

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: X2010182020

UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文
电 站 锅 炉 四 小 管 失 效 分 析

Failure analysis of four tube in power station boiler

左仁红

指导教师姓名: 王磊 副教授

专 业 名 称: 机械工程

论文提交日期: 2015 年 9 月

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2015 年 9 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其它个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

火力发电厂是我国供电主体，约占总体发电量的 70%。大型火电厂的安全事关电网的安全运行，而火电厂中的锅炉运行的可靠性是影响发电厂运行可靠性的首要因素，尤其是锅炉四小管的损坏泄漏对机组的安全运行影响最大，是火力发电厂的常见事故，一般占机组故障的 60%~70%。锅炉经常由于四小管设计、制造、安装、运行、修理改造、管理等环节的问题以及长期在高温、高压、腐蚀、冲刷等恶劣条件下运行等原因而造成爆管并导致停炉。只有掌握四小管各种类型爆管的失效机理，才能有的放矢地开展监督检查工作，寻找有效的管理和技术防治对策，提高机组运行的可靠性，保障电网的稳定经济运行。

为了有效开展四小管失效分析，本文对四小管各种类型爆管的失效形式进行了整理分类，并将失效形式分为过热爆管、腐蚀、疲劳、磨损、管材原始缺陷和设计、安装、运行不当造成爆管等 6 种形式。四小管失效的发生有时候是一种形式造成的，有时候是多种形式综合造成的，需要开展相关检验检测才能做出正确的定性分析和预防措施，因此，为了能全面正确而快速的给出结论，将失效分析程序进行了梳理，有利于失效分析的进行。

理论来源于实践，并服务于实践。本文应用失效形式和失效程序，开展四小管失效分析，针对四小管分类型提出可能失效方式，并提出失效后采用的分析方法，对四小管每一种类型开展具有较普遍性典型失效分析，取得了较好的效果。分析结果表明，造成四小管失效的因素较多，有单一因素造成的，更多是多种因素造成管子失效，应进行综合分析。

失效分析的目的是为了找到造成失效的原因，并提出防止同类失效再次发生的相应措施。本文针对四小管失效进行综合分析，分析完后都给出了处理意见，以有效应对失效的再次发生。最后，本文认为防止四小管失效的发生要从设计、制造、安装、使用、修理改造全过程进行质量监控，只有在各个环节都严格把关，并从失效案例中汲取教训，才能有效减少四小管的失效发生。

关键词： 电站锅炉；四小管；失效分析

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Thermal power plant is the main power supply of our country, accounting for 70% of the total power generation. The safety of large thermal power plant is related to the safe operation of power grid. The reliability of boiler operation in the coal-fired power plant is the primary factor that affect the reliability of power plant operation, especially boiler four tubular damage and leakage iMPacting on safe operation of the unit is the common accident of the thermal power plant, which generally accounts for 60% - 70% of the unit's fault. Tube explosion and shutdown of boiler caused by aging of running in harsh conditions of temperature ,high pressure ,corrosion, erosion etc,and by four tubular design ,manufacture,installation operation, repair, transformation, management ect. Mastering the four tubular various types of failure mechanism of tube explosion can be targeted to carry out supervision and inspection work, looking for effective management and technical measures of prevention, to improve the reliability of unit operation, to guarantee grid steady and economic operation.

In order to effectively carry out four tubular failure analysis, the various types of failure form four tubular explosion classified as 6 kinds of forms of hot blast pipe, corrosion, fatigue, wear, the original defects of tube and the design, installation, tube explosion caused by improper operation. Occurrence of four tubular failure sometimes caused by a form, sometimes forms need to carry out inspection and testing in order to make a correct qualitative analysis and preventive measures. Therefore, in order to give out completely correct and quick conclusions, failure analysis program is sorted, in favour of making the failure analysis.

