

金属构件磁记忆效应影响因素研究

任吉林, 陈 曦, 宋 凯

(南昌航空工业学院 教育部无损检测技术重点实验室, 南昌 330063)

摘 要:研究金属磁记忆检测方法在高温环境下的应用。以 12CrMoV 试件为研究对象, 进行短时高温拉伸试验, 利用弱磁场测量仪对试件进行检测, 分析高温拉伸试验中温度和载荷对金属表面磁场分布的影响。

关键词:金属磁记忆检测; 高温拉伸; 应力集中

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)06-0292-04

Study on the Influencing Factors of Metal Magnetic Memory Effect of Metallic Structures

REN Ji-lin, CHEN Xi, SONG Kai

(Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education),

Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063, China)

Abstract: A metal magnetic memory testing method applied in high temperature was studied. 12CrMoV was used and stretched in short-time soak, Gauss meter was then applied. The effect on the metal superficial states of the magnetic field, which was produced by temperature and load, was analyzed.

Keywords: Metal magnetic memory; High temperature stretch; Stress concentrate

电力工业中, 电厂设备的损伤或过早失效会带来很大的安全隐患和经济损失。随着世界范围内越来越多的发电站相继进入超期服役阶段, 对在役构件进行早期诊断以减少经济损失和安全隐患就显得尤为重要。磁记忆检测方法是通过对获取地磁场和载荷共同作用下金属构件中的磁记忆效应来显示其应力分布情况, 对其进行早期诊断的无损检测方法, 在电站锅炉及管道的在线或维修检验中可望有广阔的应用前景。目前国内基于该技术的基础试验研究主要集中在常温下, 关于在高温环境中工作的铁磁构件的表面磁场分布与应力集中区分布之间关系的试验尚未见专门报道。针对该情况, 笔者通过对某电站主蒸汽管道母材 12Cr1MoV 试样进行高温拉伸实验, 在分析了各种可能因素对构件磁记忆效应影响的基础上, 探索了磁记忆检测的实际应用。

1 磁记忆检测试验系统

试验的数据测量及计算采用自制的磁记忆检测试验系统。该系统由软件和硬件两部分组成。硬件主要包括定位装置、驱动模块、计算机和弱磁场测量仪等设备。软件为控制扫描架运行并存储计算数据的应用软件。设备框图如图 1 所示。

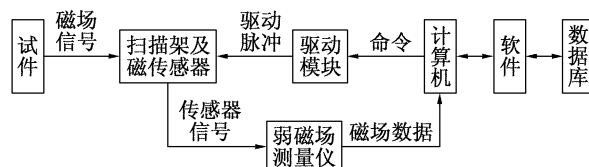


图 1 磁记忆检测设备框图

2 试验器材及方法

高温拉伸试验设备为高温蠕变试验机, 其最高工作温度为 800 ℃, 最大工作载荷为 294 000 N (30 000 kgf)。试件为带对称圆孔缺陷的中心对称圆管, 图 2 为试件尺寸示意图。

收稿日期: 2005-12-06

基金项目: 航空科学基金资助项目 (03G56001)

作者简介: 任吉林 (1945~), 男, 江西南昌人, 南昌航空工业学院自动化学院教授, 硕士生导师, 享有国务院政府特殊津贴, 全国无损检测学会副理事长, 从事电磁无损检测技术研究工作。

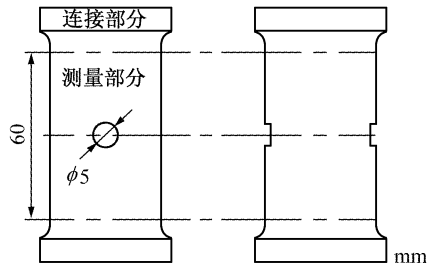


图2 高温拉伸试件尺寸示意图

试件材料为目前国内广泛用于高压超高压的亚临界参数电站锅炉的过热器、再热器、联箱和主蒸汽管道等高温部件上的12Cr1MoV。其室温和高温力学性能如表1所示^[1,2]。

表1 12Cr1MoV钢的室温和高温力学性能

试验温度 ℃	弹性模量 E $\times 10^5$ MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	延伸率 δ_5 /%	冲击功 A_{ku} /J
20	2.10	537	410	27	60
480	1.70	480	333	22	—
520	—	455	326	21.9	—
560	1.56	378	277	24.8	—

