

基于金属磁记忆的热采湿蒸汽发生器炉管缺陷早期检测

Early Fault Inspection of Wet Steam Generator Tubes Based on Metal Magnetic Memory

颜廷俊¹, 张杰东¹, 冯国栋², 陈建飞²

(1 北京化工大学, 北京 100029;

2 中国石化 胜利油田技术检测中心, 山东 东营 257062)

YAN Ting-jun¹, ZHANG Jie-dong¹, FENG Guo-dong², CHEN Jian-fei²

(1 Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2 Shengli Oilfield Testing Center of Sinopec,

Dongying 257062, Shandong, China)

摘要: 对湿蒸汽发生器 20G 炉管进行了拉伸静载荷实验、疲劳实验及磁记忆信号采集, 通过对采集到的磁记忆信号进行分析, 得到了 20G 炉管在不同加载阶段和不同疲劳周期的磁记忆信号变化规律以及金属磁记忆技术定量评估早期缺陷的方法, 并应用于油田现场炉管检测。结果表明: 金属磁记忆法可以准确表征被测工件的应力集中区; 当 20G 炉管磁场梯度值 K 大于 $12\text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 时, 该区域存在严重损伤。

关键词: 金属磁记忆; 湿蒸汽发生器; 应力集中

中图分类号: TE9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2011)09-0068-04

Abstract: Tensile test and fatigue test on wet steam generator 20G tubes were carried out and the metal magnetic memory (MMM) signals were detected. Though the analysis of MMM signals from different loading stages and different fatigue cycles, the variation characteristic of the MMM signals was obtained and a novel quantitative evaluation method of the early failure by MMM technology was proposed and applied in oilfield on-site test finally. The test results show that MMM method can effectively locate the stress concentration zone (SCZ). The magnetic gradient indicates the damage severity of the investigated zone of the tube. If the magnetic gradient is above $12\text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$, the zone interested is damaged seriously.

Key words: metal magnetic memory; wet steam generator; stress concentration

湿蒸汽发生器是目前世界各国油田用于注蒸汽热力采油的主要设备, 在我国使用较多的是辽河、胜利等油田。其作用是将高压泵注入的水加热后, 变成高温、高压饱和蒸汽, 并通过专用管道送入地下油藏, 从而达到降低油藏稠油黏度、顺利采油的目的。湿蒸汽发生器中的炉管是进行热交换的重要部件之一, 它包括对流段的炉管和辐射段的炉管, 它们均为单路直管, 呈水平往复排列^[1]。辐射段的炉管由于受高温 (温度达 350°C)、高压 (压力达 18MPa) 且存在由于往复泵输液造成的压力波动作用, 极易发生应力集中现象, 造成炉管爆管失效, 最终导致安全事故并影响生产。据统计每年因湿蒸汽发生器炉管爆管等失效造成的经济损失

达上千万元^[2-4]。

目前对湿蒸汽发生器炉管失效采用的检测手段有超声波探伤、超声测厚探伤、磁粉检测等常规方法^[5]。这些检测方法都是在炉管存在已知缺陷时方能检测出来, 对于正在发展着的缺陷以及早期应力集中的诊断缺乏有效的检测手段。

应力集中磁检测仪为无损检测早期诊断提供了一种崭新的探伤手段, 它是基于铁磁材料的磁机械效应和磁弹性效应原理, 检测应力集中区或早期缺陷处形成的漏磁信号。这种方法具有不需对检测工件预处理、操作简便、速度快等优点^[6], 可对湿蒸汽发生器炉管进行缺陷的早期预测, 达到预防事故、安全生产

的目的。

1 金属磁记忆技术

金属磁记忆技术是俄罗斯学者杜波夫在 1997 年提出的,其原理是铁磁工件在工作载荷和地球磁场的共同作用下,在应力集中区域内会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向,其表现为工件表面漏磁场 H_p 水平分量 $H_p(x)$ 出现最大值,而垂直分量 $H_p(y)$ 出现过零点^[7]。因此,通过测定炉管 $H_p(y)$ 量的变化强度就可以准确推断工件的应力集中程度及区域,从而进行炉管缺陷的早期预测。

湿蒸汽发生器炉管爆管等失效形式大多数是由于泵压的波动造成炉管薄弱处的应力集中,最终导致疲劳失效。磁记忆检测技术定量评估炉管的应力集中水平需要首先确定应力集中区漏磁场 $H_p(y)$ 的梯度值 K (单位长度的漏磁场变化量,即 $K = \Delta H_p(y) / \Delta L$),磁场梯度值正比于位错聚集密度以及相应的内应力^[8-10]。本工作通过拉伸实验和疲劳实验获得炉管 20G 材料应力集中区的上述磁记忆特征信号,找出代表破损前强化阶段金属变形能力的漏磁场梯度值 K ,对湿蒸汽发生器的炉管早期检测提供参考。