Theory comes from practice, and serves for practice. In this paper, the failure mode and failure process are used to carry out failure analysis of four tubular. Possible failure type and analytical method used after the failure is proposed to carry out typical failure analysis with a more universal for the type of four tubular. Four tubular failure caused by multiple factors is sythetically analyzed. Analysis results show that there many factors caused four tubular failure. There is a single factor caused four tubular failure too. More as a result of a variety of pipe failure, we should make a comprehensive analysis .

The purpose of failure analysis is to find out the cause of failure, and to propose the corresponding measures to prevent the recurrence of similar failures. In this paper, we

synthetically analyzed the four tubular failure and then give the treatment advice, in order to effectively deal with the recurrence of the failure. Finally, this paper argue to prevent occurrence of four tubular failure from the whole process of quality control of the design, manufacture, installation, use, repair and transformation etc; only guarding a pass in all aspects and drawing lessons from the failure case, can effectively reduce the currence of the four tubular failure.

Key words : Power station boiler; Four tube; Failure analysis.

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

摘要	IV
第一章 绪论	1
1.1 电站锅炉发展概况	1
1.2 四小管常用材质及发展	3
1.3 四小管失效研究现状	6
1.4 本文研究内容	9
第二章 四小管的失效形式研究	11
2.1 过热爆管	11
2.2 腐蚀	13
2.3 疲劳	16
2.4 磨损	16
2.5 管材原始缺陷	17
2.6 设计、安装、运行不当	17
第三章 四小管失效分析程序及方法	21
3.1 现场保护与记录	21
3.2 收集技术资料	22
3.3 检查与分析	22
3.4 综合分析	24
3.5 提出建议与反措	24
第四章 四小管失效分析	25
4.1 锅炉省煤器管爆管失效分析	25
4.2 锅炉水冷壁管爆管失效分析	27
4.3 锅炉过热器管爆管失效分析	52
4.4 锅炉再热器管泄漏失效分析	62
4.5 小结	72
第五章 结论	73
参考文献	75
发表论文和参加科研情况	77

致 谢..... 79

厦门大学博硕士论文摘要库

Table of Contents

Table of Contents

Abstract.....	IV
The first chapter Introduction.....	1
1.1 Development status of power plant boiler	1
1.2 Four tube commonly used material and development.....	3
1.3 Four tube failure research status	6
1.4 Research content of this paper.....	9
The second chapter Study on the failure mode of the four tubules.....	11
2.1 Overheating tube	11
2.2 Corrosion	13
2.3 Fatigue	16
2.4 Wear.....	16
2.5 Original defects of the tube.....	17
2.6 Improper design, installation and operation	17
The third chapter Four tube failure analysis procedures and methods.....	21
3.1 Field protection and record	21
3.2 Collect technical information.....	22
3.3 Check and analysis	22
3.4 synthetical analysis	24
3.5 Suggestions and counter measures are put forward	24
The fourth chapter Four tube failure analysis.....	25
4.1 Blast tube failure analysis of the boiler economizer tube.....	25
4.2 Burst tube failure analysis of the boiler water walls tube.....	27
4.3 blast tube failure analysis of the boiler superheater tube	52
4.4 leakage failure analysis of the boiler reheater tube.....	62
4.5 summary	72
The fifth chapter Conclusion	73
Reference	75
Published papers and take part in scientific research	77
Thanks.....	79

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 电站锅炉发展概况

1750年前,在英国燃煤开采采用的蒸汽机,以及瓦特的最初蒸汽机在内,其工质压力均等于大气压力。1750年后开始使用工质压力高于大气压力。1800年后,推动蒸汽机工质压力提高到约0.8MPa。生产蒸汽机工质最早的蒸汽锅炉是一个装水的大圆柱体形立式锅壳锅炉,发展到后来改为卧式锅壳锅炉,锅壳下侧采用砌砖炉体,燃料并在里面燃烧。随着锅炉容量越来越大,为增加锅炉受热面积,采用锅壳中加装火筒,发展成单火筒锅炉或康尼许式锅炉,后由单火筒增加到两个火筒,成为双火筒锅炉或兰开夏锅炉。1830年前后,优质钢管使用和胀管技术被掌握后出现火管锅炉。火管布置在锅壳中,发展成卧式外燃回火管锅炉,其金属耗量较低,但砌体较大。1850年后,出现了水管锅炉,其受热面是锅壳外的水管,代替了锅壳本身和锅壳内的火筒、火管^[1]。

