

电站锅炉压力容器 事故案例分析与预防

DIANZHAN GUOLU YALI RONGQI SHIGU
ANLI FENXI YU YUFANG

主 编 孟祥泽 韩建慧
副主编 鲁忠科 韩 勇



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电站锅炉压力容器 事故案例分析与预防

主 编 孟祥泽 韩建慧

副主编 鲁忠科 韩 勇



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书收集了近年来电站锅炉压力容器的典型事故案例,编者结合实际情况对事故案例进行了深入细致的分析,查找了原因,并有针对性地提出了纠正和预防措施。本书共分四章,分别阐述了锅炉压力容器事故概述、锅炉常见事故原因分析与预防、压力容器与压力管道常见事故原因分析与预防等,同时还选编了电站锅炉压力容器方面的常用法规、标准。另外,在附录中还收录了锅炉压力容器事故应急措施和救援预案以及锅炉事故处理规程等。

本书可供从事电站锅炉压力容器安全监督管理、运行、检修的技术人员和操作人员阅读、使用,也可作为电站锅炉压力容器作业人员的安全警示教育和上岗前的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电站锅炉压力容器事故案例分析与预防/孟祥泽,韩建慧主编. —北京:中国水利水电出版社,2007

ISBN 978-7-5084-4345-4

I. 电… II. ①孟…②韩… III. ①火电厂—锅炉—压力容器—事故分析②火电厂—锅炉—压力容器—事故—预防 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 163942 号

书 名	电站锅炉压力容器事故案例分析与预防
作 者	主编 孟祥泽 韩建慧 副主编 鲁忠科 韩勇
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 13.5 印张 320 千字
版 次	2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

锅炉压力容器作为火力发电厂的主要设备，也是发电厂安全监察的重要设备。由于锅炉压力容器是具有爆炸危险的设备，世界各国都十分重视它的安全问题，设立国家监督机构或授权技术权威机构，实行强制性安全管理。

作者从事电站锅炉压力容器安全监督工作多年，综合分析全国大型锅炉压力容器故障停用的原因，可以明显地发现，必须从设计标准、设计选型、制造安装、运行调试的全过程作努力，才能最有效地防止事故的发生。作为发电厂必须搞好检查、修理，认真整治设备，严格各项规章制度的贯彻执行，才能真正提高设备的可靠性。事故处理必须以事实为依据，以规程、制度为标准确定是非与责任，调查分析事故，从而推动规章制度不断完善、设备整治工作和人员素质的不断提高，才能最终达到防止事故重复发生的目的。

本书共分四章，分别阐述了锅炉压力容器事故概述、锅炉常见事故原因分析与预防、压力容器与压力管道常见事故原因分析与预防等。同时还选编了电站锅炉压力容器方面的常用法规、标准锅炉压力容器事故应急措施和救援预案以及锅炉事故处理规程，供读者参考使用。

本书由孟祥泽、韩建慧任主编，鲁忠科、韩勇任副主编，何德喜、鲁玺梦、房秀玲、鲍晓玲、杨晓伟、胡代军、盖述裕、邓战平、王正志、李临波、刘恩江、李培文等同志也参加了部分章节的编写工作，由孟祥泽、韩建慧、鲁忠科、韩勇统稿并定稿。在本书编写过程中曾参考了不少电站锅炉压力容器方面的有关书籍和文章，此外还得到了山东电力特种设备安全监督委员会、山东电力建设第一工程公司和中国水利水电出版社的大力支持，在此一并表示感谢。

限于作者水平，对所收集的事故案例分析得不一定全面、准确，所提供的预防措施也不一定完善，恳请广大读者批评指正。

作者

2007年1月

目 录

前言

第一章 锅炉压力容器事故概述	1
第一节 锅炉压力容器事故发生的类型	1
第二节 锅炉压力容器发生事故的现状及深层次原因分析	1
第三节 锅炉压力容器事故的分析方法	2
第四节 锅炉压力容器事故是完全可以预防的	10
第二章 锅炉常见事故原因分析与预防	12
第一节 受压元件的破坏形式	12
第二节 锅炉承压部件爆漏事故原因及预防	14
第三节 锅炉尾部再燃烧原因及预防	42
第四节 锅炉炉膛爆炸事故原因及预防	43
第五节 制粉系统爆炸原因及预防	50
第六节 锅炉汽包缺水原因及预防	52
第七节 锅炉承重部件损坏原因及预防	58
第八节 锅炉受热面腐蚀的原因及预防	59
第九节 制造、基建及调试阶段发生的事故原因与预防	61
第三章 压力容器与压力管道常见事故原因分析与预防	72
第一节 压力容器爆炸事故原因及预防	72
第二节 压力管道常见事故原因分析与预防	78
第三节 安全门事故原因分析与预防	87
第四章 常用法规、标准	89
1 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求 (节选) (国家电力公司国电发 [2000] 589 号)	89
2 电力工业锅炉压力容器监察规程 (DL612—1996)	97
3 电站锅炉压力容器检验规程 (节选) (DL647—2004)	128
4 电力工业技术监督工作规定 (电力工业部电安生 [1996] 430 号)	159
附录	164
附录 1 锅炉压力容器事故应急措施和救援预案	164
附录 2 锅炉事故处理规程	166
附录 3 某发电厂锅炉压力容器管理办法	182
附录 4 锅炉压力容器安全阀应该注意的问题	196
附录 5 某电厂防磨防爆管理办法	201
参考文献	210

