

# 磁滞无损评估技术在电站高温管道劣化评估上的应用研究

吴胜平<sup>1</sup>,陈城<sup>2</sup>,赵培征<sup>2</sup>

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院,江苏 南京 210000;

2. 北京康坦科技有限公司,北京 100123)

**摘要:**对电站高温管道常用材料 P22 钢展开高温蠕变试验,在不同蠕变损伤阶段进行金相、硬度和磁滞参数矫顽力的测量,构建矫顽力与蠕变寿命的关系曲线,并对在役的 P22 高温管道进行测量和验证。验证结果表明:磁滞无损评估技术在电站高温管道劣化评估上具有较好的应用前景。

**关键词:**磁滞无损评估技术;电站高温管道;P22;蠕变

**中图分类号:**TB302.5 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0081-04

## Application of Magnetic Hysteresis Non-destructive Evaluation Technology in Deterioration Evaluation of High-temperature Pipelines in Power Plants

WU Shengping<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>2</sup>, ZHAO Peizheng<sup>2</sup>

(1. Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing, 210000 China;

2. Beijing Constant Technology Inc., Beijing 100123, China)

**Abstract:** High-temperature creep test was carried out on P22 steel, a commonly used material for high-temperature pipelines in power plants. Metallography, hardness and hysteresis parameters coercivity were measured at different creep damage stages. The relationship curve between coercivity and creep life was constructed, and measurements and verification were conducted on P22 high-temperature pipelines in service. It is verified that magnetic hysteresis non-destructive evaluation technology had a better application prospect in the evaluation of high-temperature pipeline deterioration in power plant.

**Keywords:** magnetic hysteresis non-destructive evaluation technology; power plant high-temperature pipeline; P22; creep

## 0 引言

电站高温管道在运行过程中会发生组织老化和蠕变损伤,使管道的断裂韧性和强度降低,甚至发生爆管<sup>[1-3]</sup>。因此,检验电站高温管道材质的损伤状态,进而对管道的强度、断裂韧性和剩余寿命进行评估,是保证电站机组安全运行的前提。目前电站高温管道的劣化评估仍然主要采用在实验室对取样材料进行短时蠕变试验和持久断裂试验,随后对持久强度、蠕变极限数据进行外推,最终确定高温部件在实际服役工况下的剩余寿命<sup>[4-6]</sup>。从材料损伤的微观角度出发,则是通过金相组织观察,根据晶界孔洞、碳化物颗粒大小来评价材料的蠕变损伤度,进而预测高温部件的剩余寿命。然而上述实验评估方法都是基于破坏式的试验分析,对在役管道的剩余寿命评估不适用;常规的超声、射线、涡流等无损检测手段又只能对管道的宏观缺陷进行检测,对这些在宏观缺陷产生之前的隐性损伤就显得无能为力<sup>[7-8]</sup>。

在高温管道材料服役前至宏观缺陷出现之前,材料的劣化是以微观损伤的形式累积的;累积到一定程度后,材料机械性能快速恶化,给电站安全运转带来极大隐患;而

材料在整个劣化降级过程中磁滞参数(如矫顽力值)会逐渐变化,因此可以通过测量材料的磁滞参数来反映材料当前的劣化损伤状态从而预测残余寿命。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

本文选用的是电站高温管道常用材料 P22 钢,质量分数见表 1。

表 1 试验用 P22 材料质量分数 单位:%

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
0.106 5	0.173 4	0.457 4	0.009 36	0.010 46	2.138	0.940 6

P22 钢为美标钢,是最普遍使用的合金热强钢,持久塑性好,当延伸率达到 3%~5%时才开始蠕变第三阶段。其广泛用于火电、核电、石化等各个行业中和工作温度 540℃~750℃的各种受热面管道。如高压、超高压、亚临界电站锅炉、过热器、集箱和主蒸汽导管等。

第一作者简介:吴胜平(1976—),男,江苏靖江人,检验师,本科,从事压力容器、压力管道安全评价与研究工作。

## 1.2 试验方法

### 1) 蠕变试验

本文对 P22 材料展开了高温蠕变试验,试验参数为:应力 110 MPa,蠕变温度 600 ℃。在高温蠕变试验机上进行,试验参考 GB/T2039—2012《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》进行,试样尺寸如图 1 所示。

