈碎屑主要成分为  $Fe_3O_4$ ,用 MPMS 磁学测量系统测得铁锈碎屑的相对磁导率为 10.19。假定铁锈碎屑堵塞面积比分别为 0%,10%,20%,30%,40%和 50%。有限元模拟设定的探测器的几何尺寸如图 2 所示。有限元计算模型的网格划分如下:用自由四面体对管、铁锈碎屑和探头进行网格划分,最大尺寸为 2mm,最小尺寸为 1.44mm,共有 407 830 个单元。计算了单通道检测和 5 通道检测 2 种情况,单通道检测时只有 1 个探测器,位于  $0^\circ$  的位置,其余计算参数与 5 通道的计算参数相同。

上面说明了有限元计算的原始参数,即有限元计算的条件。计算的目的是得到磁通密度的分布,特别是霍尔元件中心处的磁通密度差  $\Delta B_n(a\%)$  及

其随铁锈碎屑堵塞面积比  $a\%$  的变化。

图7是根据有限元计算结果绘制的各通道磁通密度差与铁锈碎屑堵塞面积比的关系曲线,管材规格为  $\varnothing 54\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。由于对称的原因,  $-60^\circ$ 通道和  $60^\circ$ 通道的曲线相同,  $-30^\circ$ 通道和  $30^\circ$ 通道的曲线也相同。图上的点代表用铁磁探测仪和标准样件进行测量得到的  $\Delta B_n(a\%)$  的数值。

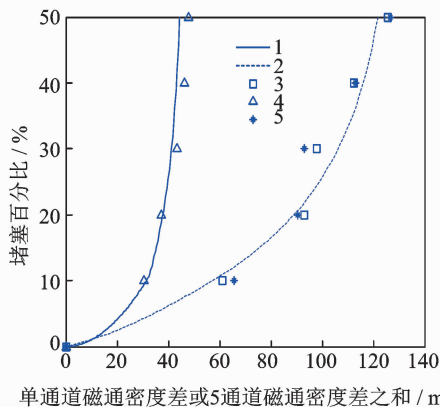


1— $60^\circ$ 和  $60^\circ$ 通道计算值曲线;2— $60^\circ$ 通道测量值;3— $60^\circ$ 通道测量值;4— $30^\circ$ 和  $30^\circ$ 通道计算值曲线;5— $30^\circ$ 通道测量值;6— $30^\circ$ 通道测量值;7— $0^\circ$ 通道计算值曲线;8— $0^\circ$ 通道测量值

图7 各通道磁通密度差与铁锈碎屑堵塞面积比的关系  
Fig.7 The relation of the magnetic flux density difference of each channel with the percentage of area blocked by rust

图8中的2条曲线是根据计算结果绘制的单通道检测和5通道检测的标定曲线,即  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%) - a\%$  和  $\Delta B(a\%) - a\%$  关系曲线,适用于  $\varnothing 54\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的管道的堵塞面积比的评估。计算和测试得到的标定曲线的数据列于表1。

比较图8中适用于单通道和5通道检测的标定曲线可以看出,5通道检测的标定曲线上升缓慢。较小的堵塞面积比  $a\%$  变化,能引起5通道磁通密度差之和  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(0\%)$  的较大变化,因此,可以通过测量  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%)$  间接地测量堵塞面积比。与5通道检测的标定曲线明显不同,单通道检测的标定曲线上升陡峭,堵塞面积比  $a\%$  变化引起的磁通密度差  $\Delta B(a\%)$  的变化很小,即磁通密度差  $\Delta B(a\%)$  对堵塞面积比  $a\%$  不够敏感。因此,通过检测  $\Delta B(a\%)$  定量测量堵塞面积比误差很大,没有实用价值,但是可以通过单通道检测确定有无铁锈碎屑堵塞。根据表1中的第1行和第2行相应的数据,通过计算,得到5通道检测测量值的标准误差(相对误差)是5.2%。