试验主要研究温度和载荷对磁记忆效应的影响。高温拉伸时的恒温恒载荷作用时间为10 min,卸载后试件随炉冷却。运用磁记忆检测试验系统对试件表面进行逐点精确磁场值测量。经测量,试件加工后表面磁场分布散乱且磁场值较大,一般在 $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ T,最大达到 6.5×10^{-4} T。考虑到过高的磁场值对试验数据测量有较大的影响,对试件进行去应力退火。退火后试件表面磁场绝对值下降到 1×10^{-4} T以下,磁场分布杂乱、磁场值波动较小,如图3所示。

表2列出了试验中各试件的加载情况。

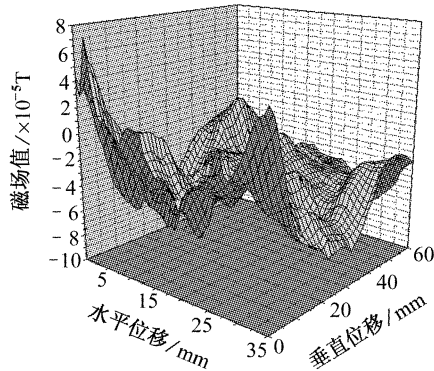


图3 退火后试件表面磁场分布图

表2 各试件的加载情况

编号	温度/℃	载荷/MPa	编号	温度/℃	载荷/MPa
1	500	120	7	550	160
2	500	160	8	500	234.5
3	500	255	9	400	234.5
4	550	234.5	10	300	234.5
5	550	215.5	11	25	234.5
6	550	196.5			

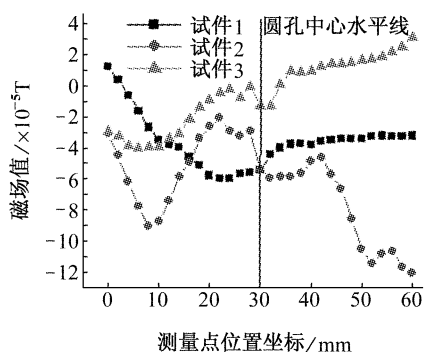
3 数据分析

根据金属磁记忆检测原理^[3]及带典型缺陷试件应力集中区分布规律^[4],以试件圆孔边缘附近同一位置测量线上的磁场值变化曲线为例,对温度和载荷对磁记忆效应的影响规律进行研究。

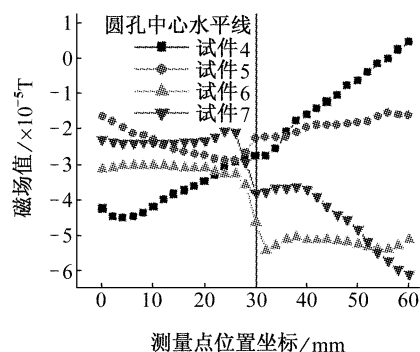
3.1 同温度不同载荷情况下的磁记忆检测结果

在其它试验条件一致的前提下,改变载荷的大小。以试件圆孔缺陷边缘附近同一位置测量线上的磁场值测量结果为例,对同温度不同载荷情况下的磁记忆检测结果进行分析。试件1~3试验温度均为500℃,载荷分别为120,160和255 MPa,图4a和c分别为加载前后试件测量线上磁场值变化曲线。试件4~7试验温度均为550℃,载荷分别为234.5,215.5,196.5和160 MPa,图4b和d分别为加载前后试件测量线上磁场值变化曲线。

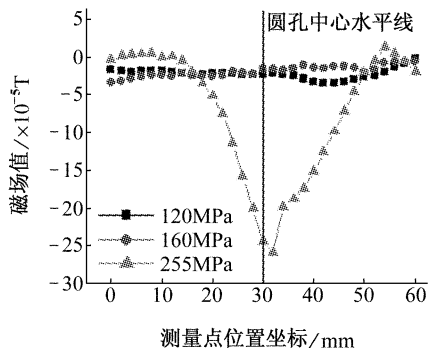
分析比较图4中的曲线,发现加载后在圆孔附近应力集中区曲线出现最高点和最低点。温度一定时,随着载荷的增加,试件磁场值测量线上磁场峰峰值(曲线最高点与最低点磁场值之差)增大。当局部应力为 $0 \sim 0.8 \sigma_s$ 时,由金属力学性能可知,此时试件处于弹性阶段,相应磁场值曲线峰峰值约为 2×10^{-5} T,试件没有出现肉眼可见的形变。当局部应力在 $0.8 \sigma_s \sim 2 \sigma_s$ 阶段时,试件处于塑性变形阶段,相应的磁场值曲线峰峰值迅速增至 18×10^{-5} T左右,此时试件圆孔缺陷拉长成椭圆形。随着局部应力的增大,圆孔边缘附近应力集中区出现裂纹。局部应力越大,裂纹扩展越大,局部应力较大区域附近的相邻两测量点的磁场差值越大。同时发现磁场值变化剧烈的点出现在与圆孔缺陷平行的环形表面上,且越接近圆孔缺陷磁场值变化越剧烈。根据金属拉伸时的力学性能^[5]可知,带圆孔缺陷的试件受到拉力作用后,在圆孔左右两端应力具有最大值,而在圆孔的上下两端具有最小值,这是由于圆孔受到



