

火电机组和部件的 寿命评估与管理

◆ 李益民 刘树涛 杨百勋 史志刚

(西安热工研究院有限公司, 西安 710032)

1 火电机组和部件寿命评估的概念及意义

1.1 火电机组和部件寿命评估的概念

火电机组的寿命有经济寿命和安全使用寿命。有的机组设备陈旧、煤耗率太高、热效率太低,经济上不合算,其经济寿命也算终结了。本文所述的机组寿命,是指机组和部件在正常服役条件下可以安全使用的寿命。

通常所说的火电机组设计寿命只具有理论上的意义。对金属部件来讲,目前国内外均采用常规强度设计,故不能给出部件的设计寿命。对压力容器和管道,即由其压力、温度、材料的许用应力和

几何结构确定其壁厚;对汽轮机、发电机转子等转动部件,则由其扭矩、温度、材料的许用应力和几何结构确定其轴的直径。只有进行有限寿命设计的部件才有设计寿命,例如飞机、卫星等高端技术装置。对火电机组而言,一般经验地确定其寿命为30年。机组或部件的安全使用寿命是指机组或部件在服役条件下可安全运行的实际时间或疲劳循环次数。剩余寿命则为安全使用寿命减去部件已累积运行的时间或疲劳循环次数。

火电机组的寿命评估和管理涉及部件的服役条件、材料的性能和损伤状态、部件的受力、评估判据的研究,是一个多学科、多领域的综合技术,

5 总结

作为一名工程师,需要建立一个绿色文化,通过良好的标准及典范去抗衡气候变化。同时自己作榜样来影响我们的亲朋好友,共同实施绿色文化。在日常生活中,都有相当多的机会直接或间接地去节省能源,使可持续的、健康的居住环境能够维持下去。为了生活在一个清洁的地球,最重要的是要改变公司和个人的生活方式及消费行为。

每个人都能发挥自身的责任,这是发展绿色文化和保护环境的关键。在过去,我们可能不知晓我们可以花费“碳信用额度”。现在必须意识到我们要花费的每一个“碳元”。必须节约能源和其它资源,不能随意浪费。教育比立法更可取。通向可持续发展的未来确实是一个漫长的道路,但所有人都应该发挥重要的自身责任。我们在此漫长的道路上合作越早,就越能为子孙后代拯救我们的地球。■



作者简介:

陈福祥,博士,工程师,香港工程师学会副主席。1972年毕业于香港大学电机工程系取得一级荣誉学士学位。1979年在伦敦大学帝国学院获得了电力系统保护博士学位。积极参与香港工程师学会(HKIE)、美国电气与电子工程师学会(IEEE)和英国工程技术学会(IET)等学术团体。曾任香港工程师学会电机分部主席和IEEE香港分会电力工程联合会的主席。

现任职中电工程有限公司总经理。其有着较丰富的电力系统经验,特长有:继电保护、配电自动化、照明应用和能源服务。此外,还参与各种管理活动。

发表论文40多篇。由于他的杰出成就和贡献,于2000年获得了IEEE的第三个千禧年的奖章。在2003年和2007年分别获得香港工程师学会会报年奖。2008年,又获得IEEE电力工程分会杰出工程师奖。

并以大量的技术标准、技术资料 and 软件平台为支撑。

机组的寿命评估主要是对关键部件进行的寿命评估。评估时必须考虑部件是否含超标缺陷。对于不含超标缺陷的部件，主要依据部件的设计、制造、服役条件、运行历程、维修更换等资料，部件当前的状态，材料的各项力学性能和微观组织老化程度，部件服役环境和危险部位的受力状态，采用合适的评估方法（判据）对部件的寿命做出预测。对于含超标缺陷的部件，主要依据部件缺陷的性质、大小和分布及缺陷所在部位的受力状态，部件材料的力学性能，特别是断裂韧性以及微观组织状态，用断裂力学的方法分析部件缺陷的危险程度。

