A-PDF Split DEMO : Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.023

电站锅炉受热面管损伤风险评估方法研究*

李正刚[1],石端伟[1*],廖冬梅[1],李茂东[2]
(1. 武汉大学 动力与机械学院,湖北 武汉 430072;
2. 广州市特种承压设备检测研究院,广东 广州 510100)

摘要:针对电站锅炉受热面现行检验标准只能进行定性评判、处理方法单一等问题,应用安全科学风险评估的基本原理和基于风险的检验技术,提出并讨论了电站锅炉受热面管损伤风险评估基本方法和过程,结合电站锅炉受热面检验标准,按照风险评估结果与现行标准评判结果一致的原则,对受热面管检验过程中各检验指标的标度分别进行了划分,研究并确定了风险矩阵评估中概率标度和后果严重程度的量化取值范围。研究结果表明:电站锅炉受热面管检验风险矩阵评估方法实现了对锅炉受热面管损伤的量化风险评估,科学反映了锅炉受热面损伤的风险等级,通过制定不同预控措施,有计划、有针对性、经济合理地进行了预防和处理,为电站设备状态检修决策提供了依据。

关键词:电站锅炉;受热面管;损伤;风险评估
中图分类号:TK228;TB302;TM611 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-4551(2013)04-0480-05

Study on damage risk assessment methods of power plant boiler tubes

LI Zheng-gang[1], SHI Duan-wei[1], LIAO Dong-mei[1], LI Mao-dong[2]
(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou 510100, China)

Abstract: Aiming at the problems of the current inspection standards of the power plant boiler tubes were only qualitative evaluation and a single approach, the basic principles of safety science-based risk assessment and risk - based inspection technology were applied, the damage risk assessment methods and processes for the power plant boiler tubes were proposed and discussed. According to the principles that the risk assessment results should be consistent with the current standard evaluation results, the scale of inspection indicators during the inspection process of the power plant boiler heating surface were divided, the probability and consequences scale of the risk matrix assessment and the quantitative span of the severity of the consequence were studied and determined. The results indicate that the inspection risk matrix assessment methods of the power plant boiler tubes is effective. On this basis, it can be to implement the risk assessment of the damage of the power plant boiler tubes, to reflect the risk level of the damage of the boiler heating surface scientifically and to develop different precontrol measurements, the prevention and treatment will be carried out in a planned, targeted, economical and reasonable way, so that it can be to provide the basis of maintenance decision according to the equipment status of the power plant.

Key words: power plant boiler; boiler tube; damage; risk assessment

0 引 言

近年来,随着高参数、大容量的大型火电机组及设备迅速发展,电站设备的安全可靠性越来越重要。目前,影响火电机组可靠性的主要原因集中反映在锅炉设备上,电站锅炉运行的可靠性直接影响到电厂的经济性和安全性。锅炉的主要承压部件是锅炉受热面管,包括过热器管、再热器管、水冷壁管和省煤器管

收稿日期:2012-10-25
基金项目:中国人民财产保险股份有限公司2012年度灾害研究基金资助项目(2012B05)
作者简介:李正刚(1969-),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事金属部件监督检验,金属结构失效分析与风险预控方面的研究. E-mail:zgli@whu.edu.cn
通信联系人:石端伟,男,教授,博士生导师. E-mail:dwshi@whu.edu.cn

等部件，长期在高温高压、烟气飞灰等十分恶劣的使用环境介质中运行，服役过程中会发生蠕变、疲劳、腐蚀、冲蚀等一系列的老化损伤失效，由此可能出现严重的受热面管爆漏事故。我国大型火电站锅炉四管爆漏引起的停炉占机组非计划停用时间约40%，占锅炉设备非计划停用时间约70%[1]。电站锅炉受热面爆漏失效是造成非计划停运的主要原因，对机组的安全、稳定、经济运行威胁极大。而且随着老机组服役时间的增加及新增大型机组投产和参数的提高，这类事故还有逐年上升的趋势。如能对电站锅炉受热面管损伤失效早分析、早判断，并进行有效的预测与控制，对其存在的隐患进行分析，有针对性地防患于未然，将对合理安排检修策略、缩短检修时间、降低临检率及减少检修费用具有重要意义。