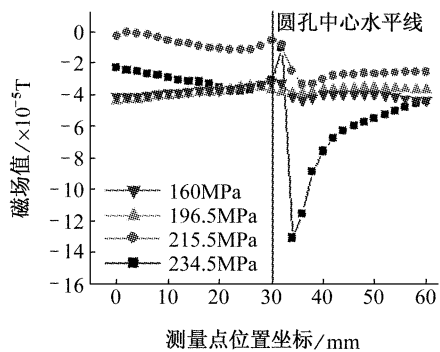
(a) 试件 1, 2 和 3 加载前磁场分布



(b) 试件 4, 5, 6 和 7 加载前磁场分布



(c) 500 °C 不同载荷情况下磁场值变化曲线



(d) 550 °C 不同载荷情况下磁场值变化曲线

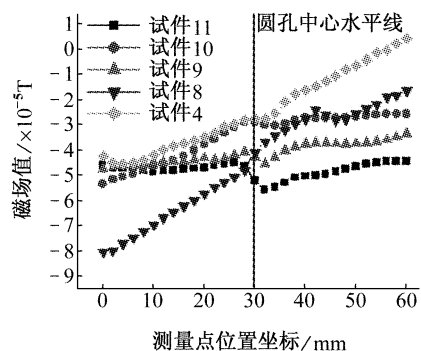
图 4 同温度不同载荷磁场值变化曲线比较

上下方向拉力,垂直方向受到拉伸,水平方向受到约

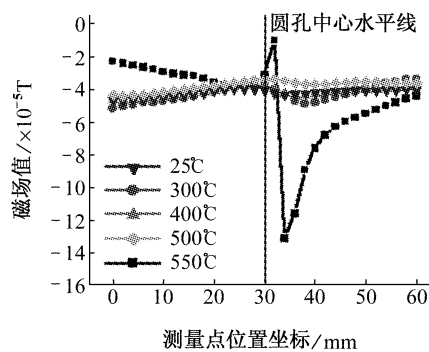
束而挤压的结果。因此可以得出磁场值变化剧烈的区域即为应力集中区域。产生该现象的主要原因在于,在方向相同、大小不同的局部应力作用下,试件内部产生的应力各向异性使部分磁畴磁矩发生偏转。局部应力越大的区域,产生的应力各向异性越大,发生偏转的磁矩越多,在试件表面则表现为磁场值越大^[6]。

3.2 同载荷不同温度情况下的磁记忆检测结果

保持其它试验条件不变,只改变温度的大小。以试件圆孔边缘附近同一位置测量线上的磁场值变化曲线为例,分析同载荷不同温度情况下的磁记忆检测结果。试件 4, 8, 9, 10 和 11 均施加大小为 234.5 MPa 的载荷,试验温度分别为 550, 500, 400, 300 和 25 °C。图 5 给出了加载前后各试件测量线上的磁场值变化曲线。



(a) 试件加载前磁场分布曲线



(b) 试件加载后磁场分布曲线

图 5 同载荷不同温度磁场值变化曲线

比较图 5 中的曲线发现,加载后在圆孔附近应力集中区曲线出现最高点和最低点。载荷一定时,随着温度的增加,试件测量线上磁场峰峰值增大,磁场值变化剧烈的点出现在与圆孔缺陷平行的环形表面上,且越接近圆孔缺陷磁场值变化越剧烈。温度在 25 °C~500 °C 时磁场峰峰值较小,且不同温度的磁场峰峰值相近,集中在 $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ T, 此