1—直管单通道计算值曲线;2—直管5通道计算值曲线;3—弯管5通道测量值;4—直管单通道测量值;5—直管5通道测量值  
图8 单通道检测和5通道检测堵塞面积百分比的标定曲线  
Fig.8 Calibration curves of single channel and five channel determinations of blocked area percentage  $a\%$

表1 计算与测试得到的标定曲线的数据

Tab.1 The data of calibration curves obtained by calculation and measurement

单通道检测磁通密度差与5通道检测各通道磁通密度差之和/mT	铁锈堵塞面积百分比/%				
	10	20	30	40	50
直管5通道检测标定曲线的计算值 $Q_c$	57.5	89.3	106.5	116.1	122.0
直管5通道检测标定曲线的测量值 $Q_m$	59.5	84.5	95.7	112.0	123.5
弯管5通道检测标定曲线的测量值 $Q_{mb}$	60.8	93.2	98.2	113.0	126.5
直管单通道检测标定曲线的计算值 $q_c$	31.5	37.8	41.3	43.2	44.4
直管单通道检测标定曲线的测量值 $q_m$	30.5	37.3	43.3	46.2	47.9

### 3 计算结果的实验验证

第1项实验是直管堵塞检测实验,目的在于验证有限元计算得到的结果,为此制作了铁锈碎屑堵塞标准样件,标准样件的各个零件及其组装如图9所示。1根标准样件由4个零件组装而成,零件全都用有机玻璃制作。第1个零件是与被检管规格相同的有机玻璃管,即外径为54 mm,壁厚为8 mm,管长为60 mm。第2个零件是横截面为圆形去掉一个弓形、长为60 mm的直棒,棒的截面半径为19 mm,与有机玻璃管内径相配合,有较小的负公差。共有5根直棒,去掉的弓形面积分别是圆面积的10%,20%,30%,40%和50%。第3个和第4个零件尺寸形状完全相同,是  $54\text{ mm} \times$



15 mm(直径×高)的圆片。组装时首先将 1 个圆片用胶液粘接在管的一端,将管的一端封闭。直棒插入管内,将组装件开口向上放置,取自现场的铁锈碎屑填加到组装件内,将直棒与管内壁之间的间隙填满。最后将 1 个圆片用胶液粘接在组装件的开口上,胶液凝结牢固之后,一个标准样件制作完毕。对 5 个标准样件进行铁锈碎屑测量,将测得的电压值  $V_n$  用式(3)换算成磁通密度差  $\Delta B_n$  ( $a\%$ ),由此计算得到  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%)$ 。上述计算得到的数值列于表 1,用这些数据绘制的  $\Delta B_n(a\%) - a\%$  曲线和  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%) - a\%$  曲线分别显示在图 7 和图 8,曲线两侧的不同形状的点代表测量值。从图 7 和图 8 可以看出,有限元计算结果与实验测量结果吻合良好。