机组的寿命管理和部件的寿命评估的关系类似于一个控制系统和一次元件信号的关系。机组的寿命管理是一个控制系统，机组部件的寿命评估则是一次元件的信号。只有获得精确可靠的一次元件信号，才能使控制系统更为安全可靠，即只有获得精确可靠的部件的寿命评估，才能使寿命管理系统更为安全可靠。

1.2 火电机组和部件寿命评估的意义

对机组和部件进行寿命评估，一方面可预知部件的安全使用寿命，及时掌握设备的安全状态和寿命损耗，避免发生突然事故，为机组的安全可靠运行提供技术支持；另一方面，为机组的状态检修、部件的更换提供必要的技术支持，降低检修成本。

从机组运行的经济性考虑，由对机组进行计划检修改为状态检修是一个必然的发展趋势。采用先进的监测手段，及时掌握设备的安全状态和寿命损耗，合理地安排检修项目与检修间隔，从而有效地降低检修成本，提高设备安全性。为了达到机组的状态检修，必然要对机组，特别是机组的关键部件，例如汽轮机转子、汽缸、发电机转子、发电机绝缘、锅炉汽包、汽水分离器、高温联箱、蒸汽管道、高温过热器、高温再热器管等的安全使用寿命作出评估。

1.3 机组和部件寿命评估的范围

机组和部件寿命评估主要是对机组安全性影响较大的关键部件进行评估。关键部件是指当其发生事故时会迫使机组持续停运，危及人身安全，修理、更换费用高、时间长的部件。它是进行机组

和部件寿命评估的主要对象。一般部件或有影响部件是指当其发生事故或故障时，可能导致机组的性能下降，机组短时间停运，一般不会危及人身安全的部件。这类部件损坏时易作更换处理。

2 部件寿命评估程序和分级

2.1 部件寿命评估的程序

图1和图2示出了无超标缺陷部件寿命评估和含超标缺陷部件安全性评估的程序。图2中的失稳断裂评估包括以裂纹尖端张开位移（CTOD）、J积分、应力强度因子 K_I 和应变能密度因子S为判据的分析评定。