时试件没有出现肉眼可见的形变。当温度 $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时磁场峰峰值发生突变,550 $^{\circ}\text{C}$ 时磁场峰峰值达到了 $18\times 10^{-5}\text{ T}$ 左右,此时试件圆孔缺陷拉长成椭圆形,且在圆孔边缘附近应力集中区出现裂纹。以温度 T 为横坐标,典型磁场测量线的峰峰值 Y 为纵坐标,得图6所示不同温度测量线上的磁场值最大梯度变化曲线。图7为材料12Cr1MoV在不同温度时 δ_s 变化率曲线,计算公式为

$$Y = \frac{\Delta\delta_s}{T_{n+1} - T_n}$$

式中 T ——试验温度

n ——试验序数

$n=1,2,3,\dots$

$\Delta\delta_s$ ——前后两温度对应 δ_s 差的绝对值

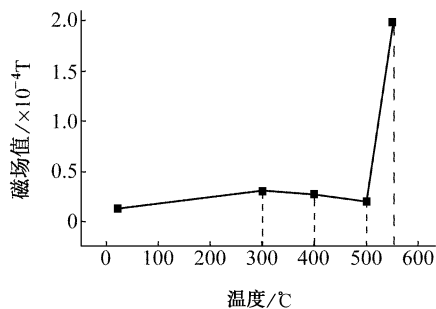


图6 不同温度磁场最大值梯度变化曲线

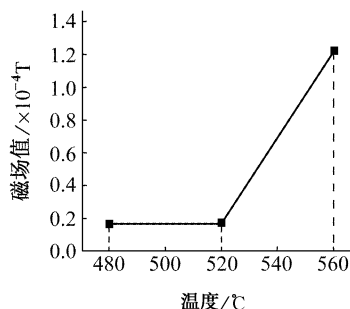


图7 不同温度时 δ_s 变化率曲线

观察图7可知,温度 $\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时材料的力学性能变化很大,屈服点迅速降低,致使同一载荷产生的局部应力大小不同,从而使相应的磁场值不同。同时由于铁磁体的居里点均在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,而最高试验温度为 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验在相对较低的温度范围内进行,此时温度升高引起应力松弛,因而利于磁化^[3]。这两个因素引起了温度越高试件表面磁场峰峰值越大,且在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上骤增的现象。

4 结论

通过试验数据整理分析总结出如下规律:

(1) 在高温情况下对带典型缺陷的圆管试件施加载荷后,在缺陷附近出现应力集中区,通过对缺陷附近磁场值进行精确测量发现,在应力集中区磁场值存在相对较大的梯度变化。

(2) 同温度不同载荷的情况下,应力集中区及应力梯度大的区域相应的表面磁场值梯度值也较大。试件加载后,在应力集中区附近出现磁场值的最大值和最小值,两者的差值即峰峰值。当局部应力为 $0\sim 0.8\delta_s$ 时,由金属力学性能可知,试件处于弹性阶段,相应磁场值曲线峰峰值在 $2\times 10^{-5}\text{ T}$ 左右,试件没有出现肉眼可见的形变。当局部应力在 $0.8\delta_s\sim 2\delta_s$ 阶段时,试件处于塑性变形阶段,相应的磁场值曲线峰峰值迅速增大至 $18\times 10^{-5}\text{ T}$ 左右,试件圆孔缺陷拉长成椭圆形,随着局部应力的增大圆孔边缘附近应力集中区附近出现裂纹,且局部应力越大,裂纹扩展越大。局部应力越大的测量点,相邻两点的磁场值的变化梯度越大。

(3) 同载荷不同温度的情况下,随着温度的增加,在应力集中区及应力梯度大的区域相应的表面磁场值出现磁场值曲线的最大值和最小值。当试验温度在 $0\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,磁场峰峰值较小,且集中在 $2\times 10^{-5}\sim 4\times 10^{-5}\text{ T}$,试件没有出现肉眼可见的形变。当温度在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,磁场峰峰值突然增大,在 $18\times 10^{-5}\text{ T}$ 左右,试件圆孔缺陷拉长成椭圆形,并且在圆孔边缘应力集中区附近出现裂纹。

参考文献:

- [1] 朱日彰,卢亚轩.耐热钢和高温合金[M].北京:化学工业出版社,1996.
- [2] GB 5310,高压锅炉管[S].
- [3] 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.
- [4] 束德林.工程材料力学性能[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [5] 刘鸿文.简明材料力学[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [6] 钟文定.铁磁学(中册)[M].北京:科学出版社,2000.

~~~~~

(上接第287页)

- [2] 安雪晖,金峰,石建军.自密实堆石混凝土充填堆石体的试验研究[J].混凝土,2005,(1):3-6.
- [3] 石建军,张志恒,金峰,等.自密实堆石混凝土充填堆石体的试验[J].南华大学学报,2005,19(1):38-41.