

磁力扰动法测量铁磁性锅炉管氧化皮堵塞*

郑 凯^{1,2}, 张双楠¹, 张 博¹, 李建奎¹, 张晓丹¹, 李经明¹, 蔡桂喜¹

(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 沈阳, 110016)

摘要 为解决铁磁性锅炉管氧化皮堵塞检测难题, 提出一种磁力扰动法的无损检测方法。首先, 采用数值模拟方法对正交放置的两电磁铁作用下的铁磁性锅炉管进行磁场分布特征分析, 并通过实验验证仿真结果的正确性; 其次, 使用声发射技术对磁场作用下氧化皮碰撞管壁发出的声音进行采集, 建立波形特征参数与氧化皮堵塞面积比的定量关系。结果表明: 铁磁性锅炉管磁导率的非线性特点使得两电磁铁在管道内形成一种能穿透管壁直接吸引氧化皮的独特磁场, 其吸引能力下限低至 10% 堵塞面积比; 以幅值绝对值为权重的声信号加权平均时间可以作为判定被检管道堵塞面积比是否超标的依据。该方法具有一定的工程应用前景。

关键词 磁力扰动法; 铁磁性锅炉管; 氧化皮; 声发射; 无损检测

中图分类号 TH878; TG115

引 言

过热器管和再热器管是电站锅炉的主要承压和受热部件, 其工作温度和压力随着超临界和超超临界发电机组的投入使用而大幅度提高(最高可达 760 °C 和 37.5 MPa^[1])。目前, 过热器管和再热器管主要采用奥氏体耐热钢(顺磁性)和马氏体耐热钢(铁磁性)^[2], 氧化速度较快。生成的氧化皮会从管壁脱落, 经管内蒸汽流冲刷后堆积在垂直管道的下弯头处产生堵塞^[3-5]。据统计, 由氧化皮堵塞引起的过热器和再热器爆管占我国发电锅炉爆管事故的 85%, 由此产生的停炉抢修费用高达 3 500 万元^[6]。国内外专家学者针对上述问题进行了相关研究。涡流检测方面, 文献[7-8]分别利用超低频涡流和脉冲涡流对不锈钢锅炉管氧化皮堵塞进行检测, 取得了较好的结果, 但受趋肤效应影响, 涡流难以穿透高磁导率的铁磁性锅炉管壁。Ohtomo 等^[9]提出了磁性检测法。王玺润等^[10]制造的 5 通道铁磁探测仪以及吉雷等^[11]制造的弱磁检测仪等使用了磁性检测原理, 然而由于铁磁性锅炉管磁导率远大于氧化皮本身, 磁性检测法原理不再适用。Armitt 等^[12]利用氧化皮厚度、时间及温度与氧化皮中存储的应变能之间的关系可以估计氧化皮脱落的可能性大小。超声检测方面, Kapayeva 等^[13]提出了一种电磁超声与普通超声相结合的方法, 能对固着在 20 钢锅炉管内壁的氧化层厚度进行测定。以上 2 种方法均只能反映

管壁内未脱落的氧化层厚度, 无法检测氧化皮在管内的具体堆积状态。射线检测法虽能穿透铁磁性管壁获得管内氧化皮堆积信息, 但因其有放射性、空间需求大等原因无法用于现场检验。

基于以上方法无法解决铁磁性锅炉管氧化皮堵塞检测的问题, 笔者提出一种磁力扰动的无损检测方法, 通过磁场仿真与实验阐明该方法的工作原理, 并通过声发射实验分析声信号与氧化皮堵塞程度的定量关系。

1 磁力扰动法基本原理

磁力扰动法原理如图 1 所示, 首先, 用磁化磁铁(沿管道轴向放置的电磁铁)将一小段被检测的锅炉管饱和磁化; 其次, 加入扰动磁铁(沿管道径向放置的电磁铁), 利用两磁铁形成的复合磁场将堆积在管底部的氧化皮碎屑吸引到管顶部, 碰撞管壁