基于风险的检验与维修技术正是一项研究如何使设备运行更安全、更可靠、设备维修成本更低的新技术。在我国火力发电领域，基于风险的检验与维修目前正处于起步阶段，国内学者和研究机构对风险检验方法及其在电站设备中的应用研究越来越关注[2]。本研究将从现行电站锅炉受热面检验标准入手分析其存在的主要问题，探讨电站锅炉受热面管损伤风险评估方法及过程，重点分析并确定风险矩阵评估中概率与后果严重程度的量化，从而实现对锅炉受热面管损伤的风险评估。

1　锅炉受热面管损伤与风险评估

1.1　电站锅炉受热面现行检验依据及存在问题

现行的电站锅炉受热面管检验与判别标准有DL/T 438-2009《火力发电厂金属技术监督规程》、DLT 939-2005《火力发电厂锅炉受热面管监督检验技术导则》和DL 647-2004《电站锅炉压力容器检验规程》等，在这些标准中，对锅炉受热面管的检验与判别主要存在如下问题：

（1）所有检验与判别标准都是定性评判，这些标准仅从锅炉受热面管检验出发，从不同方面定性评判部件损伤失效与否，给出了“是”与“非”、“好”与“坏”的限值或门槛值；例如：合金钢管外径蠕变变形大于2.5%，碳素钢管外径蠕变变形大于3.5%，或腐蚀点深度大于壁厚的30%时，应及时更换。

（2）对于“检验结果未达到判废标准的损伤，但存在爆漏失效可能”的潜在危险及危害一律接受，处理方法单一，盲目性较大；例如，当管子的腐蚀点坑深小于原壁厚的30%而大于原壁厚的20%的潜在危险性如何评判和控制，无据可查。

（3）在锅炉受热面管实际检修和运行过程中，对于“未达到判废标准的损伤，但却存在失效可能”的潜在危险实际是允许存在的，由于研究者未进行量化分析，其潜在风险的大小也就不能被准确掌握，对这些潜在危险的控制与处理就存在盲目性。

对于这部分未达到判废标准但仍继续使用的管子而言，的确存在很大的潜在风险，继续使用时如何对这些潜在的危险进行评估，进而经济、合理地预防和处理就显得尤为重要。针对上述问题，对锅炉受热面管损伤，通过采用风险评估方法对潜在的危险进行分析、评估、控制等，即分析损伤后锅炉受热面管发生失效的概率大小和后果严重程度，那么就可以根据风险值，结合具体情况做出科学的决策，有计划、有针对性、及时合理地进行预防和处理[3]。

1.2　风险评估方法及应用

风险评估是对待评估系统或设备发生事故和危害的危险性进行定性和定量分析，评价系统或设备发生危险的可能性和后果严重程度，以寻求最小的事故发生率、最小的损失和最优的安全投资效益为目的，又称为危险评价[4-5]。风险评估是对危险的可能性和后果严重程度进行定性以及定量的分析，然后综合确定出风险的程度和风险分布，并在此基础上制定科学的检验策略，对高风险设备进行重点检验，可以达到在保证设备安全运行的基础上显著降低检验成本的目的，它是电站设备维修决策中的一个重要环节[6]。

风险管理科学在工业生产设备运行检修中的应用最早起源于核工业，研究人员为了确定检修的优先次序，并做出基于风险的决策，由此发展了概率风险分析技术。挪威船级社在海洋石油平台上采用了基于风险的检验（Risk-Based Inspection，RBI）技术，美国自1995年开始了基于风险的检测在石化装置检验中的研究，并在2000年发布了API 580（基于风险的检验）和API 581（基于风险的检验的资源文件）两个推荐标准[7-8]。2006年国家质量监督检验检疫总局发布了《关于开展基于风险的检验（RBI）技术试点应用工作的通知》，明确了基于风险的检验技术是在特种设备安全性与经济性统一的基础上建立的一种优化检验方案的方法，并于特种设备检验检测领域试点[9]。

