

供热锅炉与系统故障的 分析与评述

解鲁生 解 慧 编著

中国建筑工业出版社

供热锅炉与系统故障的分析与评述

解鲁生 解 慧 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

供热锅炉与系统故障的分析与评述/解鲁生等编
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-08397-4

I. 供... II. 解... III. ①集中供热—锅炉—故障
诊断 ②供热系统—故障诊断 IV. TU833

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 060694 号

本书包括的主要内容有: 锅炉的爆管及爆炸; 锅炉出力不足; 效率低及运行中的故障; 锅炉房辅助设备及系统故障; 供热站、换热设备及热计量、管道故障及供热系统设备选材与水质问题等内容。

本书可供从事供热锅炉生产、设计、施工、操作、管理、研究等人员使用, 也可供大专院校师生使用。

责任编辑: 胡明安

责任设计: 赵明霞

责任校对: 张景秋 王金珠

供热锅炉与系统故障的分析与评述

解鲁生 解 慧 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京永峥印刷有限责任公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 850 × 1168 毫米 1/32 印张: 7 字数: 188 千字

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 15.00 元

ISBN 7-112-08397-4

(15061)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

一、目的及内容

1. 本书编写的目的

20世纪50年代以前，我国工业生产供汽和城镇采暖供热的设备和技术都很落后，当时大多数的工业企业规模都很小，生产用汽量也很少。因此，锅炉设备容量小而简陋。采暖一般都是各户在居室中设置燃煤炊事炉，热效率低而污染严重。只有少数大城市的个别大楼设置了供本楼采暖的蒸汽锅炉或铸铁锅炉，而这些锅炉很多还是从国外进口的。如：上海就称“蒸汽采暖”为“水汀（Steam）”；东北不少铸铁锅炉来自日本。

20世纪50年代以后，随着工业生产和城镇集中供热的发展，供热设备和技术都迅速地得到提高。特别是近20多年以来的发展与进步更为显著。这些新设备和新技术的采用，使我国供热事业的面貌得到了根本性的改变，这些内容在不少书籍及刊物上都加以总结和报道。

这些成就的取得是主要的。但是，也有一些单位或由于设备存在缺陷，或由于技术运用不良，而发生种种故障。本书所说的“故障”，包含“事故”，也包含影响实际效果的较为重大的缺点。

本书的目的是对这些“故障”加以分析、评述，从正面总结经验，从反面吸取教训，更有利于供热技术的发展。

2. 阐述的内容及范围

本书就供热系统中，从热源（锅炉及锅炉房）、热的输送（管网及换热站）直到热用户所发生的故障为对象进行分析和评述。城镇集中供热的热源，已由锅炉房发展到小型热电站，因此，锅炉不仅涉及低压锅炉，还包含中压锅炉；锅炉给水处理不仅涉及软化，还包含脱盐，但不涉及汽轮机及发电机组。

本书仅对所列的实际案例进行分析、评述。这些案例大部分都是笔者亲身参加调查、分析或提出处理措施的实例，也有个别案例是笔者收集到的，认为较有价值的实例，当然，所列案例并不能涵盖所有发生的故事。

本书仅针对这些案例逐个论述，而不是面面俱到地对城镇集中供热技术进行系统的总结、报道或阐述。

二、编排与撰写

1. 内容的撰写

撰写的方法，是按案例以“就事论事”的方法加以阐述。

首先，介绍设备的型号、参数，设备系统及运行情况，事故发生时的状况及事故的后果。只求将事故的性质、条件及危害的情况加以介绍，文字力求简明扼要。

然后，叙述调查的经过。对调查反映的情况、实地考察的现象、测试和分析的手段及数据等第一手资料，经过整理后全面地加以介绍，因为它是判断事故和提出处理措施的根本依据。原则上只反映实际的情况和测定数据，不进行分析或加入个人主观的臆断。但调查或考察时，调查组内部就有不同看法，应将不同看法同时并列出来。