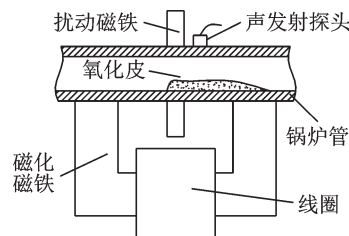


图 1 磁力扰动法原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of magnetic disturbance method

* 国家自然科学基金资助项目(31702393, 32073028, 51605468); 辽宁省自然科学基金资助项目(2019-MS-334)

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-04-06

并发出声音;最后,将高增益的声发射探头放置在碰撞部位附近,记录声音波形,分析储存的声音信号以实现铁磁性锅炉管氧化皮堵塞问题的定量评估。

2 磁力扰动法磁场仿真

利用 comsol 5.4 软件构建 3 维模型,仿真模型如图 2 所示,其中:磁化线圈为 1.5 A, 3 000 匝;扰动线圈为 1 A, 3 000 匝(本研究坐标系均与图 2 相同,即管轴向为 x 轴,径向为 y 轴,位于扰动磁铁中心正下方的管内空气域中心为原点)。

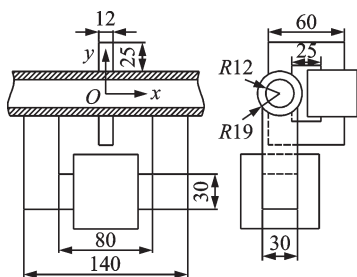


图2 仿真模型(单位:mm)

Fig.2 The model of numerical simulation (unit:mm)

由于是稳态分析,只需施加安培定律与铁磁性材料本构关系,即

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3)$$

$$J = \sigma E + J_e \quad (4)$$

其中: H 为磁场强度; J 为电流密度; B 为磁感应强度; A 为磁矢势; μ_0 为空气磁导率; M 为磁化强度; σ 为电导率; E 为电场强度; J_e 为外部电流密度;“ \times ”为矢量叉乘运算; ∇ 为哈密顿算子。

锅炉管与磁芯的磁化强度 M 由图 3 所示的 $B-H$ 曲线决定,模型其余部分 M 均为 0。由于没有外加电场, $E = 0$, 外部电流密度 J_e 由线圈产生,即

$$J_e = NI_{\text{coil}}/S \quad (5)$$

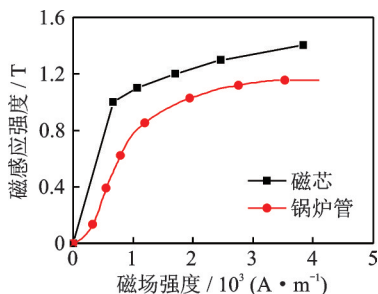


图3 锅炉管与磁芯的 $B-H$ 曲线

Fig.3 $B-H$ curve of boiler tubes and magnetic cores

其中: N 为线圈匝数; I_{coil} 为线圈电流; S 为线圈总截面积。

将式(2)~(5)代入式(1),得

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times A - M \right) = \frac{NI_{\text{coil}}}{S} \quad (6)$$

为保证磁矢势解的唯一性,引入库伦规范

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (7)$$

其中:“ \cdot ”表示矢量点乘运算。

模型整体使用自由四面体网格,管壁及管内空气域网格最小单元设置为 0.12 mm,最大单元设置为 4 mm,其余部分分别设置为 2.4 和 25 mm。

磁力扰动法磁感应线分布如图 4 所示。由图可知,磁力扰动法的磁感应线分布情况与空气中的扰动磁铁磁场有显著差别,放大图中扰动磁铁上磁极位置接收的磁感应线并不是由扰动磁铁下磁极位置发出,而是流经磁化磁铁磁极。