第一章 锅炉压力容器事故概述

第一节 锅炉压力容器事故发生的类型

锅炉压力容器压力管道是特种设备的重要组成部分，国家对其设计、制造、安装、改造、维修、检验、使用进行全过程的安全监察。电站锅炉和热力系统压力容器及管道，是火力发电厂中不可缺少的设备，这些设备或其某一部件的损坏都可能导致灾难性的后果。从常见的锅炉压力容器压力管道事故情况分析，大致可分为以下几类。

- (1) 锅炉承压部件爆漏事故。
 - 1) 超压超温。
 - 2) 设备大面积腐蚀。
 - 3) 炉外管道爆破。
 - 4) 锅炉四管漏泄。
- (2) 锅炉尾部再次燃烧事故。
- (3) 锅炉炉膛爆炸事故。
- (4) 锅炉汽包满水和缺水事故。
- (5) 制粉系统爆炸和煤尘爆炸事故。
- (6) 压力容器爆破事故。
- (7) 压力管道漏泄。

第二节 锅炉压力容器发生事故的现状及深层次原因分析

自从1982年国务院颁布《锅炉压力容器安全监察暂行条例》实施后，电力行业恢复了部、局、厂（火电安装公司）三级锅炉压力容器安全监察体系，加强了电力锅炉压力容器的安全监督管理工作，先后两次修订了电力工业锅炉压力容器监察规程，并颁布了《电站锅炉压力容器检验规程》和《电力锅炉压力容器安全监察规定》，各省成立了电力工业锅炉压力容器检验中心，承担起了电力系统锅炉压力容器的定期检验和安装质量监督检验任务，使电力系统的锅炉压力容器安全管理工作逐步进入了制度化、规范化管理的轨道。全国电力系统锅炉压力容器的安全形势逐年好转，目前达到了新中国成立以来的最高水平。但地方管理的电站锅炉压力容器安全事故发生频率仍然较高。

综合分析我国现阶段发生锅炉压力容器事故的深层次原因主要有：

- (1) 锅炉压力容器的使用单位的领导对锅炉压力容器安全使用的重视程度不够是根本

的原因。例如：人员培训跟不上，操作人员素质差，注重效益而忽视安全，设备带“病”运行得不到解决等，造成锅炉压力容器的事故发生。

(2) 锅炉压力容器技术管理人员、操作人员和安装、改造维修人员及检验人员的综合素质差是锅炉压力容器发生事故的主要原因。

事故统计分析表明使用阶段的管理问题是主要原因，安装、设计、制造问题是次要的原因。因此要加强对锅炉压力容器技术管理人员、操作人员和安装、改造维修人员及检验人员的技术培训工作，提高其业务素质，加强安全管理工作，才能杜绝和减少事故的发生。

(3) 设计、制造、安装缺陷也是发生事故的原因之一。例如设计选用的材质不良、结构不良；设计、制造、安装过程质量保证体系运转不良；制造、安装过程中错用材质、焊接工艺、制造安装误差过大等，势必产生先天性的缺陷。

以上是产生锅炉压力容器事故的主要原因，实际上引起锅炉压力容器事故的原因是多方面的，例如：汽水品质、燃烧问题等都可能引起锅炉压力容器事故。

第三节 锅炉压力容器事故的分析方法

一、事故调查的组织

特别重大事故指造成死亡 30 人（含 30 人）以上，或者受伤（包括急性中毒，下同）100 人（含 100 人）以上，或者直接经济损失 1000 万元（含 1000 万元以上的设备事故）按照国务院的规定，由国务院或者国务院授权的部门组织特别重大事故调查组，国家质检总局参加。