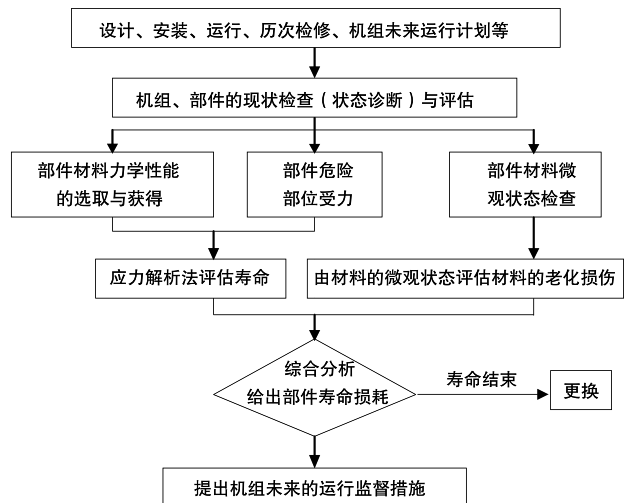


图1 无超标缺陷部件寿命评估程序框图

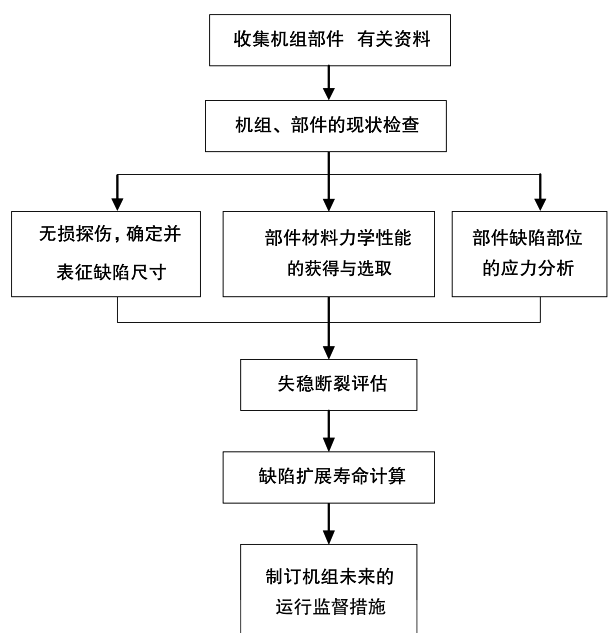


图2 含超标缺陷部件寿命评估程序框图

2.2 部件寿命评估的分级

部件的寿命评估可按3级评定法进行。表1列出了3个等级评估所需的资料。

表1 3个等级评估所需资料

资料信息类别	I级评估	II级评估	III级评估
制造及运行资料	制造及运行资料	制造及运行资料	制造及运行资料
运行历程、事故及维修记录	电厂记录	电厂记录	电厂记录
温度和压力	设计或实际运行值	实际运行或测量值	实际运行或测量值
运行工况	记录或额定	检测	详细检测
部件几何尺寸	设计制造资料	测量	测量
是否取样	否	否	是
微观组织	现场复型试验	现场复型试验	现场复型+实验室试验(不可取样的部件除外)
材料性能	查阅资料,取最低值	查阅资料,取最低值	试验测定,取最低值(不可取样的部件除外)

3 金属部件寿命评估的要素

金属部件寿命评估必须具备5个要素:设计、运行和检修资料;现状检查与状态评估;受力状态与服役环境分析;材料的力学性能与微观组织老化;合适的评估判据(方法)。

部件的设计、制造、运行和检修资料包括:设计、制造、安装资料;机组投运时间,累计运行小时数和不同工况下的启停次数;机组的运行参数(压力、温度)和方式,是否调峰运行;机组事故史和事故分析;历次检修检查记录及机组未来的运行计划。

机组、部件的现状检查包括:内外部可视部位的宏观检查;部件几何尺寸;无损探伤以及材质状态。依据检查结果,对部件的质量和损伤状态作出评估。

部件危险部位的受力分析可采用解析法、有限元法或经验公式。例如GB/T9222-2008附录A中关于汽包下降管部位的热应力计算,DL/T940中确定管道弯头部位最大环向应力的经验公式等。

部件材料的性能数据主要包括:力学性能、物理性能以及微观组织状态。在条件许可的情况下,应在部件服役条件最苛刻的部位取样并进行相关的材料试验;若直接在部件上取样有困难,则可选与部件材料牌号相同、工艺相同的原材料进行试

验;如在短时间内不能取得实际的试验数据,则可参考相同牌号材料已积累数据的下限值。由试验获得的原始材料的性能,当用于部件寿命评估时,应考虑其性能在高温、应力作用下随时间的延长而劣化的情况和数据的分散度、小试样与部件的尺寸效应、频率效应等。

4 部件寿命评估方法

4.1 线性累积损伤法则

工程中常用线性累积损伤法则估算部件的蠕变、疲劳或蠕变-疲劳寿命损耗。表2列出了估算部件寿命损耗的公式。表中各符号定义一致。

表2 线性累积损伤法则估算部件寿命损耗的公式

损伤类型	寿命损耗判据	式中符号的意义
蠕变损伤	$\sum_{i=1}^i \frac{t_i}{t_{ri}} \leq D$	t_i ——部件在某一工况下的运行时间; t_{ri} ——部件在某一工况下的失效时间; D ——损伤度。理论上 $D=1$,但在工程实际中 D 的取值往往小于1
疲劳损伤	$\sum_{i=1}^i \frac{n_i}{N_{fi}} \leq D$	n_i ——部件某一工况下的循环周次; N_{fi} ——部件在某一工况下的失效循环周次; 对于汽包/汽水分离器, D 值取0.75;对于转子,不考虑蠕变损伤, D 值取0.70
蠕变-疲劳损伤	$\sum_{i=1}^i \frac{t_i}{t_{ri}} + \frac{n_i}{N_{fi}} \leq D$	对于转子, D 值取0.75