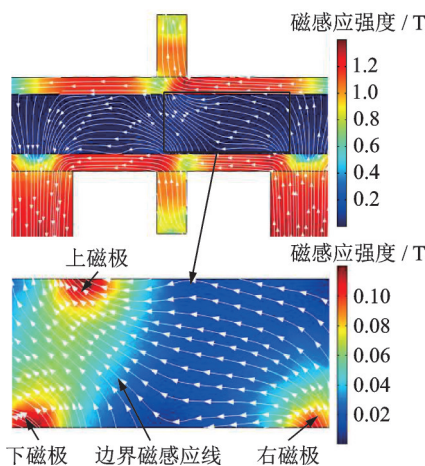


图4 磁力扰动法磁感应线分布图

Fig.4 Distribution of magnetic induction lines of magnetic disturbance method

加入扰动磁铁前后磁感应线分布如图 5 所示。当铁磁性锅炉管只加磁化磁铁时,由于管壁被饱和和磁化,管壁内形成均一的平行磁场,如图 5(a)所示;当加入扰动磁铁后,由于磁感应线本身不能交叉,所以扰动磁铁磁感应线只能经由磁化磁铁形成闭合回路,如图 5(b)所示。由于铁磁性锅炉管管壁内的磁通量具有饱和值,管壁内部分原本属于磁化磁铁磁感应线的通道被扰动磁铁的磁感应线占据,被排挤出来的磁化磁铁磁感应线只能经由磁阻相对较小的管内空气形成闭合回路,从而形成图 4 所示的倾斜磁场。管内空气中磁感应线并不是扰动磁铁本身的磁感应线,而是磁化磁铁在受到排挤后改变磁路形成的磁感应线。

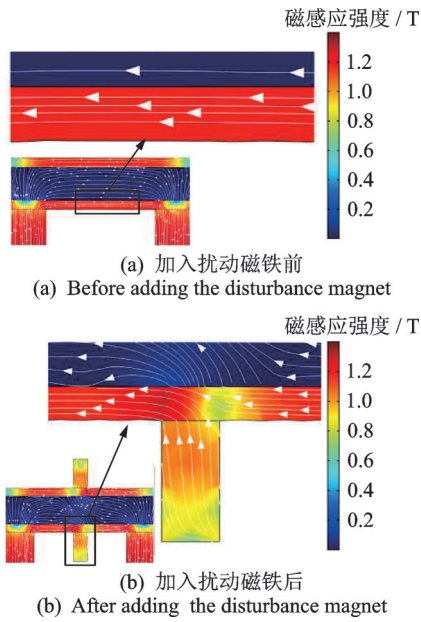


图5 加入扰动磁铁前后磁感应线分布图

Fig.5 Distribution of magnetic induction lines before and after adding the disturbance magnet

3 磁力扰动法吸引区域仿真与实验

由于磁场位于铁磁性管内,难以直接测量和观察,所以设计并开展了磁力扰动法吸引区域的仿真与实验工作,从而验证磁场仿真结果,并对该方法吸引氧化皮的能力进行评判。

3.1 吸引区域界定仿真

吸引区域仿真原理如图6所示,左图中2个磁极磁感应线不连通,这时2个磁极各自的吸引区域利用边界处的磁感应线很容易区分;当右图中2个磁极连通时,利用磁场内氧化皮所受合力的水平分量的方向可以加以区分。

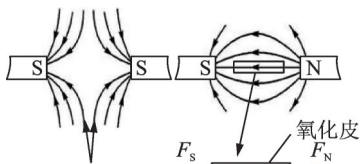


图6 吸引区域仿真原理图

Fig.6 The principle of attraction area simulation

利用上述原理可以界定扰动磁铁上磁极的吸引区域,由图4可以看出:管内空气磁场包含3个磁极,上磁极与下磁极之间互不连通,选取图4标出的边界磁感应线以区分上下磁极的吸引区域;上磁极与右磁极连通,利用置入磁场中的氧化皮所受力的轴向分量的方向可以确定两者吸引区域的边界。

根据电力行业标准 DL/T 1324—2014,一般用氧化皮堵塞面积比 φ 来衡量氧化皮堵塞程度

$$\varphi = \frac{S}{S_0} \times 100\% \quad (8)$$

其中: S 为堵塞最大截面积; S_0 为管道通流面积。

当 φ 介于 20%~50% 之间时需要管进行监视,所以仅对 50% 以下的情况进行受力分析即可满足需求。氧化皮主要由 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 组成,含量比约为 7:3。根据文献[14]的统计结果,将氧化皮建模为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ 的薄片,相对磁导率为 4.7,并将其置于图7所示的不同 φ 下氧化皮受力分析位置交点处进行力的计算,即

$$nT = -\frac{1}{2}n(H \cdot B) + (n \cdot H)B^T \quad (9)$$

$$F = \oint_{\partial\Omega} nT dS \quad (10)$$

其中: T 为麦克斯韦应力张量; n 为氧化皮任意表面法线的单位向量; F 为氧化皮所受磁场力; $\partial\Omega$ 为氧化皮任意表面域;“ \cdot ”表示矢量点乘运算。