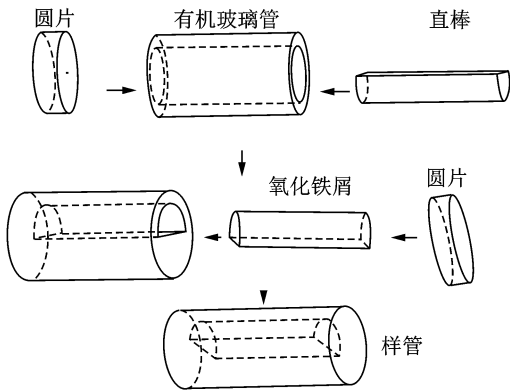


图 9 标准样件图

Fig. 9 Schematic diagram of standard sample

第 2 项实验是检测和评估弯管中的铁锈碎屑堵塞面积比。电厂锅炉系统常见的管道转弯是从垂直方向转向水平方向。如图 10 所示,从 X 光检测拍摄的照片可以看出,铁锈碎屑堆积起始于管的转弯处,在水平管段上延伸较长,表面平坦,随着延伸向下倾斜,但是坡很小,这种形状与管内流体冲刷有关。为了进行实验,笔者制作了具有相似铁锈碎屑堆积的弯管样件。弯管样件用 TP347 奥氏体不锈钢管制作,钢管规格为 54 mm×8 mm(外径×壁厚),直管段长度为 50 mm,弯曲角度为 90°,内弯半径为 63 mm,外弯半径为 117 mm。在管表面上开一个长条形窗口,周向(横向)宽度为 90°。窗口的周向位置、轴向(纵向)位置和长度见图 3。和直管样件一样,将 1 根用有机玻璃制作的异形棒插入管内,棒与管内表面之间的间隙填入铁锈碎屑。样件的铁锈碎屑堵塞面积比为 10%,20%,30%,40%和 50%。异形棒分为 2 段,即头段和尾段。尾段形状和直管样件的异形棒形状相同;头段的形状比较复杂,按几何学原理用计算机计算和绘图,用手工制作

或用数控铣床制作。

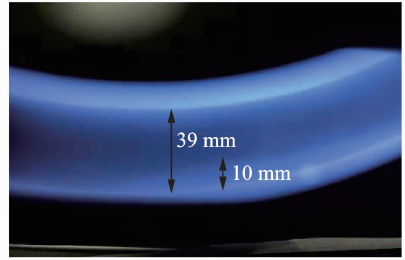


图 10 弯管 1 铁锈堵塞的 X 射线照片

Fig. 10 X ray photograph of the bended pipe 1 blocked by rust fragments

用弯管样件测量得到的  $\sum_{n=1}^5 \Delta B_n(a\%) - a\%$  关系的数据见表 1,这些数据用方块形的点显示于图 8。为了便于比较,图 8 中也绘制了直管的标定曲线。从图 8 可以看到,弯管与直管的标定曲线相差很小,原因在于两种情况下的铁锈碎屑堆积形状十分接近。因此在实际检测中,可以用标准样件(直管)代替弯管试样测定标定曲线。

### 4 现场检测实验与检测服务

用 5 通道铁磁探测仪共检测了 15 根管的转弯部位,以堵塞面积比  $a\% \geq 30\%$  为报废标准,发现堵塞超标弯管 4 处。对其中的 3 根管进行了 X 射线检测,这 3 根管的堵塞检测结果列于表 2。图 10 是 1 号管转弯处的 X 射线照片。根据表 2 中的数据计算,以 X 射线法为基准,5 通道铁磁探测仪测量堵塞面积比的标准误差是 3.9%(绝对误差)。

表 2 用 5 通道铁磁探测仪与 X 射线摄影法测得的堵塞面积比

Tab. 2 The percentages of blocked areas measured by ferromagnetic tester of five channels and by X ray photography

检测部位	测得的堵塞面积比/%		绝对误差/%
	5 通道铁磁探测仪	X 射线法	
弯管 1	18	20.3	-2.3
弯管 2	46	41.4	4.6
弯管 3	19	23.3	-4.3

由于种种原因,X 射线检测电厂管道堵塞的机会较少,这次现场检测只拍摄了 3 张 X 射线照片,数量显然不够,为此用称重法加以补充。堵塞超标的管道必须将铁锈碎屑清除,清除的方法是在弯管的上部大约 1 m 处将管道切开,用软绳将 1 块钕铁硼永久磁铁吊入管内,将铁锈碎屑吸住提上来。这种清除并不彻底,还有少量残余,对于经过 5 通道铁磁探测仪检测和 X 射线检测的 3 条管道,称重结果

列于表3。从表3的数据可以看出,清除前后用5通道铁磁检测仪测得的堵塞面积比之差近似地和清除取出的铁锈碎屑的质量成正比。称重法从另一个角度证明了5通道铁磁检测仪检测的有效性,但是不能用于评定5通道铁磁检测仪的误差大小。

表3 用5通道铁磁检测仪测得的再热器管道堵塞面积比和取出的铁锈碎屑质量

Tab.3 The blocked area percentages of reheater tubes measured by the ferromagnetic tester of five channels and the weight of the removed rust fragments

管号	5通道铁磁检测仪测得的铁锈碎屑堵塞面积比/%			取出的铁锈碎屑质量/g
	堵塞物清除前	堵塞物清除后	清除前后测量值之差	
1	18	7	11	4.7
2	46	5	41	16.6
3	19	5	14	6.5