2 拉伸实验

2.1 实验材料与实验装置

实验选用与湿蒸汽发生器炉管相同的 20G 管材和热处理方式。试件数量为 4 根,其屈服强度为 320MPa,强度极限为 470MPa,管材长度为 400mm,外径为 $\phi 16$ mm,厚度为 3mm。实验采用高频实验机加载;俄罗斯 TSC-1M-4 型四通道磁应力集中仪检测磁记忆特征参数。

2.2 实验步骤及工况

实验步骤采用试样加载后卸载、离线,按统一的水平方向放置在检测平台上,检测探头沿着试件从一端到另一端匀速检测,并记录特征参数,检测有效长度 200mm。实验载荷分别为 3,7,11,15,19,23,25kN。

2.3 拉伸实验磁记忆信号特性分析

实验发现,在上述不同载荷作用下,4 根试件的磁记忆信号变化规律基本一致。下面列出了试件 1 在不同载荷作用下的磁记忆特征信号变化规律,如图 1 所示。

从图 1 可看出,曲线基本呈线性,随着载荷的增大,曲线的斜率增大,曲线过零点的位置在 70mm 左右,说明应力集中发生在检测开始端 70mm 处。当载荷增大到 23kN(屈服点)时,曲线过零点开始左移,位

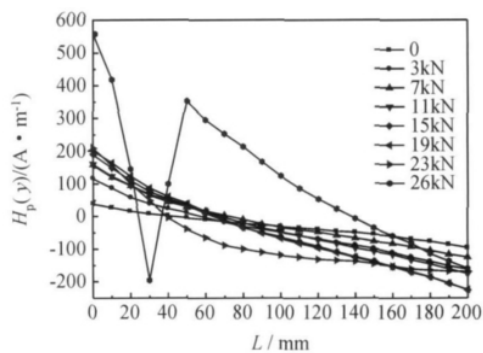


图 1 试件 1 在不同载荷作用下的磁记忆特征信号对比

Fig. 1 The variation of MMM signals with different loads for sample No 1

置大约在 40mm 处,直到载荷在 26kN(强度极限),试件断裂,形成了正负磁极。结果表明屈服阶段以后应力集中处才与最后的断裂位置吻合。

图 2 为 4 根 20G 试件应力集中处漏磁场梯度值随载荷变化的变化规律。从图 2 可以看出,在载荷为 3~19kN 的弹性阶段,随着载荷的增大,磁场梯度值基本无变化,磁场梯度值 K 大约为 $2 \text{ A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 左右;当载荷达到 23kN 时,漏磁场梯度值 K_s 为 $4.7 \text{ A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$,达到 26kN 时,梯度值 K_b 达到最大值为 $10 \text{ A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$,强度极限梯度值 K_b 与屈服极限梯度值 K_s 的比值 $m \approx 2$ 。

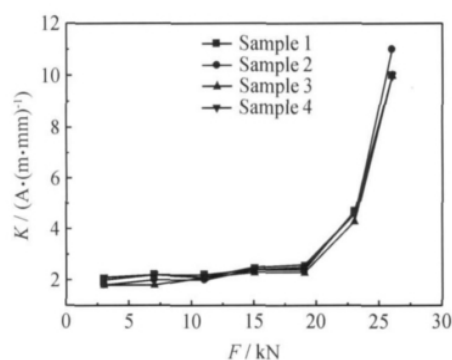


图 2 20G 试件应力集中处漏磁场梯度值随载荷变化的变化规律

Fig. 2 The variation of magnetic gradient K of SCZ with different loads

3 疲劳实验

3.1 实验材料与实验工况

实验材料、步骤、检测方式与拉伸实验一致,只是拉伸改为疲劳实验。为缩短实验周期,加速试件破坏,

在试件中心处加工一个带应力集中的缺口,加工处理完毕后经过应力集中检测仪检测后初始信号良好。疲劳实验采用应力控制(最大疲劳应力分别为 22, 20, 18kN)、正弦波形、应力比为 0, 加载频率 f 为 10Hz。每经过 1000 次疲劳循环后采用 TSC-1M-4 应力集中磁检测仪扫描试件,提取磁记忆信号。

3.2 疲劳实验磁记忆检测特性分析

图 3 为最大疲劳应力分别为 22, 20, 18kN 带缺口炉管磁记忆信号图,图 4 为无缺口完整炉管在最大疲

劳应力为 20kN 的磁记忆信号图。可以看出,随着疲劳次数的增加,应力集中处磁场梯度值 K 缓慢增加。当试件濒临破坏时,应力集中处磁场梯度值 K 出现了激增,再经过 3000 次左右的疲劳循环,试件断裂,在断裂处形成了正负磁极。通过对图 3(b)和图 4 的对比发现,完整炉管和有缺口的炉管疲劳实验磁记忆信号基本一致,这表明工件缺口不会影响疲劳实验 K 值的变化规律。从图 3 可以看出,疲劳应力越小,到达疲劳破坏的次数越多,应力集中处 K 值越大。