4.2 高温部件的蠕变寿命评估

对以蠕变为主要失效机理的高温部件,工程中常采用等温线外推法、等应力外推法或L-M(Larson-Miller)参数法来评估部件的蠕变寿命。

(1) 线性外推法

等温线外推法和等应力外推法均为线性外推法。两者的差异在于试验条件的不同。等温线外推法是材料在固定的温度 T 、一系列不同应力 σ 下进行的持久断裂试验;等应力外推法是材料在固定的应力 σ 、一系列不同温度 T 下进行的持久断裂试验。然后依据 $\sigma=k(t_r)m$ 或 $T=k'(t_r) m'$ 对 $\sigma-t_r$ (持久断裂时间)或 $T-t_r$ 进行线性拟合,获得材料的持久强度曲线。图3所示为P92钢在不同温度下的持久强

度曲线。

当获得了材料的持久强度曲线之后,即可根据部件的运行温度和应力估算部件的蠕变寿命。

我国及前苏联多采用等温线外推法评估高温部件的蠕变寿命。等温线外推法的优点是简单、应用方便。不足之处在于有时外推的原材料的持久强度与使用过的材料持久强度有矛盾;更长的时间范围内,应力与时间不呈线性关系;外推寿命对应力过于敏感;未考虑蠕变变形。

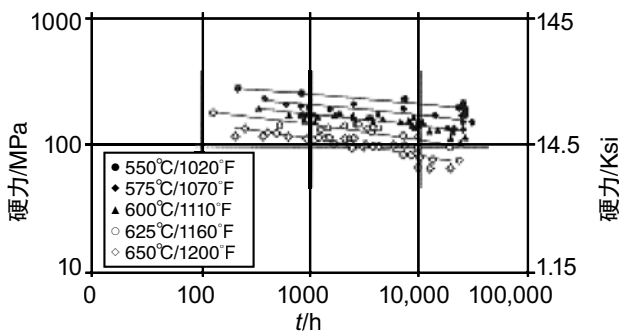


图3 V&M公司T/P92钢的持久强度曲线

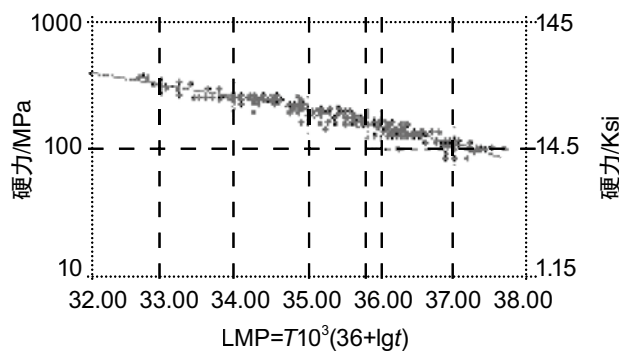


图4 T/P92钢的L-M参数曲线

(2) L-M参数法

L-M参数法是断裂时间 t_r 和温度 T 二者相结合的参数,以 $P(\sigma)$ 表示: $P(\sigma)=T(C+lg t_r)$ 。可根据材料在不同应力 σ 、不同温度 T 下的持久断裂时间 t_r 试验数据进行拟合,以获得公式中的 C 值。图4所示为P92钢的L-M参数曲线。

L-M参数法的优点是评估精度和可靠性较高,不足之处是外推结果受 C 值的影响较大,且未考虑蠕变变形。

(3) J法

20世纪80年代以来,一些研究者提出了用J法评估高温部件的蠕变寿命。该法采用 $e = J_1 \times (1 - e^{-J_2 t}) + J_3 (e^{J_4 t} - 1)$ 式来描述材料的

蠕变曲线。当获得了材料在某一温度和应力下的 J_1 ,即可确定部件在其服役条件下材料的蠕变变形曲线(如图5)。在蠕变变形曲线上,将第II阶段(近似直线)向第III阶段过渡切点的蠕变应变定为失效点,即可根据检测部件的蠕变应变来确定蠕变寿命。