特大事故是指造成死亡 10~29 人，或者受伤 50~99 人，或者直接经济损失 500 万元（含 500 万元）以上 1000 万元以下的设备事故，由国家质检总局，会同事故发生地的省级政府及有关部门组成特大事故调查组，省级质量技术监督行政部门参加。

重大事故指造成死亡 3~9 人，或者受伤 20~49 人，或者直接经济损失 100 万元（含 100 万元）以上 500 万元以下的设备事故，由省级质量技术监督行政部门会同事故发生地的市（地、州）级人民政府及有关部门组成事故调查组，市（地、州）质量技术监督行政部门参加。

严重事故指造成死亡 1~2 人，或者受伤 19 人（含 19 人）以下，或者直接经济损失 50 万元（含 50 万元）以上 100 万元以下以及无人员伤亡的设备爆炸事故，由市（地、州）质量技术监督部门会同事故发生地的县（市、区）人民政府及有关部门组织成立事故调查组，县（市、区）级质量技术监督行政部门参加。

一般事故指无人员伤亡，设备损坏不能正常运行，且直接经济损失 50 万元以下设备事故由事故发生单位组织成立事故调查组。

上一级质量技术监督行政部门认为有必要时，可以会同有关部门直接组织成立事故调查组。

二、事故调查一般程序

事故调查组成立后一般应遵循如下程序进行调查。

(1) 保护事故现场。

(2) 收集原始资料。发生事故后,除了对事故现场进行检查、照相,录像,绘图记录,保存必要的物证和痕迹见证外,还要收集事故有关的各种记录。

(3) 调查事故过程情况。按照事故调查规程的要求对事故有关的人员、事故发生的时间、地点、气象情况和事故前后设备与系统的运行情况,事故经过,与设备事故有关的仪表、自动设备、保护的记录和动作情况,与事故有关的安全管理、设备档案等情况进行调查了解。

(4) 分析原因责任。

(5) 提出防范措施。

(6) 提出对责任人员的处理意见。

(7) 写出调查报告。事故调查完毕后应当写出调查报告书,报送组织调查的单位,由事故调查组织单位进行归档结案。

三、事故调查的具体项目和内容

锅炉压力容器热力管道事故的调查应当有个提纲,这个调查提纲在调查中可以不断调整。事故调查提纲的具体项目和内容如下。

(一) 调查内容

1. 现场调查内容

(1) 故障发生的时间与部位,故障经过。

(2) 爆口、破碎后与主体的相对位置与尺寸。

(3) 本体的损坏、变形情况与周围设备的损伤情况。

(4) 目击者证词。

(5) 运行人员对运行工况的口述记录。

(6) 仪表、阀门、自动装置、保护装置、闭锁装置所处的状态与事故过程中的变化,特别是安全门的状态和动作情况。

(7) 自动记录,运行记录及事故追忆装置记录。

2. 故障部件的背景材料的收集

(1) 制造安装单位的证明文件。

(2) 设备的检修和检验记录。

(3) 设备技术登录簿的登录。

(4) 设备运行历史档案,包括有关的试验报告。

(5) 设计图纸及设计变更资料。

(6) 质量检验报告。

(7) 控制、保护装置的功能与定值。

(8) 使用说明与现场运行规程。

(二) 观察、检查项目

(1) 损坏部件的目测检验。

(2) 针对设计图纸校对尺寸。

(3) 断口宏观与扫描电镜检查。

(4) 断口附近及非损坏区金相检查。

(三) 测试

(1) 无损探伤。

(2) 化学成分分析 (常规方法与局部成分分析)。

(3) 机械性能测试包括硬度测量。

(4) 断裂韧性测试。

(5) 应力—强度寿命分析。

(四) 试验或模拟试验

(1) 设备运行工况下部件工作状态的测试。

(2) 故障机理的确定。

(3) 在试验室按所确定的机理进行部件的模拟试验。

四、事故 (故障) 分析的原则方法

事故发生后,在事故调查人员面前往往有大量的、杂乱无章的资料,甚至相互矛盾的情况反映。要分析出事故发生的原因必须掌握科学的思想方法与工作方法,从而保证故障分析严密、高效、正确无误。一般讲应遵循以下原则。

(一) 整体观念或称全过程原则

设备在使用中发生损坏,其每一部件都牵涉到设计、制造、安装、检修与使用各阶段,故障分析切忌孤立地对待个别部件、个别环节,否则问题往往得不到解决。例如德国产的某高压锅炉省煤器吊管爆破,金相检验认为系材料超温过热所致,但锅炉运行中壁温实测及启动中烟温测量表明,该部分受热面不致发生超温过热,过热原因不能被证实。后来查明该省煤器在启动阶段有可能产生蒸汽,形成汽塞,随锅炉升负荷烟温升高而汽塞没有消失时,省煤器吊管便发生过热爆管。