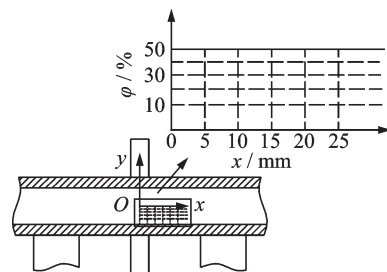


图7 不同 φ 下氧化皮受力分析位置

Fig.7 The force analysis position of oxide scales under different φ

轴向力 F_x 与轴向坐标 x 的关系如图8所示,记录与 0 线的交点坐标值,与图4边界磁感应线共同组成 50% 氧化皮堵塞面积比以下的上磁极吸引区域。

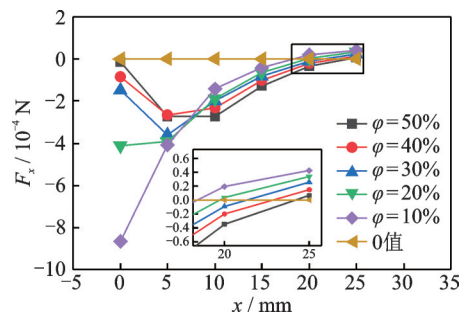


图8 轴向力 F_x 与轴向坐标 x 的关系

Fig.8 The relationship between the force F_x and the axial coordinate x

3.2 吸引区域测定实验

实验参数与仿真所用参数一致,锅炉管材料为 T91 且为全新的无氧化皮管,磁铁两线圈外接直流稳压电源。利用 3D 打印技术制作长为 40 mm、高度

对应 $\varphi=50\%, 40\%, 30\%, 20\%$ 和 10% 的树脂盒容器各1个,以方便装入对应含量的氧化皮,本实验所用氧化皮是在电厂停炉清理时直接从管内取出的。将装满氧化皮的盒子推到不同的位置,吸引区域测定实验原理如图9所示。如果树脂盒被置于吸引区域内两阴影相交区域就会有氧化皮被吸引至管壁顶部,否则没有氧化皮被吸引。对 $\varphi=50\%, 40\%, 30\%, 20\%$ 和 10% 的氧化皮均进行测量,记录能发生吸引的临界 x 坐标值,绘出区域范围,并与仿真结果进行对比。

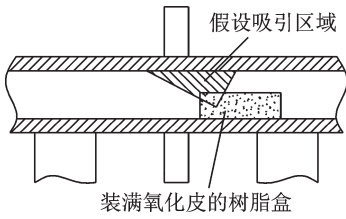


图9 吸引区域测定实验原理图

Fig.9 Schematic diagram of the experiment for determining the attraction area

仿真与实验获得的吸引区域结果对比如图10所示,可以看出,实际吸引区域与界定的理论区域基本重合。仿真与实验结果均表明,磁力扰动法在 $\varphi=10\%$ 时仍能对氧化皮产生吸引。该方法吸引区域不是位于扰动磁铁的正下方,而是位于一侧,这表明即使扰动磁铁夹持在直管段,仍能对一定长度内的弯管段氧化皮堵塞情况进行检测。

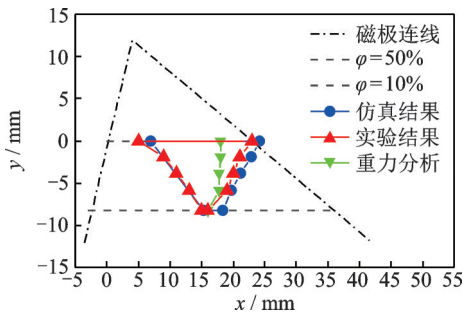


图10 仿真与实验获得的吸引区域结果对比图

Fig.10 The results of the attraction area obtained by numerical simulation and the experiment