J法的优点在于评估精度和可靠性较高,不足之处是方法较复杂。

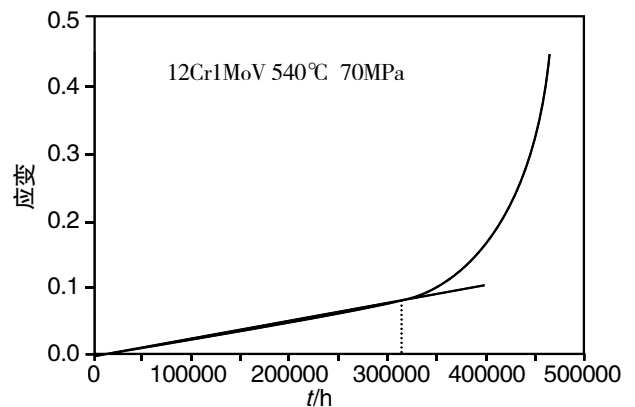


图5 12Cr1MoV钢制管道在540°C、70MPa下的蠕变曲线

高温部件的蠕变寿命评估,工业发达国家都已制订了相应的规程。例如 DL/T654-2009火电厂超期服役机组寿命评估技术导则(中国); DL/T940-2005火电厂蒸汽管道寿命评估技术规程(中国); ASME CASES OF BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE Case N-47-32(美国); ASME BPVC Section III Subsection NH - Class 1 Components in Elevated Temperature Service(美国); EPRI 火力发电厂延长寿命通用导则(美国); TRD-508 附件1按持久强度值计算构件寿命的方法(德国); R5-2002 Assessment procedure for the high temperature response of structures(英国); Rcc-MR Design and construction rules for mechanical components of FBR nuclear island(法国)。

4.3 以疲劳为主要失效机理的部件的寿命评估

在火电机组中,锅炉汽包和汽水分离器、汽轮机高/中压转子等部件,由于机组启停时在其危险部位会导致机械应力和热应力的集中,产生低周疲劳损伤。例如,汽包、汽水分离器的接管处,转子调节级区段变截面处和前轴封弹性槽部位,对于调峰机组更为严重,故对这些部件应进行低周疲劳寿命估算。

进行部件的低周疲劳寿命估算必须获得部件的疲劳寿命曲线。通过对部件材料进行低周疲劳试验,获得材料的应变-寿命($\epsilon-N_f$)曲线,对 $\epsilon-N_f$ 曲线进行技术处理,获得部件的疲劳寿命曲线(如图6)。

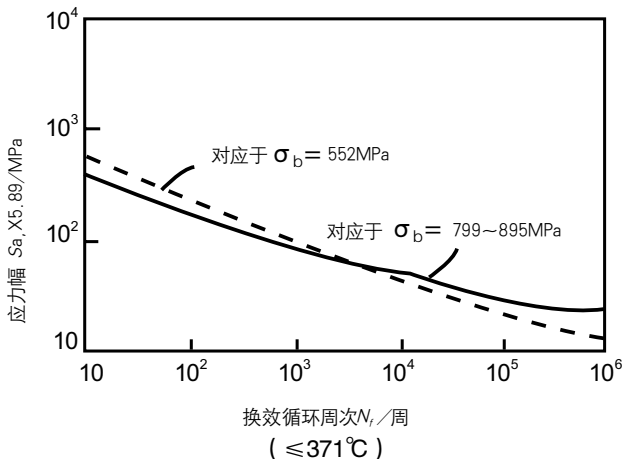


图6 ASME提供的压力容器疲劳寿命曲线

然后采用有限元法或经验公式分析部件危险部位的应力,包括机械应力和热应力。热应力的计算则要考虑机组冷态、热态、温态启停及变负荷运行等工况。

根据部件在每一工况下危险部位的应力或应变和部件的疲劳寿命曲线,即可在疲劳设计曲线上查找到与部件应力或应变对应的失效循环周次 N_{fi} ,然后按线性累积损伤准则估算部件的疲劳寿命损耗。

对于汽包、汽水分离器等压力容器的低周疲劳寿命估算,国内外均有相关的评估标准。例如GB9222-2008 水管锅炉受压元件强度计算附录A; ASME锅炉和压力容器规范,第2卷第8章(Section VIII, Division 2); 德国TRD301承受内压的圆筒; 英国BS5500 附录C 推荐的压力容器疲劳寿命评估方法以及前苏联的ГOCT25859 钢制容器及设备低周载荷下强度计算方法等。