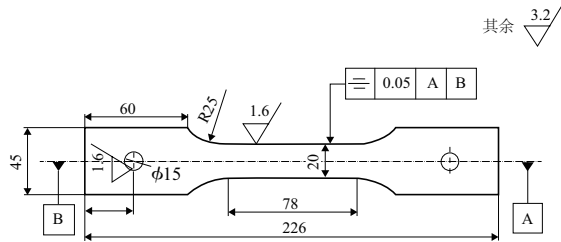


图 1 厚度 3 mm 的矩形截面持久试样

根据 DL/T654—2009《火电机组寿命评估技术导则》,P22 的 L-M(拉森-米勒)由式(1)表示:

$$p(\sigma) = T_1(20 + \log t) \quad (1)$$

则  $p(\sigma) = 36000$ ,  $T_1 = 610 \times 1.8 + 32 + 459.67 = 1571.67$ 。

预估  $t = 794$  h,实测 857 h。根据该断裂时间,计算蠕变寿命的 20%、40%、60% 和 80% 的中断时间,再次进行蠕变中断试验。

### 2) 磁滞参数测量试验

采用某公司研发的磁滞无损评估设备(MC-04H-2)和 CMP-10 探头对不同蠕变寿命的试样(即初始状态试样、蠕变寿命的 20%、40%、60%、80% 和断裂试样)进行磁滞参数矫顽力的测量。该设备采集数据仅需 3 s,测量速度快,重复性好。探头可以提离 6 mm,无需打磨清理工件表面涂层,属于非接触式测量技术,可用于实验室和实际在役管道现场测量。因此,采用该设备对电站在役管道进行现场测量评估。

### 3) 金相试验

参照 DL/T999—2006《电站用 2.25Cr-1Mo 钢球化评级标准》,对不同蠕变寿命的试样进行金相分析。将待进行金相观察的试样进行机械打磨抛光,用 3% 的硝酸酒精混合溶液进行侵蚀,侵蚀时间 100 s,然后用 ImagerA1M 型光学显微镜(optical microscope, OM)观察试样金相组织。

### 4) 硬度试验

参照 DL/T 438—2016《火力发电厂金属技术监督规程》对不同蠕变寿命的试样进行硬度检测。采用维氏显微硬度计进行硬度测量。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 微观组织及硬度检测结果

P22 材料在不同寿命阶段的微观组织如图 2 所示。P22 原始组织是铁素体+贝氏体组织。由于含 Cr 量稍高,铁素体组织中亦可见少量碳化物析出。随着试验时间的延长,贝氏体区域中的碳化物逐渐开始分散,晶界上也开始有少量碳化物析出。硬度变化不大,在 HV150~HV170 之间波动,见表 2。

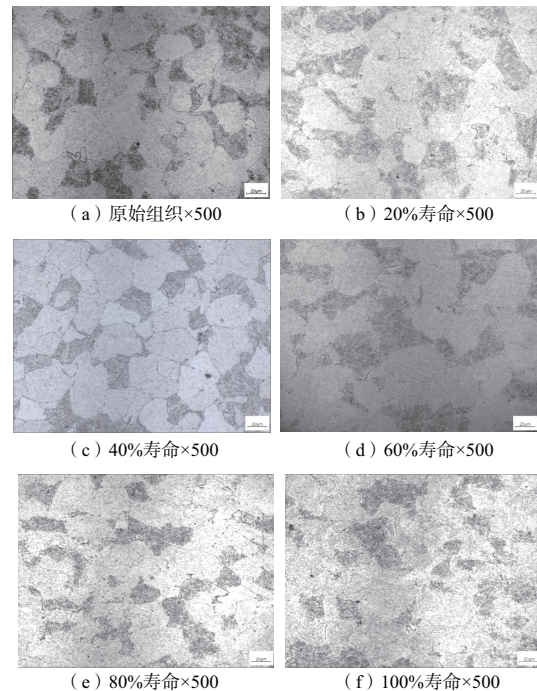


图 2 P22 原始及在不同寿命阶段的组织(铁素体+贝氏体)