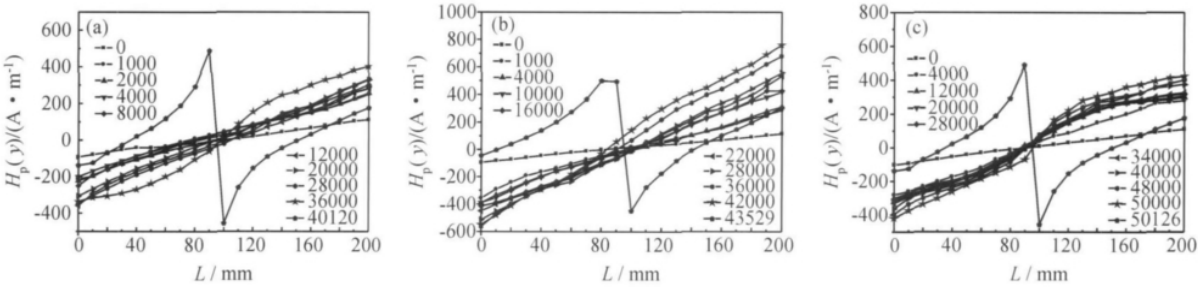


图 3 最大疲劳应力为 22kN(a), 20kN(b), 18kN(c) 试件磁记忆信号对比
Fig. 3 The variation of MMM signals under maximum fatigue stress 22kN (a), 20kN (b), 18kN(c)

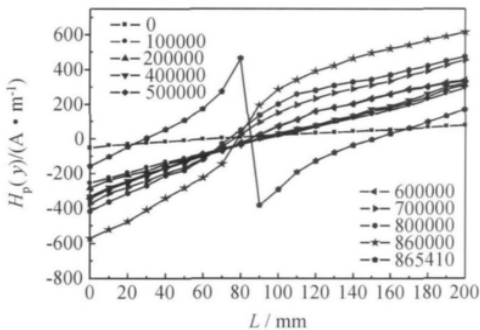


图 4 最大疲劳应力 20kN 时完整炉管磁记忆信号变化规律
Fig. 4 The variation of MMM signals of integral sample under maximum fatigue stress 20kN

通过上述疲劳实验得出,试件应力集中处濒临破坏磁场梯度值 K_s 和破坏时磁场梯度值 K_b 如表 1 所示。破坏时磁场梯度值与濒临破坏磁场梯度值的平均比值 $m=K_b/K_s=24.0/12.0\approx 2.0$ 。由于 4 次疲劳实

验濒临破坏与破坏时之间的疲劳循环次数不同,因此选取的濒临破坏的 K_s 存在一定的误差,为了消除该影响,取 K_s 的平均值为 $12A\cdot(m\cdot mm)^{-1}$ 。

通过实验总结,得出拉伸实验和疲劳实验漏磁场梯度值 K 规律对照表,如表 2 所示。由于疲劳实验磁弹性累积效应更好,所以 K 值比拉伸实验大,但 m 值却大致相等,都为 2.0。锅炉管件工作在周期性的载荷下,疲劳实验的结果更能与现场工况贴近^[11],因此选取 20G 炉管濒临破坏临界点的 K 值为 $12A\cdot m^{-1}\cdot mm^{-1}$ 。

表 2 拉伸实验和疲劳实验漏磁场梯度值 K 规律对照

Table 2 The value of K of tensile testing and fatigue testing

	$K_s/(A\cdot(m\cdot mm)^{-1})$	$K_b/(A\cdot(m\cdot mm)^{-1})$	m
Tensile testing	4.7	10.0	2.1
Fatigue testing	12.0	24.0	2.0

表 1 试件应力集中处濒临破坏和破坏时磁场梯度值

Table 1 Magnetic gradient K of SCZ in the process of fatigue test

Fatigue testing	$K_s/(A\cdot(m\cdot mm)^{-1})$	$K_b/(A\cdot(m\cdot mm)^{-1})$	$m=K_b/K_s$
Fatigue 1(22kN)	7.5	15.5	2.1
Fatigue 2(20kN)	8.5	23.5	2.7
Fatigue 3(18kN)	14.5	34.0	2.3
Fatigue 4(20kN)	17.5	22.5	1.3
Average value	12.0	24.0	2.0