4.4 汽轮机高/中压转子、高温联轴的疲劳-蠕变寿命评估

汽轮机高/中压转子、高温联轴等部件往往承受疲劳-蠕变损伤,对于调峰机组,此种情况更为严重。这时应确定部件在某一工况下相应的疲劳失效循环周次 N_{fi} 和蠕变失效时间 t_r ,然后根据表2中提供的线性累积损伤法则确定其疲劳-蠕变寿命损耗。

4.5 低合金耐热钢锅炉管的蠕变寿命估算

对于低合金耐热钢锅炉管,可根据服役管子的金属温度、管材的损伤状态和管子的环向应力,用等温线外推法或L-M参数法估算管子的蠕变寿命。管子金属温度的估算是利用超声波检测仪检测受热面管向火侧内壁的氧化层厚度,根据检测结果和锅炉运行时间估算管子的金属温度。然后根据检测的管子向火侧金属厚度、材料的持久强度和管材的微观组织老化程度,对管子的蠕变寿命作出综合评估。

4.6 带缺陷部件的安全评估

对于电站锅炉汽包、汽水分离器、汽轮机、发电机转子等尺寸较大的部件,有时会发现一些超标缺陷,例如裂纹、夹杂、未熔合等缺陷。而这些缺陷的挖补处理比较困难,往往处理不好会导致缺陷进一步发展或出现新的缺陷,所以,国内外开展了大量的缺陷安全评定。

金属部件的缺陷安全评定的基础是断裂力学。对于强度较低的低合金钢制汽包、汽水分离器以及电站压力容器,一般采用CTOD(裂纹张开位移)断裂韧度 d_c 或 $d_{0.05}$ 或J积分断裂韧度 J_{Ic} 来评估。而对于强度较高的合金结构钢制的汽轮机、发电机转子等尺寸较大的部件,则采用应力强度因子法(平面应变断裂韧度 K_{Ic})或应变能密度因子(S准则)来评判。

金属部件的缺陷评定必须具备3个要素:缺陷尺寸、材料的断裂韧度、缺陷部位的应力和评定判据。缺陷尺寸通常用超声波来检测,根据缺陷的大小、数量和分布对缺陷进行简化、复合,表征出等效裂纹尺寸 \bar{a} 。对所有的缺陷,在安全性评定中均按裂纹处理。根据 \bar{a} 、材料的力学性能(特别是材料的断裂韧度)缺陷部位处的应力大小和方向,采用合适的判据对缺陷进行安全性评估。

关于锅炉压力容器的缺陷评定,世界各工业发达国家的技术机构均制订了相应的规范或标准,例如GB/T19624-2004在用含缺陷压力容器安全评定(中国); DL/T654-2009火电厂超期服役机组寿命评估技术导则(中国); IW-75 按脆性破坏观点建议的缺陷评定方法(国际焊接学会); WES-2085K-76 按脆断评定的焊接缺陷验收标准(日本); ASME-3G-77 锅炉及压力容器规范第3篇附录G“防止非延性破坏”(美国); WEE/37-78 焊接缺陷验收标准若干方法指南(英

国); BSI PD6493-80焊接缺陷验收标准若干方法(英国), R6-2001 Assessment of the integrity of structures containing defects (英国), BS7910-2007 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures(英国); SINTAP-1999 Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry(欧盟)。

关于汽轮机、发电机转子缺陷的安全性评定,国内外也进行了大量的研究与实践。例如美国 EPRI编制的评定汽轮机转子安全性的SAFER (Stress and Fracture Evaluation of Rotors) 程序。我国在20世纪70年代后期也曾经组织大专院校、科研单位和企业开展了汽轮机、发电机大轴的安全性评定,取得了不少有用的成果,积累了许多数据和经验,可供汽轮机、发电机大轴安全性评定参考。DL/T654-2009中给出了转子缺陷评估的基本方法。