表 2 P22 原始态及不同寿命阶段的硬度测量结果及金相组织评级

样品编号	硬度(HV0.5)				金相组织	评判标准	级别
	1	2	3	平均值			
2-1(原始组织)	173	165	161	166	铁素体+ 贝氏体组织	DL/T999—2006 《电站用 2.25Cr- 1Mo 钢球化 评级标准》	—
2-2(20%寿命)	156	150	154	153			
2-3(40%寿命)	143	153	154	150			
2-4(60%寿命)	150	164	158	157			
2-5(80%寿命)	165	170	175	170			
2-6(100%寿命)	156	159	153	156			

## 2.2 磁滞测量结果

矫顽力与蠕变寿命的关系如图3所示。

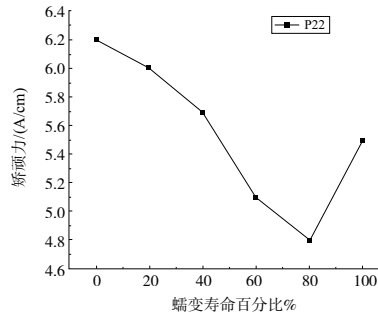


图3 矫顽力与蠕变寿命的关系

由图3可知,P22材料在蠕变寿命的前80%以内,矫顽力是逐渐降低的,从6.2降低到4.8;在80%~100%,矫顽力略有增加,增加到5.5。

袁超等<sup>[9]</sup>认为,在高温蠕变过程中,材料中的碳化物分解出来的碳原子沿晶界扩散,导致基体产生更小的应变,并且最终耗尽间隙原子中的碳含量。随着蠕变时间的延长,碳化物不断增长、合并,减少了钉扎中心的数量,并且钉扎点之间的距离增大,钉扎密度开始减小。因此,随着蠕变应变的积累,矫顽力逐渐降低。DEVINE M K等<sup>[10]</sup>也认为,在蠕变初始阶段后期和稳定蠕变阶段,已形成核的孔洞持续长大,碳化物进一步球化,随着大孔洞的形成,位错和空位转移到晶粒边界,阻碍磁畴壁运动的钉扎点将减少,蠕变稳定阶段阻碍磁畴壁运动的钉扎点的减少造成材质矫顽力下降。辛甜等<sup>[11]</sup>认为,在塑性变形过程中,矫顽力随位错密度的降低而大幅度减弱。到了蠕变第三阶段,Laves相(Fe<sub>2</sub>Mo)等脆性相形成,其体积较大,无法对畴壁运动造成钉扎作用,因此矫顽力持续下降。但是本研究中,在断裂时出现了矫顽力增加的情况,分析原因,可能是由于本研究测量的100%寿命的蠕变试样是发生断裂的试样,在最终断裂时,由于大变形的存在,导致了矫顽力的增加。

考虑到实际服役材料在进行寿命评估的时候并不会发生断裂(否则评估已经没有意义,应该进行的工作是失效分析),因此本研究中直至80%寿命的研究结果均具有参考意义。

## 2.3 现场测量验证

对淮安某电厂锅炉服役 $2.95 \times 10^4$  h P22过热器管母材矫顽力实际测量4次(5.4、6.3、5.3、6.2),取平均值(5.8)进行对比。假设设计寿命为 $20 \times 10^4$  h,则 $2.95 \times 10^4$  h相当于15%的寿命。对扬州某电厂服役约 $12.7 \times 10^4$  h P22主蒸汽管母材矫顽力实际测量4次(4.9、5.4、5.5、4.9),取平均值(5.18)进行对比。假设设计寿命为 $20 \times 10^4$  h,则 $12.7 \times 10^4$  h相当于63.5%的寿命。对比结果如图4所示。从图中可以看出,实际服役管线坐标点与通过试验建立的寿命阶段-矫顽力关系曲线变化规律一致。