1900年后,汽轮机逐步发展,要求配套锅炉的容量、蒸汽温度和压力较高。直水管锅炉已不能满足使用要求。随着锅炉制造工艺和化水处理技术的发展,出现了弯水管式锅炉。最初采用多锅筒式结构。省煤器、水冷壁和过热器使用,锅筒内部汽水分离装置各分离元件的改进,单台锅炉锅筒数量减少,节约金属使用,有利于提高锅炉的容量、压力、温度和锅炉效率。

上述中火筒锅炉、火管锅炉和水管锅炉都是水循环为自然循环锅炉,水和蒸汽在上升管路、下降管路中因炉内外受热情况不同,使得上升管路中汽水混合物的密度小于下降管路中水的密度,该密度差推动水汽由下降管路向上升管路自然流动。在自然循环锅炉发展同时,上世纪30年代苏联和德国开始使用直流锅炉,并在40年代开始美国研制出多次强制循环锅炉。在直流锅炉中不设置锅筒,锅炉给水由给水泵送入省煤器,经水冷壁和过热器等受热面,生产出一定参数过热蒸汽送往汽轮机,各受热面系统流动阻力全由给水泵来克服。1945年以后,自然循环锅炉和直流锅炉得到快速发展,因为当时汽轮发电机组要求高参数和大容量。发展这两种型式锅炉的目的是缩小或不用锅筒,而采用小径管作为受热面,炉内比较自由地布置受热面。随着自动控制系统和水处理技术的不断进步,并逐渐成熟。上世纪80年代,世界上最大的多次强制循环锅炉可配套1000MW汽轮发电机组,同时,西欧开发出低循环倍率强制循环锅炉最大单台可配套600MW汽轮发电机组,在当时世界上最大容量单台锅炉为直流锅炉,与1300MW汽轮发电机组匹配。1972年,美国1300MW机组配套的4400t/h超临界锅炉投运^[2];1974年,日本1000MW机组配套的3180t/h超临

界锅炉投运^[3]；1981年，前苏联1200MW机组配套的超临界直流锅炉投运。超超临界机组发展至今已经有50多年的历史。1957年，世界上第一台超超临界机组在美国俄亥俄州投运，容量为125MW^[4]；1998年，丹麦Nordjyllands电厂投运400MW超超临界机组，压力接近30MPa，发电效率高达47%，创世界新纪录^[5]。