4 现场实验

利用上述实验取得的可早期诊断湿蒸汽发生器炉管 20G 失效判断依据的磁记忆信号梯度值 K ,对某油田现场的湿蒸汽发生器炉管进行了测试。图 5 是某油田湿蒸汽发生器某段炉管的磁记忆信号图,由图 5 可知,该段炉管存在 3 处梯度值大于或等于 $12A\cdot(m\cdot$

$\text{mm})^{-1}$ 的位置, 分别在 100, 600, 2000mm 处, 其梯度值分别为 12, 12, 15 $\text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$, 超过选取的 20G 炉管濒临破坏临界点的 K 值。对上述 3 处使用超声波测厚仪进行壁厚测量和超声波探伤, 结果发现超声波探伤的信号无明显变化, 测量的壁厚值小于标准值。对该段切下进行观察, 发现炉管内部有大量的腐蚀坑, 如图 6 所示。说明该段炉管应力集中程度较大, 处于濒临破坏的状态。随机截取 K 值小于 $12 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 的 20G 炉管段, 都没有发现明显的损伤。

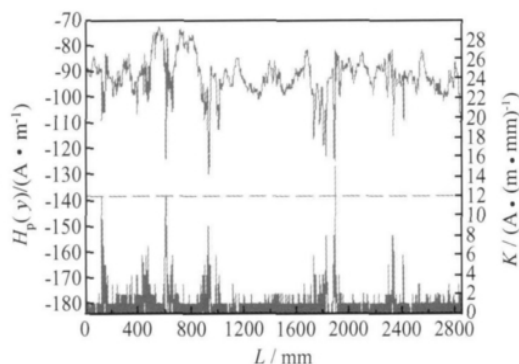


图 5 油田湿蒸汽发生器炉管磁记忆信号图

Fig. 5 The variation of MMM signals of wet steam generator tubes



图 6 炉管内部腐蚀坑图

Fig. 6 The tube with serious corrosion

因此, 通过上述实验和研究, 利用金属磁记忆技术对湿蒸汽发生器炉管缺陷的早期诊断是可行和有意义的。

5 结论

(1) 对于静载拉伸实验, 在弹性阶段磁记忆信号没有明显变化, 达到屈服极限后, 漏磁场梯度值 K 约为

$5 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$, 到达强度极限时, K 值激增至 $10 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 。

(2) 疲劳初始阶段, 磁记忆信号无明显变化; 快到达疲劳破坏时, 炉管试件的漏磁场梯度值 K 为 $12 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 左右, 试件断裂后形成正负磁极。此结果表明了磁记忆信号可以对材料的应力集中和早期的失效进行诊断。

(3) 由于拉伸实验磁弹性累积效果没有疲劳实验好, 所以得出的 K 值比疲劳实验小, 但 m 值却大致相等。通过实验室实验和现场测试比较, 湿蒸汽发生器 20G 炉管漏磁场梯度值 K 大于 $12 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 的位置处于濒临破坏的状态; 当 K 值大于 $7 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 小于 $12 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{mm})^{-1}$ 时, 炉管应力集中比较明显, 需要重点检测该区域。

参考文献

- [1] 刘喜林. 难动用储量开发稠油开采[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005. 334—338.
- [2] 陈其胜, 聂惟国, 田娜, 等. 注汽锅炉内管失效分析及预防[J]. 压力容器, 2007, 24(10): 56—59.
- [3] 潘治国, 胡传顺, 朱健, 等. 湿蒸汽发生器辐射段弯头腐蚀原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 377—379.
- [4] 韦丽娃, 苏辉, 申龙涉. 采油注汽锅炉爆管事故分析[J]. 压力容器, 2008, 25(3): 46—52.
- [5] 许振清, 智彦利, 王安泉, 等. 油田热采注汽管道在线检测技术现状[J]. 石油化工安全技术, 2006, 22(1): 28—30.
- [6] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 345—347.
- [7] 任吉林, 林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [8] 刘昌奎, 陶春虎, 陈星, 等. 金属磁记忆检测技术定量评估构件疲劳研究[J]. 材料工程, 2009, (8): 33—37.
- [9] DOUBOV A A. Diagnostics of equipment and constructions strength with usage of magnetic memory [J]. Inspection Diagnostics, 2001, (6): 19—29.
- [10] DOUBOV A A, VSTOVSKY G V. Physical base of the method of metal magnetic memory [R]. Moscow: Energodiagnostika, 2000.
- [11] 杜波夫. 管路、设备和结构的金属磁记忆诊断新技术[R]. 莫斯科: 动力诊断公司, 2007. 132—138.

收稿日期: 2011-03-09; 修订日期: 2011-07-18

作者简介: 颜廷俊(1961—), 男, 博士, 副教授, 主要从事石油及石化设备的检测方面的教学和科研工作, 联系地址: 北京北三环东路 15 号北京化工大学机电学院 36 号信箱(100029), E-mail: yantj555@163.com