对比结果表明,实际服役管线钢测量值与预测曲线吻合较好。这说明本研究给出的矫顽力-蠕变寿命百分比关系曲线是可信的。

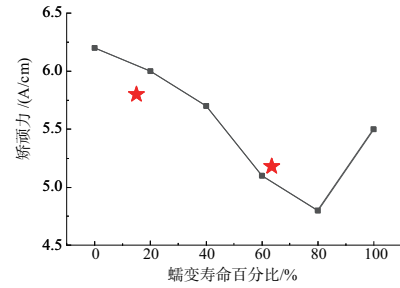


图4 实际服役P22管母材矫顽力测量结果与曲线的对比

以上分析结果显示,矫顽力随着服役寿命消耗比例的增加而降低,对寿命预测模型进行统一,随后对矫顽力降低比例与蠕变寿命耗损之间的关系进行了研究。

P22材料矫顽力降低比例与蠕变寿命耗损之间的关系如图5所示。从图中可以看出,矫顽力降低比例随着蠕变寿命耗损比例的增加而增加,在0%~80%寿命范围内,近似符合线性关系,如图6所示,线性关系可以写成 $y = Ax - B$ (A可取29.84,B可取1.61)。

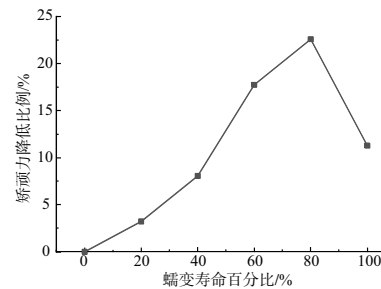


图5 P22管母材矫顽力减少量与蠕变寿命阶段关系曲线

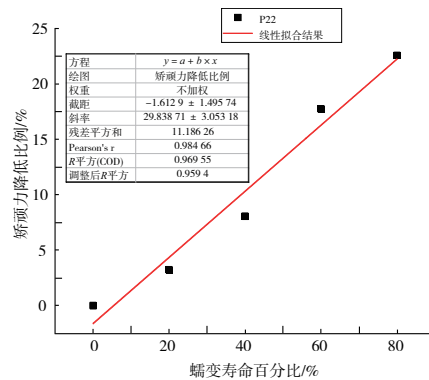


图6 P22管母材矫顽力减少量与蠕变寿命耗损关系式

## 3 结语

1) 试验结果表明,P22材料矫顽力随着蠕变损伤的增加逐渐下降,矫顽力降低比例与蠕变寿命耗损之间存在线性关系。

2) 根据试验结果,如果矫顽力降低幅度达到15%以

上,说明蠕变寿命已经进入到中后期(蠕变寿命损耗已超过60%左右),需要引起使用单位的注意。

3)在试验过程中,发现试样发生蠕变断裂后(100%蠕变寿命),矫顽力会出现增大现象。这主要是由于断裂时材料发生了显著的塑性变形所致。但是在实际服役过程中,在发生蠕变断裂时,矫顽力如何变化,尚未得到相关数据,有待后续继续研究。

4)通过对P22材料的试验研究和现场测量验证表明,磁滞无损评估技术是一种有效的检验电站高温管道蠕变劣化的无损检测手段,本文只对P22材料进行了初步研究,线性关系中的A、B两位常数仍需大量试验去修正,其他材料的磁滞参数与蠕变损伤的关系,有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 刘堂礼. 超临界和超超临界技术及其发展[J]. 广东电力, 2007, 20(1): 19-22, 50.
- [2] 唐飞,董斌,赵敏. 超超临界机组在我国的发展及应用[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 80-82.
- [3] 钟万里,王伟,梁永纯,等. 超临界机组金属高温蒸汽氧

化[M]. 北京:中国电力出版社, 2010.

- [4] 张振宇,姚晨光. 我国超超临界燃煤发电技术及发展[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 7(1): 29-32.
- [5] 张静媛,刘明福. 关于超临界超超临界发电机组的发展[J]. 山西科技, 2006, 21(4): 7-8, 10.
- [6] 杨富,章应霖,任永宁. 新型耐热钢焊接[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [7] 冯顺厅. 超(超)临界机组金属材料焊接技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2010.
- [8] 周顺深. 火电厂高温部件剩余寿命评估[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [9] 袁超,胡正飞,武艳君. 9Cr马氏体耐热钢的组织性能分析和失效研究[J]. 金属功能材料, 2012, 19(1): 26-31.
- [10] DEVINE M K, JILES D C. Effects of high temperature creep on magnetic properties of steels ( pipeline inspection ) [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2465-2466.
- [11] 辛甜,刘新宝,朱麟,等. 磁性测量的高温蠕变状态参数化表征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 852-856.