最后，进行分析评述。它包含：以发生的情况及取得的数据为依据，进行分析论证，判断事故的性质及产生的原因，并提出处理的措施与建议。分析和判断要有依据和逻辑性的论述；

措施与建议要与分析、判断紧密联系。

书中对以下问题进行评述：

- (1) 分析、判断中必要的理论阐述；
- (2) 对不同意见及看法的评论，并阐述理由；
- (3) 对于同类事故，将可能有不同的发生原因或处理措施分别阐述并加以区别；
- (4) 若同一案例经多次调查分析，对前几次调查结论的评述。

分析与评述是事故调查的精髓，是总结经验、吸取教训的中心内容。

2. 内容的编排

按事故发生的部位、事故的性质或原因划分章节。案例统一编号，一般都不发表事故发生的单位和资料来源。

每个案例的阐述，如前“撰写的方法”所述：首先叙述设备、运行及事故发生的情况；然后叙述调查经过及取得的数据和资料；最后分析、判断和提出处理措施及建议。评述的内容可以穿插在分析、判断或措施之中，也可列在案例的最后。几个案例有相同内容的，或需采用几个案例对比说明的，也可将评述单列一小节来阐述。

事故不同，所需论证的数据和资料不同；事故发生单位具备的条件及手段不同，所能提供的数据及资料差异很大；需评述的内容，众所周知的可以不述或简述，鲜为人知的要较详细阐述……由于上述原因。不强求每一个案例，或每节内容的篇幅都一致或相近，而采用需要多述的占较长的篇幅，简洁可以说明的即不必冗长。一般一个标题下，阐述一个案例；但相同或相近的案例，也有编在一个小标题内的。

设备材质选用不当和系统水质不良，是造成一些故障带有共性的问题，并且在认识上还有分歧。因此在全书最后单列了

两节综合阐述探讨。

为了便于查阅，最后按案例序号顺序给出“案例索引”。

三、编写的分工及致谢

1. 编写的分工

全部内容由两位编写人，按谁参加调查或对内容较熟悉的实例，由谁编写的原则分工编写。但也有所侧重，解鲁生侧重供热锅炉设备方面的编写；解慧侧重于供热系统方面的编写。最后由解鲁生统稿。

2. 致谢

编写过程中清华大学蔡启林、石兆玉两位教授；中国城镇供热协会技术委员会主任委员助理汤峻工程师；东营胜利油田胜中社区热力管理中心朱铁军经理和赵猛工程师；青岛恒源热电有限公司薛智亮工程师及卢志英工程师等提供了资料、在调研中予以协助和指导。在此，向这些同志表示衷心感谢。

编者

2006年3月

目 录

第一章 锅炉的爆管及爆炸	1
1.1 因水质不良而引起的爆管	1
1.1.1 水冷壁爆管及其爆口分析	1
1.1.2 水质管理不善造成大面积水冷壁爆管	6
1.1.3 水冷壁管的氢损坏	10
1.2 由于水循环不良引起的爆管事故	22
1.2.1 水循环设计不当锅炉多次爆管	22
1.2.2 常见水循环部位不良的爆管	29
1.2.3 低温直供系统采用自然循环热水锅炉	32
1.3 间供热水锅炉用于直供系统造成的爆管	35
1.4 过热器的爆管及吹灰引起的管子磨损	40
1.4.1 过热器的堵塞爆管	40
1.4.2 吹灰引起的管子磨损	45
1.5 锅炉的爆炸事故	45
1.5.1 苛性脆化引起的锅炉爆炸事故	45
1.5.2 一场未遂的锅炉爆炸事故	48
第二章 锅炉出力不足、效率低及运行中的故障	50
2.1 锅炉出力不足及效率低	50
2.1.1 热水锅炉由于水流阻力和空气预热器堵灰、 漏风影响出力	50
2.1.2 全面测试分析改进提高锅炉出力和效率	53
2.2 盲目采用分层燃烧技术的负效应	64