中国的锅炉工业起步较晚，其发展大致可分为四个阶段。第一阶段是上世纪50年代，当时新中国成立后的第一个五年计划期间，建立了上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂。随后又建立了武汉、北京及东方锅炉厂^[6]。产品主要是仿制苏联产品生产35t/h~130t/h容量的中压锅炉与230t/h的高压锅炉。1955年，我国第一台高温高压火力发电机组——黑龙江省富拉尔基热电厂1号机组开始运行，其锅炉蒸发量为170t/h^[7]。1958年，哈尔滨锅炉厂研制出230t/h的高压锅炉。第二阶段是上世纪60~70年代，在学习前苏联电站锅炉的设计制造技术基础上，自主研发能适应不同燃料的220t/h高压锅炉、410t/h高压锅炉和670t/h超高压锅炉。第三阶段是上世纪80年代初引进美国凯尔护驾投资集团有限公司的600MW、300MW亚临界控制循环锅炉的设计制造技术，并自主开发300MW亚临界自然循环锅炉。80年代末，我国自行研制出1000t/h垂直上升管亚临界压力直流锅炉^[8]。第四阶段是上世纪90年代至今，我国引进超临界、超超临界锅炉技术，消化吸收后自我设计和制造，并开始赶超和领先世界。1992年，我国当时最大的2台从美国和瑞士引进的600MW超临界机组在上海石洞口二厂投运^[9]。2004年，由东方锅炉制造的600MW超临界锅炉，在华能沁北电厂投运，顺利通过168小时的试运行，弥补了该参数锅炉的国产化空白^[10]。2006年，哈尔滨锅炉厂制造的国产首台1000MW超超临界锅炉在华能玉环电厂投运。2007年，哈尔滨锅炉厂制造的国产首台600MW超超临界锅炉在华能营口电厂投产，是在国产首台1000MW超超临界机组顺利投运之后在技术上的又一重大突破^[11、12]。2013年，我国自主研发、具有完全自主知识产权的世界首创单机容量最大的600MW超临界循环流化床示范机组在四川白马循环流化床示范电站投入商业运行^[13]。目前我国现有的机组以600MW及1000MW超临界及超超临界机组为主，其中1000MW超超临界投运机组已超过100台。

在锅炉的发展过程中，推动锅炉技术发展的主要因素有四个方面：一是提供蒸汽动力的锅炉仍是世界上主要的能源提供主力；二是燃料价格上涨；三是环境保护；四是材料等基础科学的发展^[6]。为了提高电厂发电效率，电站锅炉向大容量、高参数、高自动化快速发展。

为了发展高效、低污染单机容量锅炉，世界各国纷纷开展了700℃超超临界火电机组锅炉的研发。欧洲于1998年1月启动“AD700”计划，目标是建立37.5MPa/705℃/700℃

示范电站，机组热效率超过 50%。美国的目标是开发 37.9MPa/732℃/760℃机组，热效率超过 50%。日本于 2008 年 8 月启动 A-USC（先进的超超临界压力发电）项目，35MPa/700℃/720℃，热效率 48~50%^[14~16]。我国于 2010 年 7 月，由国家能源局组织成立了“国家 700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟”，并于 2011 年 6 月正式启动了 700℃等级的先进超超临界(A-USC)发电技术研发计划^[17]。

1.2 四小管常用材质及发展

随着锅炉参数不断向高参数发展，对锅炉受热面管所用材质也提出了更高的要求。锅炉受热面管包括省煤器、水冷壁、过热器和再热器，简称“四小管”。锅炉四小管是在高温、高应力及腐蚀介质的共同作用下长期工作的。受热管在高温状态下，外壁受烟气作用，内壁受水或蒸汽的作用，这些工质不仅会对管壁造成一定的压力，而且还有一定的腐蚀作用。高温、高应力、腐蚀介质的长期作用，对管子的组织和性能要求较高，其具体要求如下^[5]：

(1) 较高的高温持久强度。对于过热器、再热器、水冷壁而言，其材料都必须具有最苛刻条件下工质参数相适应的高温持久强度。

(2) 耐高温腐蚀。水冷壁、过热器、再热器管子外侧烟气高温腐蚀是影响其寿命的一个重要因素。若金属壁温提高，则烟气侧腐蚀速度会明显加快。因此，所用材料必须具有耐高温腐蚀性，尤其超（超）临界机组，在腐蚀问题方面更加突出。

(3) 蒸汽侧较高的抗氧化性能。运行温度提高，加剧过热器、再热器管子内表面氧化，会导致三种恶果：①氧化层热阻增大引起管壁超温；②氧化层的剥落被冲积在弯头等部位导致管子堵塞引起超温而爆管以及导致阀门泄漏；③剥落的氧化层碎粒对汽轮机前级叶片的冲蚀。因此，在过热器、再热器等材料的选择中，应充分考虑到抗蒸汽氧化及氧化层剥落的性能，尤其再热器，因为再热器内蒸汽压力较低，换热条件较差。