收稿日期:2021-07-20

(上接第51页)

从综合性能和做功能力来看,弯度比在0.30~0.35之间时,该高负荷微型跨音轴流涡轮表现较好,能有效避免叶背分离、强激波、负载荷、流通面积变小等不利影响。

## 4 结语

本文通过数值模拟方法,根据高负荷微型涡轮发动机性能要求,设计出一款高负荷微型跨音轴流涡轮部件,对其流场特点、损失特性进行分析并研究弯度比对其性能影响,结论如下:

1)高负荷微型跨音轴流涡轮相比于常规微型轴流涡轮,其气流加速膨胀能力变强,导向器叶根叶背出口附近容易产生分离,转子进口叶根有较大正攻角及较强叶背分离,叶尖处间隙泄漏影响较强。

2)高负荷微型跨音轴流涡轮的总损失高于常规微型轴流涡轮,其叶型损失远高于常规微型轴流涡轮,占总损失的70.9%;二次流损失略小,叶尖泄漏损失较大。无论在何种涡轮叶型中,叶型损失占比均超过一半。在高负荷微型跨音轴流涡轮中,损失主要集中于导向器叶根出口附近,转子叶根和叶尖后半段。

3)高负荷微型轴流涡轮随着弯度比的增加,前缘正攻角及叶背分离现象减弱,负载荷逐渐消失,在弯度比 $\tau=0.35$ 左右时具有良好的流场结构和加载表现,当弯度比进一步增加,尾缘受出口强激波影响形成叶背分离,尾缘出现负载荷。

4)随着弯度比的增加,流量、落压比、效率、做功能力均呈现先增大再减小的特点。但在低弯度比下,流量变化微弱,合适的弯度比可以降低其流动损失,提高效率。当弯度比在0.30~0.35之间时,该高负荷微型跨音轴流涡轮具有较好的性能表现和做功能力。

#### 参考文献:

- [1] 崔之华. 小燃气轮机—燃气轮机的一个特殊领域[J]. 国际航空, 1986(3): 34.
- [2] 黄国平,温泉,李博,等. 微型涡喷发动机顶层设计研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 832-838.
- [3] 吴怀宇,周兆英,熊沈蜀,等. 微型飞行器的研究现状及其关键技术[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2000, 23(2): 170-174.
- [4] HOLLINGUM J. Military look to flying insect robots [ J ]. Industrial Robot; an International Journal, 1998, 25(2): 124-128.
- [5] ASHLEY S. Palm-size spy planes [ J ]. Mechanical Engineering, 1998, 120(2): 74-78.
- [6] JEFFREY E. HAAS J E. Analytical and experimental investigation of stator endwall contouring in a small axial-flow turbine: II - stage result [ R ]. NASA Technical Paper, 1984.
- [7] JEFFREY E. HAAS J E, KOFKEY M G. Cold-air performance of a 12.766-centimeter-tip-diameter axial-flow cooled turbine [ R ]. NASA Technical Note, 1975.
- [8] JEFFREY E. HAAS J E, KOFKEY M G. Cold-air performance of a 12.766-centimeter-tip-diameter axial-flow cooled turbine: II - Effect of air ejection on turbine performance [ R ]. NASA Technical Paper 1018, 1977.
- [9] JEFFREY E. HAAS J E, KOFKEY M G. Cold-air performance of a 12.766-centimeter-tip-diameter axial-flow cooled turbine: III - Effect of rotor tip clearance on overall performance of a solid blade configuration [ R ]. NASA Technical Paper 1032, 1977.
- [10] EWEN J S. Investigation of the aerodynamic performance of small axial turbines [ R ]. ASME Journal of Engineer for Power, 1973; 326-332.
- [11] 张远森. 微型涡轮发电机双级轴流涡轮设计 [ D ]. 南京:南京航空航天大学, 2012.

收稿日期:2021-02-09