风险评估技术方法一般可以分为以下3类：

（1）定性分析。定性分析一般只是被用来作为风险的显示，而不是对风险进行评估。由于定性分析所需资料较少，其区别能力就非常有限，但它可以用于对设备迅速按重点进行排序，以便于作进一步的风险分析。研究者一般采用专家打分方法、故障树方法。

（2）半定量分析。半定量分析是介于定性和定量之间的一种分析方法，研究者采用比较简化的假设，

方法比较简单,需要的资料较定性分析要多。主要是以风险指数为基础的风险评价方法。

(3) 定量分析。定量分析需要提供比较详细的基础数据,包括工艺流程数据、设备设计资料、历年维(检)修记录、工艺介质分析数据、失效分析记录等。然后在以上数据的基础上,利用相关理论方法进行分析。定量分析是制定详细检验计划的基础,主要是概率风险评价。

本研究以风险理论为基础,风险是用事故可能性与损伤的程度来表达的经济损失与人员伤害的度量。这可以表明:①发生事故的概率,它是用来预测生产过程中某部件、设备等可能发生什么事故及其发生事故的可能性有多大;②生产过程中发生事故可能造成设备财产损失和人员安全损害的程度,即事故后果;③生产过程中发生事故的概率与事故后果,即生产系统的事故风险。

风险可用下式表示:

$$R=f(F\cdot C) \tag{1}$$

式中:R—系统事故风险,F—系统发生事故的可能性(概率),C—系统发生事故的严重程度(后果)。

传统的锅炉受热面管检测技术与判废标准往往是定期大范围的普查。在风险分析的基础上,研究者对影响锅炉受热面管风险的各种因素做定量化评估,对锅炉受热面管的风险等级做出判断,并根据设备的风险等级确定要重点关注的部件,优先对重要设备和部件进行检验,做到既减少检修成本,又可以降低系统的整体风险水平。目前国际上采用基于风险的检验技术对在役设备进行维护和检验已成为发展方向[10-13]。

2 锅炉受热面管损伤风险评估过程

对锅炉受热面管损伤进行风险评估,就是考虑锅炉受热面管在高温、高压的环境中氧化、腐蚀、减薄以及组织性能变化的不确定性,因而需要对其存在的风险进行概率和后果严重程度分析,进而评价锅炉受热面的安全状况,为安全运行、合理检修提供理论依据和科学指导。

锅炉受热面管的风险评估的基本过程包括:资料收集、现场检验、损伤特征识别、对危险发生频率的评估、对危险产生后果的评估和风险评估等过程,示意图如图1所示。

风险矩阵是将风险发生概率与后果影响程度这两个量纲综合考虑的一种常用方法。该方法通过将风险发生概率与后果影响程度以矩阵的形式表示,并以此为依据评定项目的风险等级,如极低、低、中、高、极高等风险级别。