由于锅炉四小管要求较严格，国家规范^[18]明确要求锅炉受压元件金属材料及其焊接材料应符合相应国家标准和行业标准的要求，在使用条件下应具有足够的强度、塑性、韧性以及良好的抗疲劳性能和抗腐蚀性能。电力行业还制定了相应的材料选用导则和金属监督^[19、20]。这里主要结合目前锅炉用材及发展趋势，介绍锅炉受热面常用材料及部分新型材料^[5、17、21]。

1.2.1 碳钢

电站锅炉四小管常用的碳钢管有 20、20G、德国的 St45.8 钢、SA106、SA-210C 等，其含碳量在 0.1%~0.2%之间，以正火状态供应，其组织为铁素体和珠光体。碳钢管在高温

长期运行时金属组织会产生珠光体球化，在 460℃ 以上长期运行还会产生石墨化，因此，锅炉相关材料标准及规范要求四小管在设计选用时使用温度限定在 460℃ 以内，见表 1.1。电力行业还专门对 20 钢珠光体球化评级和碳钢石墨化评级标准做了规定^[22、23]。

1.2.2 低合金耐热钢 ($Cr \leq 3\%$, $Mo \leq 1\%$)

低合金钢在火力发电厂大型电站锅炉中作为受压部件得到广泛应用，比如水冷壁、过热器、再热器低温管段、部分连接管道、集箱等。同是也大量使用在生产企业自备电厂、热电联产、余热锅炉等高压、中压参数电站锅炉受压部件，比如高温过热器、高温集箱、连接管道及主蒸汽管道等，其关键性能要求如下：

- (1) 在 450℃ 以下具有良好的抗拉强度 (120MPa)；
- (2) 550℃ 以下持久强度；
- (3) 具有优良焊接性能，无需焊后进行热处理；
- (4) 良好的抗高温蒸汽氧化性能；
- (5) 可以通过管子外表面喷涂或堆焊获得很好抗高温烟气腐蚀的性能。

这类钢主要包括 12CrMo、15CrMo、12Cr1MoV、15Cr1Mo1V、10CrMo910、T12、T2、T22、T23、T24 等。

一直以来，低合金耐热钢中 15CrMo、T22 以及 12Cr1MoV 等为主要锅炉材料。随后住友金属公司开发出 T/P23，通过在 T/P22 化学成分中用 W 取代部分 Mo 并添加 V、Nb 元素提高金属材料蠕变强度，降低 C 含量以便改善焊接性能，加入微量 B 用来提高淬透性以获得完全的贝氏体金属组织。同时，欧洲开发了 T/P24 材料，通过 V、Ti、B 的多元微量合金化来提高金属材料蠕变性能。T23 在 550℃ 时许用应力接近 T91，在 600℃ 下蠕变强度比 T22 高 93%，而 T24 的高温强度比 T23 还要略高。这两种低合金耐热钢具有非常好的焊接性能，焊后无需热处理就可以把焊接接头硬度值控制在 350~360HV10 以内。因此，非常适合作为超超临界机组的水冷壁材料。

1.2.3 马氏体耐热钢 (9%~12%Cr 系列)

9%~12%Cr 马氏体耐热钢是大型火力发电厂重要高温部件选用材料，主要包括锅炉过热器、再热器、高温联箱和锅炉范围内管道等，这类钢主要有：T/P91、T/P92、E911、T/P122 等。

锅炉用 9%~12%Cr 钢，主要性能要求：蠕变强度和运行温度下的组织稳定性、高的 A_{c1} 温度、良好的焊接性能和低的 IV 型裂纹敏感性、抗蒸汽氧化能力、疲劳性能等。T/P91 钢是美国在 20 世纪 80 年代开发出来的一种综合性能优异的 9%Cr 钢，在我国的亚临界和超

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.