(二) 以规程为依据的原则

设备在设计时都有一定的安全系数,安装和制造工艺总会发生各方面的误差,运行中各参数也难免产生偏差,三种因素的不良组合常常是事故的原因,事故分析时必须以规程为依据来判别是非。例如炉膛结焦,它牵涉到煤种、运行方式与燃烧设备的结构诸多因素。煤种在设计变化范围内,按设计规定的运行方式运行而发生结焦宜检查燃烧设备的问题;若燃用超过设计范围的低灰熔点煤种而结焦,追究设计责任一般是不合理的。虽然解决炉膛结焦问题存在改变煤种、改变燃烧设备结构或者改善运行等多种选择,但问题的性质还是应以规程、标准或设计说明为依据。

(三) 从现象到本质的原则

现象只是分析问题的入门向导,透过表面现象找到问题的本质后才能真正解决问题。例如焊口泄漏常常归结为焊接质量,甚至直接归罪于焊工水平,但问题往往难以解决。须知焊口泄漏,焊接缺陷的产生又可能与外力、坡口形式、焊接材料、热处理工艺、焊接工艺参数、焊工技术水平等因素有关,简单地归结为焊工素质不一定解决问题。某厂屏式过热器管座角焊缝泄漏,从焊接接头断口的宏观检查看,焊接质量确实存在一定缺陷,于是将故障原因归结为焊接质量不良,并决定全部管座重新施焊,可事后又连续发生管座焊口泄漏。最后查明是:该屏式过热器采用振动吹灰器,管屏上部为联箱所固定、中部为固结

棍所固定。因此，在管屏对接时不可避免地存在焊接残余应力，运行中同一管屏各管壁温不可避免地存在温差，实质上是相对膨胀不畅，导致了焊口泄漏。取消固结棍后，该焊口泄漏问题得到了解决。

（四）数量分析的原则

要正确判断故障的原因必须作数量分析，锅炉管道常见缺陷是重皮、划痕，这些缺陷的确不符合锅炉钢管技术条件。但仅仅这些缺陷是否必然引起爆管呢？还要作数量分析。某厂车间屋顶塌落正值冬季，屋面积冰较多，荷重超过了设计规定。但计算结果表明实际负载还不足以导致屋面塌落。进一步调查发现屋架施工不良，在构架上随意切割而未补强使屋架刚度下降。通过计算查明了冰雪超载和施工不良是导致事故的双重原因，因此有针对性地采取两方面的措施，确保了安全。

判别事故原因的具体方法常有：

（1）系统分析方法。该方法要求从总体上考虑事故是否与设计、制造、安装、使用、维护、修理各个环节以及各个环节涉及的材质、工艺、环境等因素有关，并据此深入调查测试（包括模拟或故障的再现试验），寻找事故的具体原因。应尽可能设想设备发生故障的所有因素，根据调查资料、检验结果，采取“消去法”把与事故无关的因素逐个排除，剩余问题细致研究，最终确定故障原因。

（2）比较方法。选择一个没有发生事故而与事故系统类似的系统，一一对比，找出其中差异，发生事故原因。

（3）历史对比方法。根据同样设备、同样使用条件、过去的故障资料 and 变化规律，运用归纳法和演绎法推断故障原因。

（4）反推法。根据设备损坏状况，主要是爆口、断口断裂机理的分析结果，确定事故的起因，并借此推断事故原因。这是经常用的方法。

能否熟练地掌握和运用以上原则与方法，决定着事故分析的速度和结论的正确与否。掌握好这些方法可以防止主观片面，在判断上实事求是，不搞无根据的推论，保证分析结论的正确无误。

图1-1是焊接压力容器破裂事故原因分析图，采用系统分析方法分析事故原因，可供参考。采用系统分析法需要确立全面完整的分析图，否则容易片面。常用的方法是现场调查资料，测试检查结果，理论分析三对照，必要时辅以模拟试验（包括故障再现性试验）以最终确立事故的原因。

五、事故调查常用的检验（测）方法

简单的事故也许通过现场调查分析即可得出结论，而大量事故的情况往往是复杂的，需要对损坏的设备部件、附件进行技术检验、检测和试验才能发现或验证设备部件失效的原因。尽管各种检验、检测试验方法可能需要专门的技术人员去做，作为锅监工程师、检验员应当了解事故调查需要的基本检验、检测和试验方法，熟悉各种方法的适用性，以便科学地进行调查分析。下面对经常用的几种方法做简单的介绍。