对于含缺陷部件的安全评定,上述方法可给出缺陷是否失稳扩展的评估,若现存的缺陷不会发生失稳扩展,则还应估算缺陷的疲劳扩展寿命。为此,要计算部件缺陷部位处的应力强度范围 ΔK , $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = Y\Delta\sigma\sqrt{pa}$ 。然后根据缺陷的初始尺寸、临界尺寸、应力强度范围 ΔK 和裂纹扩展速率估算缺陷部件的裂纹扩展寿命。对于计算的裂纹扩展寿命,要考虑材料数据的分散性、小试样与部件尺寸的差异等因素,取一定的安全系数,即为带缺陷部件的裂纹扩展寿命。

4.7 寿命评估技术的新进展

目前高温部件的寿命评估技术的进展主要体现在以下几个方面:①利用无损的方法检测部件的损伤,进而评估其寿命;②多轴应力试验分析技术及结构试验;③应力与环境试验。

利用无损的方法检测部件损伤、评估寿命是目前出现的新技术,例如热电势法、电阻法、超声波能量衰减法、金属磁记忆等。热电势法(Thermo-electric Power Measurement)是用一个特制的仪器检测双相不锈钢两相之间的热电势,通过两相之间的热电势差判断材料的蠕变损伤程度,进而估算其寿命。金属磁记忆检测原理可以表述为:处于地磁环境下的铁制工件受到外载荷的作用时,其内部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,并在应力与应变集中区形成最大的漏磁场变化,磁场的切向分量具有最大

值,而法向分量改变符号且具有零值点。这种磁状态的不可逆变化在外载荷消除后会继续保留。从而通过漏磁场法向分量的测定,便可准确地检测工件的应力集中区。

关于金属部件缺陷的无损检测技术有TOFD技术、相控阵技术和导波技术。TOFD(Time of Flight Diffraction)技术可较准确地对缺陷尺寸进行定量;相控阵技术可对缺陷的三维尺寸进行定量;导波技术则可检测一些常规超声波不能检测的部位。

多轴应力试验以及结构试验研究。通常用于部件寿命评估的蠕变、疲劳及断裂力学试验,多采用单轴应力或应变试验,与部件的实际受力状态有差异,所以工业发达国家积极开展部件材料的多轴蠕变、疲劳试验以及结构试验,其试验结果和分析更接近于部件的实际受力状态。

应力与环境试验。由于火电机组部件多在高温、氧化及腐蚀环境下服役,所以模拟部件的实际工作环境的试验,可使部件的寿命评估更为可靠和准确。

5 机组的寿命管理

机组的寿命管理就是通过对机组关键部件的服役条件、损伤状态的及时监测,即时对部件的安全运行寿命进行评估,为机组的状态检修、部件维修和更换提供技术依据。

对机组实施寿命管理,一方面可预知部件的失效寿命,提高设备运行的安全性、可靠性;另一方面又可充分发挥设备的寿命潜力,避免不必要的更换,降低维修成本。使机组安全可靠运行,并使电厂获得最大经济效益。

机组的寿命管理是以部件材质的损伤状态、运行条件、剩余寿命分析和部件的可靠性评估与风险分析为基础技术,来建立部件寿命管理信息软件平台。通过对部件运行参数、运行状态的监控,随时掌握部件的寿命损耗和安全状态。