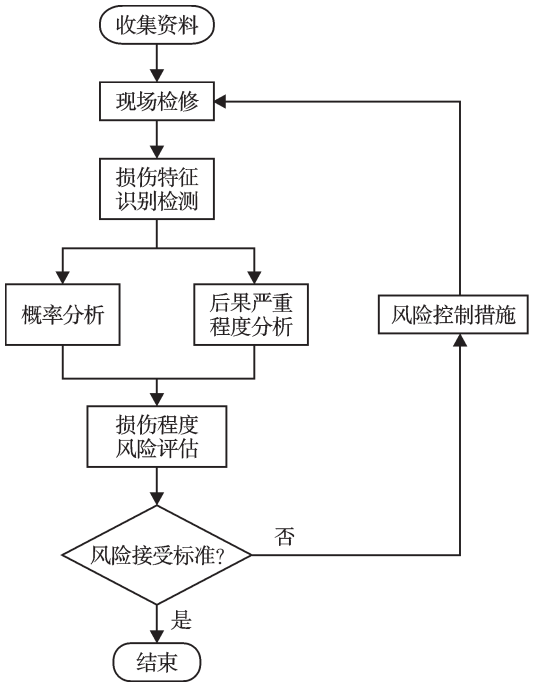

图1 锅炉受热面管风险评估的基本过程

以下介绍锅炉受热面管风险矩阵评估过程中的概率分析、后果严重程度分析和损伤风险矩阵评估。

2.1 概率分析

概率分析就是要确定锅炉受热面管因出现各种损伤后发生失效的概率。在风险矩阵中,风险发生概率标度(F)取值范围在0~1之间,既可以采用序数标度,如从可能性极低到几乎确定无疑的相对概率值来表示的风险发生概率标度,也可以采用普通标度,如0.1、0.3、0.5等,为具体的风险发生概率赋值。

对各指标的标度确定遵循两个原则:①风险评估结果与现行标准评判结果一致,即按照风险矩阵评估后的判废等级应该与现行标准的定性评判的结果一致;②比现行标准更加细致合理,即用风险评估方法对锅炉受热面管损伤潜在危险分析,有针对性、有目的性地加以预控,相对经济合理地防患于未然。锅炉受热面管风险发生概率标度如表1所示。

2.2 后果严重程度分析

后果严重程度分析就是分析锅炉受热面管因为出现各种损伤后在高温、高压环境的作用下可能导致的各种事故后果及损失。后果严重程度取值范围也是在0~1之间,取值为0表示风险损失较小,取值为1表示风险损失大。风险影响标度可反映某项风险发生后所造成的后果严重程度,风险影响标度(衡量后果严重程度的水平)可以用相对比例来描述,如“很低”、“低”、“中等”、“高”、“很高”,同时也可以采用数字比例为风险影响标度来赋值。这些数值可以是线性值,例如,0.1、0.3、0.5、0.7、0.9,或非线性值,例如,

表1　锅炉受热面管风险发生概率标度分级

分数值 F	事故发生可能性	壁厚减薄腐蚀	表面氧化皮厚度	晶界氧化裂纹深度	蠕变变形*		金相组织		宏观裂纹、鼓包
					碳钢	低合金	珠光体球化	石墨化	
0.8	很高	大于30%	大于0.6 mm	大于5个晶粒	大于3.5	大于2.5%	大于5级	大于4级	宏观裂纹,明显鼓包
0.4	高	20%~30%	0.3 mm~0.6 mm	3~5个晶粒	2.0%~3.5%	1.5%~2.5%	4~5级	3~4级	有鼓包
0.2	中等	10%~20%	0.1 mm~0.3 mm	1~3个晶粒	0.8%~2.0%	0.5%~1.5%	3~4级	2~3级	轻微鼓包
0.1	低	小于10%	小于0.1 mm	小于1个晶粒	小于0.8%	小于0.5%	2~3级	1~2级	不明显
0.05	很低	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	无

上标"*"—高合金钢参考DLT 939-2005《火力发电厂锅炉受热面管监督检验技术导则》相关内容。

0.05、0.1、0.2、0.4、0.8,非线性值反映了回避高影响风险的愿望。

后果严重程度数字比例可以根据项目具体需要自行选择其可能产生的后果(C)。本研究参考国家电网安监[2005]145号《国家电网公司电力生产事故调查规程》、国电发[2000]643号《电业生产事故调查规程》等相关规程标准内容,电力行业事故(障碍)划分方式如下:电力行业事故大致分为人身事故、电网事故和设备事故3类。设备事故的等级划分如下:特大设备事故、重大设备事故、一般设备事故、设备一类障碍、设备二类障碍[14]。对于电站锅炉这样发电机组主设备,受热面管发生爆漏失效往往造成主设备被迫停运和非计划检修等一般设备事故。例如,当锅炉受热面管检查发现一处损伤,其风险发生概率很高(F =0.8),造成的事故后果严重程度通常为一般设备事故(C =0.4),按照现行标准需要更换处理,风险评估的结果应该与现行标准的定性评判结果一致,为高度危险,立即换管。