图10中绿色倒三角线是考虑上磁极对氧化皮产生的径向磁场力(y 分量)需大于氧化皮自身重力得到的结果,可以看出获得的边界线与实验结果存在较大的偏差。这是因为仿真模型是静态分析模型,未考虑氧化皮受到吸引力后的排布和运动情况,而实际实验过程中氧化皮受磁场力作用会相互粘连而提升高度。发生吸引前后实验实拍图如图11所示,受高度提升的影响,实际吸引区域的右边界大于重力分析出的右边界,而更贴近于用轴向力(x 分量)分析出的结果。

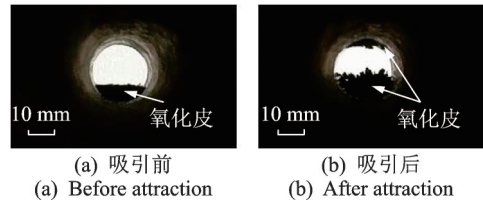


图11 发生吸引前后实验实拍图

Fig.11 Experimental photos before and after attraction

4 声发射实验

声发射实验设备如图12所示。为了便于触发和记录声信号,改磁化磁铁电源为阶跃式,示波器设置上升沿触发,前置放大器增益为40 dB,氧化皮利用树脂盒放入管内,使其完全覆盖吸引区域。将示波器采集到的 $\varphi=50\%, 40\%, 30\%, 20\%$ 和 10% 的声信号数据导出,提取合适的特征参数建立声信号与 φ 的定量关系。

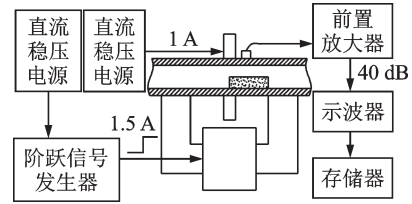


图12 声发射实验设备图

Fig.12 Experimental equipment of acoustic emission

观察声发射采集的信号发现,声信号主要存在于 $0.03\sim 0.1$ s 之间,提取该段时间内信号,得到图13所示的声发射信号波形。对比发现,不同 φ 下声信号所在的主要时间区域明显不同,这说明氧化皮的运动时间与 φ 之间存在定量关系。

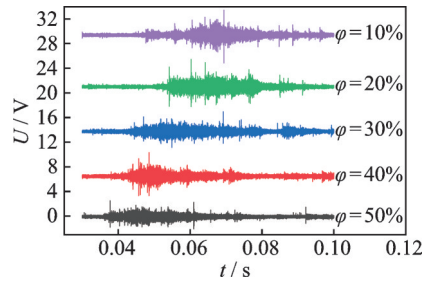


图13 声发射信号

Fig.13 Acoustic emission signals

由于氧化皮是集体运动,为了避免单一时间参数的偶然性影响,所以采用以幅值的绝对值为权重的加权平均时间 \bar{t} 作为氧化皮的运动时间,即

$$\bar{t} = \frac{\sum |U_i| t_i}{\sum |U_i|} \quad (11)$$

其中: t_i 为 $0.03\sim 0.1$ s 内第 i 个采样点的时间; $|U_i|$ 为第 i 个采样点幅值的绝对值。

为排除噪声信号对计算结果的影响,计算前先设置 0.5 V 阈值门槛以滤除噪声。在每个 φ 下做10次实验后,绘制出 \bar{t} 与 φ 的关系图。声发射信号加权平均时间的平方与氧化皮堵塞面积比 φ 的关系如

图14所示,去掉每组数据的最大与最小值,通过线性拟合得到最优拟合曲线方程为

$$\bar{t} = -0.05723\varphi + 0.07748 \quad (12)$$

其皮尔逊相关系数 $r = -0.98406$, 呈显著的线性负相关关系。由图14可知,相同氧化皮堵塞面积比下,计算得出的时间集中在某固定范围内。虽然10%与20%对应时间区域有交叠部分,无法彻底区分,但仍可以很好地区分20%以上的堵塞,证明该方法能够检测铁磁性锅炉管内氧化皮堵塞是否超标,可以辅助判断氧化皮是否需要清理。