（一）直观检查

直观检查主要是凭借检查人员的感官对设备部件的内外表面情况进行观测检查，看是否存在缺陷。由于肉眼有特别大的景深又可以迅速检验较大的面积，对色泽、断裂纹理的

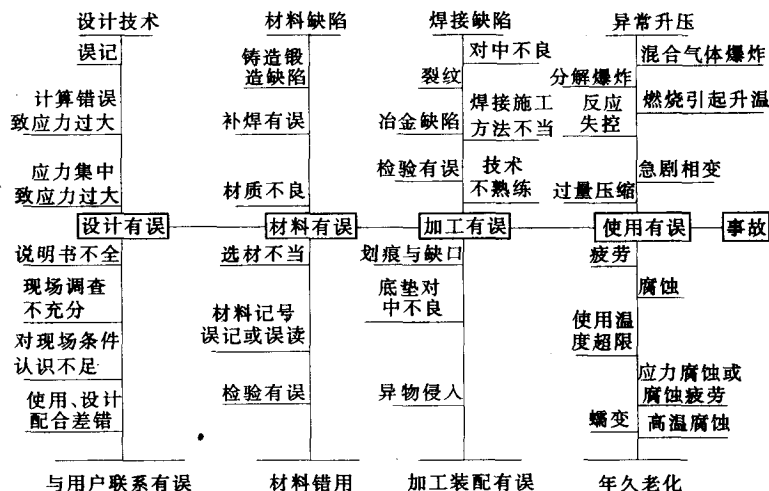


图 1-1 焊接压力容器破裂事故原因分析图

走向和改变有十分敏锐的分辨率。因此直观检查可以较方便地发现表面的腐蚀坑或斑点、磨损深沟、凹陷、鼓包和金属表面的明显折叠、裂纹。

管道内表可借助于窥视镜或内壁反光仪等。对肉眼检查有怀疑时可用放大镜作进一步观察。锤击检查也是直观检查的方法之一。

对断口的肉眼检查，可大致确定部件损坏的性质种类：韧性、脆性、疲劳、腐蚀、磨损和蠕变。观察断口纹理的变化可以确定断裂源，断裂时的加载方式是拉裂、撕裂、压裂、扭断还是弯裂等，并可判断应力级别的相对大小。

直观检查方法比较简单，其效果在很大程度上决定于检查人员的经验和素质。对检查情况应尽量详细地做好记录，最好采用摄影、录像等手段。

（二）低倍酸蚀检验

低倍酸蚀检验是指对故障部件表面进行加工、酸浸后，用显微镜作低倍数放大后观察，其特点是设备及操作简易，可在较大面积上发现与判别钢的低倍组织缺陷。

低倍酸蚀检验可得到以下信息：

- （1）钢材内部质量，发现偏折、疏松、夹杂、气孔等缺陷。
- （2）发现铸、锻件表面缺陷，如夹砂、斑疤、折叠等。
- （3）内裂纹，如白点（或称发裂）、发纹、过烧等。
- （4）焊接质量。
- （5）可以发现研磨擦伤部位。
- （6）可以区别钢材软硬不同部位所在。

（三）显微断口检验

显微断口检验是指利用光学显微镜、透射电子显微镜、扫描电子显微镜（目前显微镜断口分析主要用扫描电镜进行分析，即电子断口分析。）对断口的形态特征、形成机制和影响因素进行分析的方法。

电子断口分析除了作定性分析（如断裂方式，断裂机理）外，还能作断裂方面的定量工作。如韧性程序的判别、裂纹扩展的速度以及断裂历程的定量描述。

塑性材料的显微断裂特征——塑坑是判别受力方向的依据。如果无方向性的等轴塑坑是受单轴拉伸，主力方向垂直于断口的结果；如果是鱼鳞状的拉长塑坑，不是塑坑就是切变断裂。前者断口两面塑坑方向相同，后者塑坑方向相反。脆性断裂的电子断口相为穿晶解理的河流花样，沿晶的表现为冰糖花样。应力腐蚀开裂电子断口相有扇形或羽毛形花样，而氢脆断裂在电镜下观察多有鸡爪形的撕裂棱，或有细的凹坑，这两种是应力腐蚀开裂所没有的。

一般地，不同机制引起的断裂，其断口形态也是不同的，由于材料化学成分、热处理状态或介质的区别，相同断裂机制其显微形态也可能不尽相同，表 1-1 可供故障分析时参考。