由此,本研究可以得到锅炉受热面管的事故后果严重程度分级,分级表如表2所示。

表2　锅炉受热面管事故后果严重程度分级表

分数值 C	影响	标准	
		生产安全型	人身安全型
0.8	灾难,数人死亡,或造成很大财产损失	发生重大电网事故;重大设备事故;直接经济损失达500万元*	重大人身死亡事故(一次死亡3人及以上,或一次事故死亡和重伤10人及以上)
0.4	非常严重,一人死亡,或造成一定的财产损失	发生一般电网事故;一般设备事故;设备被迫停运	一般人身死亡事故(1人以上,3人以下)
0.2	严重,重伤,或造成较小的财产损失	发生一类障碍	一般人身事故,重伤
0.1	重大,轻伤或很小的财产损失	发生二类障碍	一般人身事故,轻伤
0.05	引人注目	发生轻微不安全事件	轻微伤害

上标"*"—据国家电网安监[2005]145号《国家电网公司电力生产事故调查规程》,直接经济损失包括更换备品配件、材料、人工和运输费用。

3　锅炉受热面管损伤风险评估的方法

根据锅炉受热面检查项目的具体情况及检查结果,本研究首先估算出每项风险发生概率和后果严重程度,然后将两者相乘,得到一个风险值。然后采用风险概率影响程度矩阵的形式,对每项风险的等级进行评定,最终得出每项风险的重要性及其紧迫程度。

一个典型的概率影响风险矩阵如图2所示,黑色区域表示风险值较大,阴影区域表示风险值较小[15];风险值介于两者之间的灰色、白色区域表示中等风险。风险值可以为设备运行和检修人员提供指导,如果风险发生概率较高,且会产生不利影响程度,即处于风险概率影响程度矩阵的灰色区域,则需要积极地对其采取风险应对措施;对于处于低风险区域的风险事件,则只需对其进行观察,并准备应急储备,而无须采取积极的措施。

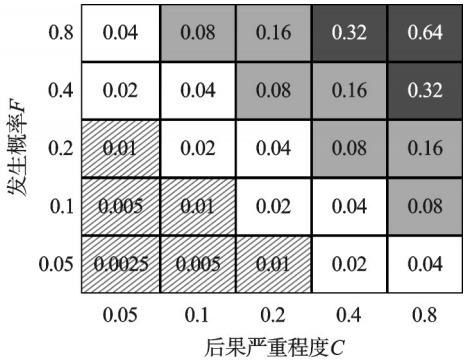

图2　风险矩阵

风险等级是依据表2中后果严重程度分级并结合锅炉管损伤概率和实际情况来定义的,锅炉受热面管

损伤经过风险评估后，各种损伤情况按风险高低排序，研究者在监督、运行和检修中就可以区别对待，突出重点，根据风险评估等级，采取不同预控措施，具体措施如表3所示。

表3 锅炉受热面管损伤风险等级表

风险分数值R	危险程度	风险等级
>0.32	高度危险，立即换管	一级(黑色)
0.08~0.32	显著危险，割管检查	二级(灰色)
0.02~0.08	一般危险，需要注意，可以继续使用	三级(白色)
<0.02	稍有危险，可以正常使用	四级(阴影)

4 结束语

本研究将风险评估应用于电站锅炉受热面管损伤评估中，提出并讨论了电站锅炉受热面管损伤状态风险评估基本方法和基本过程，分析了电站锅炉受热面现行检验标准存在问题，提出了电站锅炉受热面管风险评估的必要性和可行性。通过用风险评估方法对电站锅炉受热面管损伤潜在危险进行分析、评估、控制，可以根据具体情况做出科学的决策，有计划、有针对性、经济合理地进行预防和处理；结合电站锅炉受热面检验标准，讨论并确定了风险矩阵评估过程中概率标度和后果严重程度的赋值及量化取值范围；利用锅炉受热面管损伤风险评估方法，科学地反映了锅炉受热面损伤的风险等级，制定了不同预控措施，并为电站设备状态维修决策提供了依据。

参考文献(References)：

[1] 刘鸿国，洪道文，李耀君，等. 锅炉受热面风险维修技术的应用[J]. 浙江电力，2009(2)：14-16.