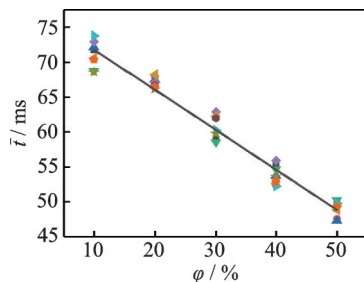


图14 声发射信号加权平均时间的平方与氧化皮堵塞面积比 φ 的关系

Fig.14 The relationship between the square of the weighted average time of acoustic emission signals and the ratio φ of oxide scales blockage area

5 结论

1) 磁力扰动法在铁磁性锅炉管内空气中形成由磁化磁铁磁极位置流向扰动磁铁上磁极位置的倾斜磁场,磁力扰动法正是利用倾斜磁场对氧化皮的吸引作用来实现氧化皮堵塞状态的评估。

2) 吸引区域仿真与实验结果对比表明,设定的静态仿真模型可用于绘出实际的氧化皮吸引区域。在本研究给定参数下,磁力扰动法能吸引的氧化皮堵塞面积比低至10%,吸引区域偏离扰动磁铁正下方的特点证明该方法能够对弯管处实施检测。

3) 对声发射信号的研究表明,以幅值的绝对值为权重的加权平均时间可以作为铁磁性管道内氧化皮是否超标、是否需要清理的判定依据。

参 考 文 献

[1] 杨珍,鲁金涛,张夏妮,等.水蒸气温度对700℃先进超超临界锅炉候选合金GH2984氧化行为的影响[J].材料工程,2018,46(1):74-82.
YANG Zhen, LU Jintao, ZHANG Xiani, et al. Effect of steam temperature on oxidation behavior of GH2984 alloy as a candidate for 700℃ advanced ultra-supercritical boilers [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(1):74-82. (in Chinese)

[2] 蔡文和,严苏星.电站重要金属部件的失效及其监督[M].北京:中国电力出版社,2009:116-123.

[3] 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.

[4] HAMZAH M Z, YEO W H, FRY A T, et al. Estimation of oxide scale growth and temperature increase of high(9-12%) chromium martensitic steels of superheater tubes [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35:380-386.

[5] RAKOWSKI J M. The oxidation of metal alloy foils in the presence of water vapor [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4):867-873.

[6] 李彦林. 锅炉热管失效分析及预防[M]. 北京:中国电力出版社,2006:9.

[7] 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.

[8] XU Z Y, ZHU J Z. Measurement of accumulated height of exfoliated oxide scales in austenitic boiler tubes using pulsed eddy current testing [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, 56(4):350-360.

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

[10] 王玺润,张双楠,蔡桂喜,等.5通道铁磁探测仪的研发与锅炉管堵塞检测[J].振动、测试与诊断,2020,40(3):591-596.
WANG Xirun, ZHANG Shuangnan, CAI Guixi, et al. Development of five channels tester detecting ferromagnetic objects and blockage detection on boiler tubes [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3):591-596. (in Chinese)

[11] 吉雷. 不锈钢锅炉管氧化皮堵塞检测系统研制[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.

[12] ARMITT J, HOLMES R, MANNING M I, et al. Spalling of steam-grown oxide from superheater and reheater tube steels [R]. Leatherhead: Central Electricity Research Laboratories, 1978.

[13] KAPAVEVA S D, BERGANDER M J, VAKHGUEL T A, et al. Remaining life assessment for boiler tubes affected by combined effect of wall thinning and overheating [J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8):5892-5907.

[14] 朱竞哲. 奥氏体锅炉管内氧化皮堆积厚度脉冲涡流检测技术研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2019.



第一作者简介:郑凯,男,1996年11月生,硕士。主要研究方向为材料无损检测及评价。

E-mail: sa169138@mail.ustc.edu.cn

通信作者简介:张双楠,男,1983年5月生,高级工程师。主要研究方向为无损检测与评价。

E-mail: snzhang@imr.ac.cn