表 1-1 金属以不同机制断裂时可能具有的显微断口形貌

断口形貌 机制	穿 晶 断 口					沿 晶 断 口		
	塑坑	解理	准解理	平行条纹	其他	塑性	脆性	其他
过 载	✓	✓	✓	△		✓	✓	
应力腐蚀	×	×		△	✓	×	✓	
高周疲劳	×	×	×	✓	✓	×	×	
低周疲劳	△	×	×	△	✓	×	×	✓
腐蚀疲劳	×	×	×	✓	✓	×	×	✓
氢 脆	✓		✓	△		×	✓	
高温蠕变	✓	×				✓	×	

注 ✓表示可能出现；×表示不大可能出现；△表示偶尔出现；空白表示不肯定。

（四）金相检验

金相检验包括光学显微镜或扫描电镜观察金相试样，也包括就地无损金相检验。由于加工工艺（热处理、焊接及铸造）、材质缺陷（夹渣、偏析、白点等）和环境介质等因素造成的损坏，均可通过金相检验判别损坏原因。

显微组织检验的内容主要有晶粒的大小、组织形态、晶界的变化、夹杂物、疏松、裂纹、脱碳等缺陷。特别应注意晶界的检验，是否有析出相、腐蚀及变化、微孔等现象发生。

当检查裂纹时，往往能从裂纹尖端的试样得到有价值的情报。由于它受环境介质的影响较小，容易判别裂纹的扩展路径的方式为穿晶型或沿晶型。

通过裂纹两侧氧化和脱碳情况的检查，可以判别表面裂纹产生于热处理前、热处理中还是在热处理后，是判别制造裂纹还是运行裂纹的重要依据。在分析电站锅炉受热面爆破原因时，取向火侧、背火侧（或远离爆口部位）试样作金相对比检验可以确定是材料局部缺陷（碳化物成片状），还是过热（碳化物球化）或两者都有问题。

金相检验用于事故分析，可提供有用的结论。对于分析疲劳或应力腐蚀损伤裂纹长度

和宽度的测量有利于判别故障原因。一般情况下应力腐蚀开裂的裂纹长度比开口宽度大几个数量级,成为判断应力腐蚀的一个主要判据。

通过金相检验可以判断焊接接头,热弯弯头在制造时所作的热处理工艺是否合适;分析裂纹不同深度的金相图可以找到与事故有关的重要线索。有些管材(如 13CrMo44, 14MoV63, 10CrMo910, X20CrMo121)高温下持久断裂时的变形很少,不易觉察其胀粗,观察其金相组织的变化有利于判断其剩余寿命。

(五) 超声波检验

超声波探伤通过探伤仪示波屏上显示的缺陷界面反射信号,判断缺陷所在的位置、数量、大小及性质。主要用于发现材料内部及管子、联箱内表面的裂纹,焊缝底部的未焊透、未熔合以及气孔、夹杂等宏观缺陷。

由于材料表面粗糙度及材料本身的不均匀性所引起的杂波,超声波探伤的灵敏度有一定的限度,小于 0.5mm 的缺陷,往往难以发现。过去的超声波检验不给出可供客观评议的文件资料,发现缺陷的能力与探测者水平有关。对几何形状复杂的部件,如异形体、阀门等其检验判断结论的正确性更取决于检验者的技能和经验。

超声波探伤法可以找到部件内壁的缺陷。超声波仪也可用于壁厚测量。

制造厂对无缝钢管所进行的超声波自动检验流水线,只能检验出纵向缺陷,其他方向(横向和平行于管表方向)的缺陷还不能发现。对于仪器灵敏度以内的缺陷也不易发现。

(六) 射线检验

射线检验发现缺陷的能力与同一束射线所经过的路线有关,与材料的厚度有关,与射线的强度有关,一般透照厚度不超过 80~100mm。对管子透照时如射源与底片都在管外,则射线必然透过两重管壁,呈椭圆形阴影。

射线检验可发现气孔、夹渣以及与射线方向平行的裂纹。与射线方向垂直的裂纹不易被发现,在射线束以外的缺陷也不能发现。射线检验主要用于制造、安装阶段焊接接头的探伤,其底片可以保留备查,便于观察缺陷的发展。有的电厂曾成功地用射线探伤,发现屏式过热器管内堵塞物。

(七) 表面裂纹检验

当前对表面裂纹检验多采用液体渗透法和磁粉法。涡流探伤用于铜管和焊接(纵缝)的管材检验。

1. 液体渗透法(着色及荧光探伤)