2.2.1	分层燃烧是链条锅炉提高出力和热效率的有效措施	64
2.2.2	采用分层燃烧加剧了炉排片烧毁的故障	65
2.2.3	采用分层燃烧增高了灰渣的含碳量	66
2.2.4	安装分层燃烧装置, 不要将侧墙水冷壁下联箱的 死水区暴露在炉膛内	69
2.3	高原地区送、引风机风量、风压及功率的修正	69
2.4	煤粉炉严重结焦	73
2.5	循环流化床锅炉的严重磨损	75
2.6	锅炉汽水共腾事故	76
2.6.1	炉水发沫及汽水共腾的危害及处理	76
2.6.2	热电厂锅炉的发沫和汽水共腾事故	77
2.6.3	供热锅炉的发沫及汽水共腾事故	79
2.6.4	炉水碱度和含盐量与炉水发沫关系的探讨	81
2.6.5	并炉时发生的汽水共腾	86
2.7	AZD20-13-A 型锅炉烟尘超标	87
2.8	水煤浆锅炉用炉内脱硫试验失败的分析	94
第三章 锅炉房辅助设备及系统故障		97
3.1	给水软化防垢设备	97
3.1.1	钠离子交换器的过滤速度	97
3.1.2	钠离子交换器的还原液浓度	98
3.1.3	阳树脂的“铁中毒”及交换器的内壁防腐	99
3.1.4	锅内加药锅炉炉内结垢的消除	102
3.2	反渗透脱盐装置的故障与争议	103
3.2.1	反渗透膜的堵塞与破损	103
3.2.2	膜组件排列组合不当的事故	109
3.2.3	反渗透精处理系统选择的争议	111
3.3	给水除氧的故障	114
3.3.1	加亚硫酸钠除氧效果的改进	114

3.3.2	加装热力除氧器导致铸铁省煤器爆管事故	115
3.3.3	射流真空除氧的低位设置问题	116
3.3.4	还原铁粉过滤除氧出水不能达标的原因	119
3.4	碎煤机出力达不到要求的问题	120
3.5	水力除灰渣系统的故障	122
3.5.1	由于设计不当而造成的水力除渣故障	122
3.5.2	水力除灰的管道腐蚀问题	124
第四章	供热站、换热设备及热计量	126
4.1	供热站的供热故障	126
4.1.1	定压控制方法不当引起的故障	126
4.1.2	供热方式不合理引起的故障及锅炉煤耗高问题	128
4.1.3	由于管网漏损和供水温度变化引起的故障	131
4.2	供热站运行调节的故障	133
4.2.1	循环水泵超负荷运行的故障	133
4.2.2	首站循环水泵蝶阀调节的故障	134
4.2.3	首站调节换热器蒸汽流量发生噪声	135
4.3	换热器的故障	136
4.3.1	板式换热器的堵塞与受热	136
4.3.2	管壳式换热器的流体诱发振动破坏	138
4.3.3	波纹管换热器的流体诱发振动破坏	141
4.3.4	首站换热器的磨损及腐蚀	143
4.3.5	换热器二次网出水温度过低	145
4.4	散热器的选用及腐蚀	147
4.4.1	散热器的散热面积与散热量	147
4.4.2	散热器的材质与腐蚀	148
4.5	热、流量计的故障	150
4.5.1	热、流量计安装未能满足直线管段长度的要求	150
4.5.2	压差式流量计引压管的故障	152

4.5.3	热量表热量计算基础的差异	153
第五章	管道故障及供热系统设备选材与水质问题	155
5.1	管道的泄漏与腐蚀	155
5.1.1	管道系统泄漏事故	155
5.1.2	管道堵塞引起热水锅炉汽化	156
5.1.3	塑套钢直埋管的泄漏	157
5.1.4	钢套钢直埋管的腐蚀	158
5.1.5	凝结水管的防腐与铁污染防治	160
5.2	补偿器的损坏事故	163
5.2.1	套筒式补偿器泄漏及锈死事故	163
5.2.2	波纹管补偿器的应力腐蚀开裂事故	165
5.2.3	波纹管补偿器损坏原因的争议	172
5.2.4	波纹管补偿器的应变时效损坏	173
5.3	供热设备的选材问题	175
5.3.1	不锈钢和铜合金在换热器上的应用	177
5.3.2	不锈钢材的选择	182
5.3.3	316L 不锈钢镍含量在国标与 ASTM 标准中的差异	194
5.3.4	薄壁不锈钢的强度问题	197
5.4	供热系统的水质	199
5.4.1	供热管网的竣工清洗	199
5.4.2	供热系统的水质问题	200
案例索引	205
主要参考文献	212