机组的寿命管理可采用在线监测与评估、离线监测与评估或离线-在线相结合的方式。图7为锅炉管在线监控寿命管理系统的一个截图。

6 结束语

本文简述了火电机组和部件寿命评估的概念和意义、部件寿命评估程序、部件寿命评估方法、

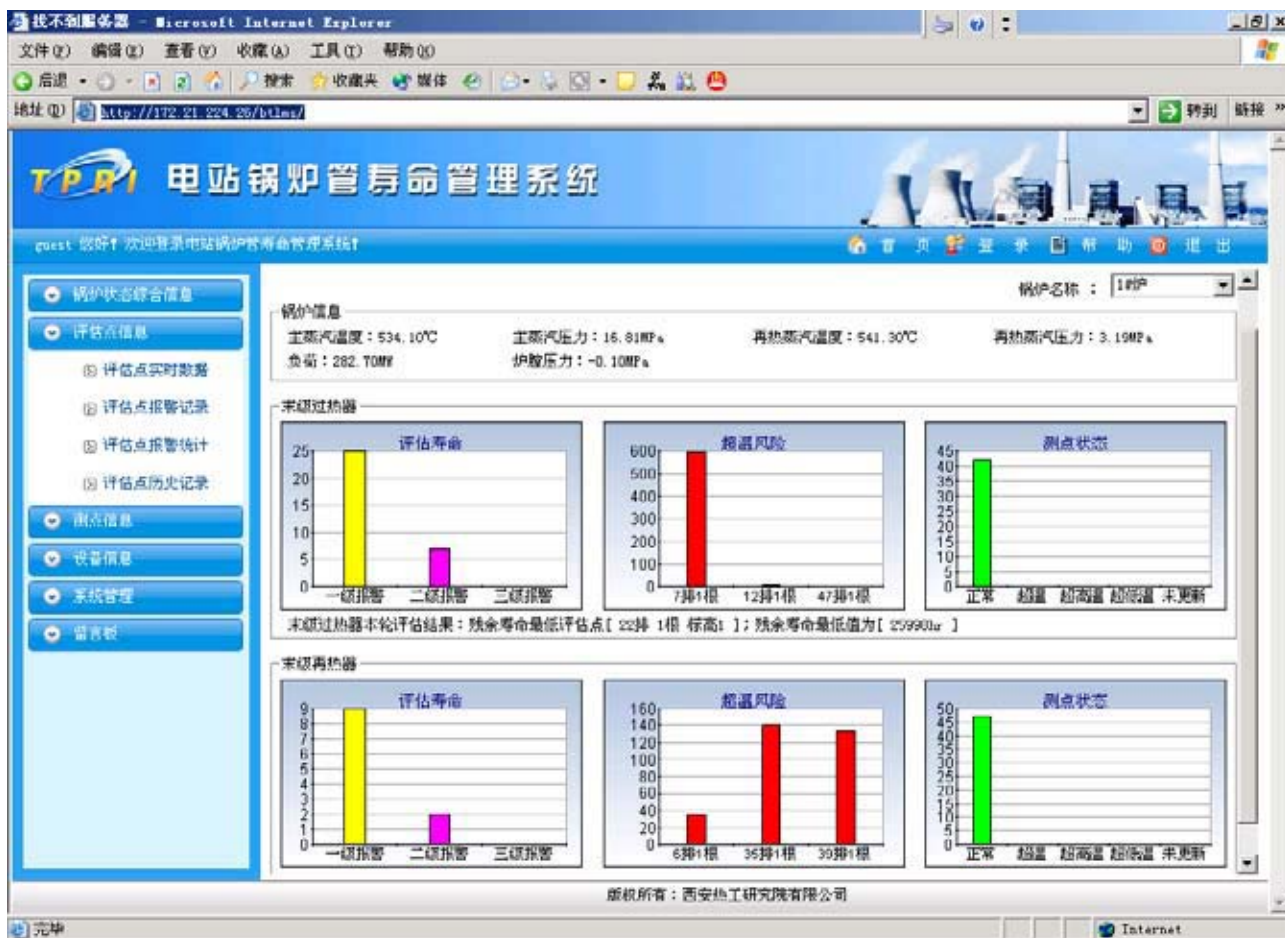


图7 锅炉管寿命管理系统截图

部件缺陷的安全评估和机组的寿命管理。目前重要的是要开展超(超)临界机组新型耐热钢(P91、P92、X12CrMoWVNbN10-1-1等)制部件的寿命评估和部件缺陷检测新技术、新方法的研究。只有获得精确可靠的部件寿命评估,才能使机组的寿命管理系统更为安全可靠。🔴



作者简介:

李益民,研究员,西安热工研究院有限公司电站建设技术部副主任,长期从事火电厂金属材料研究、金属疲劳、断裂力学研究和部件寿命评估以及电站部件的失效分析;主持并参与多项重大课题和项目的研究,主持并参与10多项火电厂有关金属技术监督标准的制定、修订工作,在国内

外技术刊物上发表论文40多篇,获部级科学技术成果奖5项,1999年享受国务院政府特殊津贴。