液体渗透法仅适用于确认部件表面是否存在裂纹,以及裂纹长度的鉴别,它的准确性取决于部件表面的预处理、部件的温度及检查时的仔细程度。如果裂纹缝隙中填满了氧化物,用着色剂裂纹就往往显示不出来。

2. 磁粉探伤法

磁粉探伤只能在导磁材料上进行。磁粉探伤法比着色法灵敏度高,速度快。在较强的磁场下磁粉探伤有可能探测出在表面下 1~3mm 深处存在的裂纹,它并不一定是表面裂纹。

上述两种方法都不能检查裂纹深度。检验裂纹深度还要借助于专门的裂纹深度测

量仪。

焊缝及其热影响区的冷热裂纹，管子的蠕变裂纹可用表面检验发现。管内壁的表面裂纹如果无法见到或触及则不能用这种方法。几种无损探伤方法发现缺陷能力的比较见表1-2。

表 1-2

缺陷形状和探伤方法对应表

缺陷 探伤方法	平面状缺陷（裂纹 未溶合未透焊）	球状缺陷 （气孔）	圆柱状缺陷 （夹渣）	线性表面缺陷 （表面裂纹）	圆形表面缺陷 （针孔）
射线探伤	△或×	○	○		
超声探伤	○	△	△		
磁粉探伤				○	△或×
着色探伤				○或△	○

注 ○表示最适合；△表示良好；×表示困难。

（八）壁厚测量

采用超声波测量壁厚是较普遍的方法。在表面温度低于 100℃ 时采用数字式测厚仪，测量精度可达 ±0.1mm。温度升高，材料中声速发生变化，降低测量的准确性对探头正常工作不利。

制造时应检验壁厚，特别要检验那些按设计数据来衡量，壁厚裕度小的部件、弯管及冷热加工成型的部件。

直管在轧制过程中，壁厚呈螺旋线变化。有怀疑时，可沿整个长度测量壁厚，测量点间的距离可为管子外径的两倍。管子在弯制以后外弧侧减薄，弯管的测量断面（每一断面四点）间的距离可为外径的一倍到两倍。汽包的球形封头在接近底部 20°~30° 范围内因冲压减薄较严重，椭圆形封头在接近大曲率部位减薄最多。因此，应当根据具体情况选择测量点。

水冷壁管的垢下腐蚀坑及汽包钢板大面积夹层可以用测厚仪检查。

（九）蠕胀测量

蠕胀测量可确定部件是否发生塑性变形。通常用于薄壁的过热、再热蒸汽管道（ $\beta \leq 1.2$ ）管子原来存在的不圆度引起的补偿性蠕胀、弯头外弧侧壁厚减薄引起的局部蠕胀变形。

（十）化学分析

在故障分析中，为了查明金属材料是否符合规定要求，必须进行化学成分分析（包括光谱分析）。钢材的化学分析要确定碳及以下诸元素：①合金成分如锰、铬、钼、镍、钒等有意加入钢内的元素；②杂质如磷、硫；③脱氧元素如硅、铝等。在特殊情况下（例如体积较大的锻件）还要确定是否存在对材质纯洁度和焊接性能有影响的偏析现象。

在某些特殊的故障分析中，如腐蚀和应力腐蚀案例，对腐蚀表面沉积物、氧化物或腐蚀产物以及与被腐蚀材料接触的物质进行化学分析，重点检查钢材表面的含碳量以发现“脱碳”现象等，帮助人们确定故障原因。

（十一）机械性能试验

机械性能试验主要是检查损坏部件材料的常规强度与塑性指标是否达到额定指标或是

否符合设计要求。

检验项目随需要而定。例如对于脆性断裂部件经常检验的两个项目是：①宏观硬度测定；②韧性—脆性转折温度（NDTT）的检测。宏观硬度检验着重检查断口或裂源附近的硬度变化并与金相组织检查结果相结合来综合评定：①检验加工硬化或由于过热、脱碳等引起的软化；②评定热处理工艺；③提供钢材拉伸强度的近似值。

冲击试验除了评定材料塑性指标 α_k 值之外，还可进行转折温度测量，特别是脆裂发生在常温或低温状态时。

有时还需确定与损坏机理有关的其他性能试验，如断裂韧性、疲劳强度、持久强度等。

此外，还有硫印试验、环行试样试验和塔型车削检验在电厂中应用较少，不再介绍。

第四节 锅炉压力容器事故是完全可以预防的

要搞好锅炉压力容器的安全管理工作，预防锅炉压力容器事故的发生，应从以下几个方面实施：

（1）各级领导要重视锅炉压力容器的安全管理、使用、安装改造维修工作。

作为主管锅炉压力容器的安全管理、使用、安装改造维修工作的领导，一定要率先垂范，从解决一些具体问题入手，在行动上做到重视这项工作。例如领导首先要重视管理技术人员，使他们感受到自己所从事的是一项很重要的工作，由于自己的工作失误或者疏忽就有可能造成人命关天的大事故，这样他们在管理、检查和做技术工作时才能真正用心去做，做了才能让人放心。这就能从组织领导防线上对设备事故起到很好的把关作用。