第一章 锅炉的爆管及爆炸

1.1 因水质不良而引起的爆管

1.1.1 水冷壁爆管及其爆口分析

【例1】某锅炉水冷壁管爆破，其爆口形状如图1-1所示，破口呈喇叭形撕裂，断面锐利减薄，外壁没有氧化皮。破口处管子胀粗较大。对爆口管及邻近未爆破的管子都取样进行机械性能试验，其结果如表1-1所示。

爆口管及邻近管的机械试验结果

表 1-1

项 目	单 位	爆 破 管		邻 近 管	
		火焰侧	炉墙侧	火焰侧	炉墙侧
抗拉强度	MPa	539	510	462	484
屈状点	MPa	—	373	341	369
延伸率	%	1.040	302	369	343

对事故的分析有两种不同的看法：一种看法，认为造成爆管的原因，应视为是由于腐蚀和结垢，短期过热而爆管；另一种看法，认为造成破管的原因，应视为是由于热偏差、水动力偏差，长期过热而爆管。两种看法的爆口都呈喇叭形，故难以区分。

长期过热而爆管，外皮会出现氧化皮。而短期过热而严重鼓疱开裂时，裂口处的四周被汽水急速冷却，产生淬火效果，

所以材质变硬，因而断口锐利变薄；爆破管的抗拉强度大于未爆破的邻近管，比邻近管高 17%；爆破管火焰侧的抗拉强度，反比炉墙侧高 5.7%；爆破管火焰侧的延伸率大幅度降低。从而断定其隐患主要来自结垢和腐蚀，而不是由于热偏差和水动力偏差，所以，应进一步对产生结垢和腐蚀的原因，有针对性地采取措施。

【例 2】某厂 6.5t/h 煤粉炉系由 K_4-13 锅炉改装而成，投产使用三年半发生上升管腐蚀穿孔事故，其部位在 29 根顶棚管的中部管子，在管子上端弯管处是腐蚀最严重的部位，如图 1-2 所示。

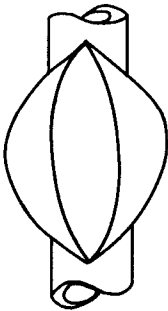


图 1-1 管爆口形状

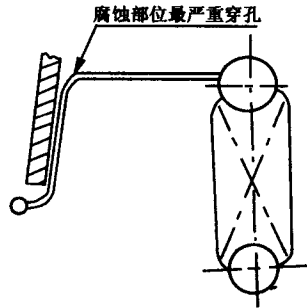


图 1-2 腐蚀穿孔严重部位

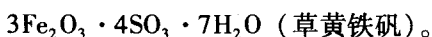
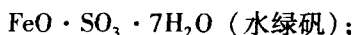
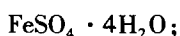
事故发生后厂方十分重视，不仅召开事故分析会，还邀请了研究所、高等院校及有关工厂等 11 家单位召开会诊会议；不仅到现场实地观察，还将被腐蚀的管段进行剖管，测量破口处管子壁厚；金相分析；炉水分析；腐蚀产物的分析等。分析确定了腐蚀的原因及主要因素，提出了防止措施。

(1) 剖管管壁厚度测量，原 $\phi 51 \times 3$ 的钢管，腐蚀后最大内径为 45.62mm，而最小内径为 45.02mm；最大外径为 50.70mm，最小外径为 48.90mm。很明显，管子内部及外部都被腐蚀。管

内腐蚀最严重的地方，壁厚减薄了 0.31mm；腐蚀最轻的地方，壁厚减薄了 0.01mm。管外腐蚀最严重的地方，壁厚减薄了 1.05mm；腐蚀最轻的地方，壁厚减薄了 0.35mm，外部腐蚀比内部腐蚀严重。