[2] 刘富君，孔 帅，凌张伟，等. 基于风险检验技术的电站锅炉过热器评定方法[J]. 浙江大学学报：工学版，2011，45(10)：1791-1798.

[3] 张耀辉，郭金茂，徐宗昌，等. 基于故障风险的状态维修检测间隔期的确定[J]. 中国机械工程，2008，19(5)：555-557.

[4] 罗 云，樊运晓. 风险分析与安全评价[M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[5] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 周家启，译. 北京：科学出版社，2006.

[6] 刘富君，孔 帅，胡东明，等. 风险评估技术在我国的应用进展[J]. 无损检测，2009，31(12)：953-958.

[7] JOVANOVIC A. Risk-based inspection and maintenance in power and process plants in Europe[J]. **Nuclear Engineering and Design**，2003，226(2)：165-182.

[8] API. API Publication 581-2000 Risk-Based Inspection-Based Resource Document[S]. Washington DC，2000.

[9] 国家质量监督检验检疫总局. 国家质量监督检验检疫总局关于开展基于风险的检验技术试点应用工作的通知[J]. 中国特种设备安全，2006，22(6)：4-5.

[10] 陆 东，牟善军. 欧洲设备风险检查技术发展及应用概况[J]. 安全、健康和环境，2004(1)：36-39.

[11] 陈学东，杨铁成，艾志斌，等. 基于风险的检测(RBI)在实践中若干问题讨论[J]. 压力容器，2005(7)：36-44.

[12] DESCHANELS H，ESCARAVAGE C，THIRY J M. Assessment of industrial components in high temperature plant using the ALIAS-HIDA-A case study[J]. **Engineering Failure Analysis**，2006(13)：767-779.

[13] 金承尧，赵建平. 基于RBI方法的在役安全阀风险评价技术研究[J]. 南京工业大学学报：自然科学版，2004，26(5)：25-28.

[14] 国家电网安监[2005]145号. 国家电网公司电力生产事故调查规程[S]. 北京：国家电网公司，2005.

[15] 李 奇，李延渊，黄贤滨，等. 基于风险检测的风险评估方法[J]. 安全、健康和环境，2004(2)：35-38.

[编辑：李 辉]

(上接第479页)

[3] 奚 旺，刘永文，杜朝辉，等. Modelica/Dymola语言及其在燃气轮机动态仿真中的应[J]. 热力透平，2004，33(1)：17-22.

[4] HAUGWITZ S. Modelling of Microturbine Systems [D]. Sweden：Lund University，2002.

[5] PÉREZ A A G. Modelling of a Gas Turbine with Modelica [D]. Sweden：Lund University，2001.

[6] 奚 望，刘永文，杜朝辉，等. 基于Modelica语言的燃气涡轮建模及应用[J]. 动力工程，2004，24(1)：41-44.

[7] TUMMESCHEIT H. Design and Implementation of Object-Oriented Model Libraries using Modelica[D]. Sweden：Lund University，2002.

[8] 王松岭，张学镭，陈海平，等. 基于相似定律外推压气机通用特性曲线的方法[J]. 动力工程，2007，27(2)：169-173.

[9] 奚 旺. 航空发动机模块化建模与系统级仿真[D]. 上海：上海交通大学动力机械及工程学院，2004.

[10] CASELLA F，LEVA A. Modelica Open Library for Power Plant Simulation：Design and Experimental Validation[Z]. Linköpings Universitet，Linköping，Sweden：The Modelica Association，2003.

[11] KAWASAKI. GPB15/30 Series Gas Turbine Generator Specifications[M]. KAWASAKI，2011.

[12] KAWASAKI. GPB60/70 Series Gas Turbine Generator Specifications[M]. KAWASAKI，2011.

[13] 李宇红. 不同运行方式下燃气轮机部分负荷性能的比较[J]. 燃气轮机技术，1999，12(1)：28-34.

[编辑：李 辉]