（2）加强技术培训，提高锅炉压力容器技术管理、操作、检验人员的技术水平。

锅炉压力容器安全管理是一项技术性很强的管理工作，它以事故的预防为目的。作为锅炉压力容器的安全管理人员必须十分熟悉国内外有关法规、规程、技术标准，掌握国内外发生的锅炉压力容器事故的信息。随着发电设备的技术进步与诊断技术的不断发展，又需要不断实现自身的技术进步。

现代火力发电厂自动化程度高，对其锅炉压力容器的操作人员技术技能要求高，对发电厂锅炉压力容器的检验人员要求掌握力学、冶金、焊接、传热、水动力、失效分析、电厂化学、热工自动控制、无损检测、理化检验等技术领域的知识和技能，因此必须经常对他们进行技术培训，更新知识，提高操作技能，才能在技术方面把好设备事故关。

（3）规范锅炉压力容器安全监督检查管理工作。

- 1) 成立锅炉压力容器安全监督委员会。
- 2) 加强监造和安装阶段的安全性能检验。
- 3) 加强在役设备的定期检验及其监督。
- 4) 加强技术档案管理工作。

5) 加强技术交流，吸取事故教训，提高监督及检验人员对锅炉压力容器安全性的认识。

(4) 完善锅炉压力容器的技术法规体系，预防事故的发生。

建立健全锅炉压力容器的技术法规体系，才能从技术管理上保证锅炉压力容器的安全经济运行，做到该修的修，该报废的报废，应限制条件运行的限制条件运行，才能预防事故的发生。

总之，做好以上工作，可以预防锅炉压力容器事故的发生，为锅炉压力容器的安全经济运行提供必要的保障。

第二章 锅炉常见事故原因 分析与预防

第一节 受压元件的破坏形式

受压元件损坏形式分类方法有多种。按照破坏时宏观变形量的大小可以分为塑性破坏和脆性破坏两大类。按破坏时材料的微观（显微）断裂机制分类可以分为韧窝断裂、解理断裂、沿晶断裂和疲劳断裂。实际上，往往采用的是混合分类：以宏观分类为主，结合一些断裂特征。通常分为：韧性破坏、脆性破坏、腐蚀破坏、疲劳破坏、蠕变破坏、其他形式破坏。下面逐一介绍。

一、韧性破坏（也称延性或塑性破坏）

韧性破坏是元件在内压及其他载荷的作用下，材料的应力达到其强度极限而发生断裂破坏。

金属材料的韧性破坏是显微空洞形成和长大的过程。对碳钢和低合金钢，断裂时首先在塑性变形严重的地方形成显微孔洞。夹杂物及其他缺陷往往是空洞成核的所在，但空洞形成、长大、聚集过程总是伴随着较大的塑性变形。金属材料韧性破坏的一般特征是：

（1）发生明显的变形，管子周长伸长率有时可达10%以上。

（2）断口检查多数属穿晶断裂，断口呈暗灰色纤维状，无金属光泽，断口不齐平，与主应力方向成 45° 。

（3）一般不发生碎裂。塑性材料因其具有较好的塑性和韧性，因此一般不碎裂，只裂开一个口。裂口大小与爆破时所释放的能量有关。对常温液体介质，只裂一个小口；高压饱和水或者气体外泄时，因具有较大的膨胀能，往往有较大的爆口，管壁常被展成平板。

（4）应力水平较高，一般达到或接近材料的抗拉强度。

超压爆破，短期超温爆破，均匀腐蚀减薄爆破，管壁磨损减薄爆破等都常常具有韧性破坏的特征。

二、脆性破坏

脆性破坏又称为低应力破坏。元件在破坏时其应力远未达到材料的强度极限，甚至还低于屈服极限。其破裂现象和脆性材料破裂时相似，与韧性破坏相反，故称为脆性破坏。其一般特征是：

（1）无明显的塑性变形。

（2）裂口齐平、断口呈金属光泽。脆性断裂一般是正应力引起的解理断裂，所以裂口齐平，并与主应力方向垂直。

（3）往往有许多碎块（片）飞出。发生脆性破坏时其材料韧性较差，因在碎裂瞬间裂