笔者为5家发电厂的大修进行了过热器和再热器管的堵塞检测,共发现超标堵塞(堵塞面积比 $a\% \geq 30\%$ )30多处。经过解剖验证,无一误报,由此可见,仪器在防止过热器管和再热器管爆裂事故检测方面发挥了重要的作用。

## 5 结论

1) 有限元模拟与标定曲线计算结果为5通道铁磁检测仪的开发与应用奠定了理论基础。用标准样件进行检测实验,对标定曲线进行实验验证,测量值与计算值相比,其标准误差(相对误差)为5.2%。

2) 在5家发电厂进行了现场检测实验和检测服务,共发现超标堵塞30多处,解剖验证无一误报。5通道铁磁检测仪检测出的堵塞面积比与X射线摄影检测结果相比,标准误差(绝对误差)为3.9%。

3) 研发的5通道铁磁检测仪达到了预期的目标,在防止过热器管和再热器管爆管事故方面发挥了重要的作用。

## 参 考 文 献

[1] 李彦林. 锅炉热管失效分析及预防[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 1-2.

[2] 彭啸, 李晓红, 刘云, 等. 高温受热面弯管氧化皮堆积的声振法检测研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 104-107.

PENG Xiao, LI Xiaohong, LIU Yun, et al. Detection of oxide scale accumulation on curved surface of high temperature heated surface by acoustic vibration method [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(8): 104-107. (in Chinese)

[3] YEO W H, FRY A T, RAMESH S, et al. Simulating the implications of oxide scale formations in austenitic steels of ultra-supercritical fossil power plants[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 42: 390-401.

[4] STOPPATO A, MIRANDOL A, MENEGHETTI G, et al. On the operation strategy of steam power plants working at variable load: technical and economic issues [J]. Energy, 2012, 37(1): 228-236.

[5] SABAU A S, WRIGHT I G, SHINGLEDECKER J P. Oxide scale exfoliation and regrowth in TP347H superheater tubes [J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(10): 896-908.

[6] 贾建民, 陈吉刚, 唐丽英, 等. 12X18H12T 钢管蒸汽侧氧化皮及其剥落物的微观结构与形貌特征[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 43-48.

JIA Jianmin, CHEN Jigang, TANG Liying, et al. Investigation on microstructure and morphology features of steam-side oxidation scale and exfoliated oxide from the internal surface of 12X18H12T tube [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 43-48. (in Chinese)

[7] 刘定平. 超(超)临界电站锅炉氧化皮生成剥落机理及其防爆关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[8] 牟彦春, 徐文胜, 李剑峰. 超低频磁性检测技术在电站锅炉奥氏体不锈钢管内壁检测中的应用[J]. 无损检测, 2015, 37(7): 57-60.

MOU Yanchun, XU Wensheng, LI Jianfeng. Application of ultra-low frequency magnetic detection technology in testing the inner wall of austenitic stainless steel tube in power plant boiler [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(7): 57-60. (in Chinese)

[9] 刘金秋. 奥氏体锅炉管内壁氧化皮脱落堆积测量技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.

[10] OHTOMO A. Magnetic measurement of internal scale in austenitic stainless steel tubes [R]. Thokyo: Lshikawajima-Harima Heavy Industries Company Ltd., 2000.

[11] 龙会国. 锅炉用奥氏体不锈钢弯管内部氧化皮检测的新方法厂 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 555-558.

LONG Huiguo. A new method for the detection of oxide scales inside the austenitic stainless steel bend tubes for boilers [J]. Journal of Power Engineering, 2010, 30(7): 555-558. (in Chinese)

[12] 强文江. 奥氏体不锈钢管内氧化皮磁性无损检测方法 [C]//2009 中国仪器仪表与测控技术大会论文集. 哈尔滨: 中国仪器仪表学会, 2009: 154-158.



第一作者简介: 王玺润, 男, 1993年1月生, 硕士。主要研究方向为材料无损检测及评价。

E-mail: xrwang16s@imr.ac.cn