(2) 钢管金相分析的结果是三个样品的晶粒都是 7~8 级，属于正常范围。这说明钢管的晶粒度没有粗大，钢管没有过热和淬火现象。

(3) 管外腐蚀产物为棕黑色、疏松、夹有黄色物质。经分析含有：



其中以 $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 为主。

腐蚀产物全硫含量为 40%。

黑色颗粒，在伦琴射线下呈非晶质性（即无谱线）。经显微镜观察验证确实为煤，并含有黄铁矿（ FeS_2 ）。

将腐蚀产物加入酸液后，并无明显的 H_2S 气味，这说明硫化亚铁型腐蚀不是主要的。

(4) 所用的煤为烟煤掺烧大量劣质石煤，石煤中含硫量为 3.4%，含灰量为 77.26%。

(5) 管内腐蚀产物及垢呈棕红色，加酸液有气体放出。成分分析以 CaCO_3 （方介石）为主，夹杂有 Fe_2O_3 （赤铁矿）和 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)$ （碳酸磷灰石）。

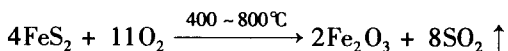
(6) 锅炉运行不正常，近一年多每天停烧三次，甚至停炉时间更长，加上星期天停炉，压力常降至零，停炉长达 14h 左右，冷炉状态反复出现。运行时炉内过剩空气系数较高，为 1.74，压力一般在 0.5MPa 左右，有时低于 0.5MPa。

(7) 锅水中含 CO_2 及 Cl^- 离子浓度较高。

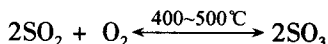
根据以上观察及分析、测定情况，认为：

(1) 管外腐蚀比管内腐蚀严重得多，它是造成腐蚀穿孔的主要原因。管外腐蚀壁厚减薄最严重的地方大约是管内腐蚀最严重地方的3.4倍；最小也为1.5倍。管外腐蚀最严重的地方壁厚仅1.68mm，减薄了56%。

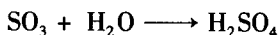
(2) 管外腐蚀的主要原因是SO₃形成的硫酸腐蚀。由于燃煤中含硫量高，主要形成为黄铁矿(FeS₂)，燃烧时发生反应，生成SO₂：



在Fe₂O₃等灰分催化下：



烟气中的SO₃与水蒸气结合成硫酸蒸气：



促使管外腐蚀的影响因素有：

a) 顶棚管上端弯管处是烟气流动的死角，容易积灰，而粘结的灰粒常是燃烧很不完全，内含有尚未来得及分解氧化的黄铁矿(FeS₂)。

b) 锅炉运行不正常，启、停较频繁，造成煤不能得到充分燃烧，同时冷空气不断进入炉膛，而且过剩空气系数较大，增加了炉膛里烟气的湿度并降低了温度。

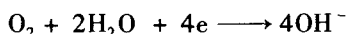
c) 烟气中SO₃和H₂SO₄蒸气含量增高后，会提高烟气的露点温度。当壁温低于酸的露点时，凝结成的酸液附着在管壁的积灰上更容易引起腐蚀。

d) 锅炉运行压力较低，仅在0.5MPa以下，此时管内蒸汽温度在160℃以下，相应管壁温度也较低。

(3) 管内腐蚀的主要原因是氧和CO₂的存在而造成的电化学腐蚀。

钢管内壁由于弯管存在内应力和被水垢等物质覆盖，而引

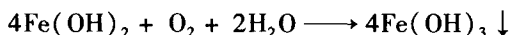
起电位差。形成阳极的铁失去两个电子而成为 Fe^{2+} 。锅水中的溶解氧的存在，产生下列反应：



OH^- 与铁作用生成氢氧化亚铁：



氢氧化亚铁继续氧化成氢氧化铁，构成铁锈：



由于锅水中含 CO_2 及 Cl^- 离子浓度较高，加速了上述腐蚀。特别是在弯管部位受流速很高形成湍流和沸腾的水和水蒸气的冲击，加速阳极的腐蚀。

(4) 除上述而外，在弯管处引起管外及管内腐蚀的因素还有：

a) 弯管的机械加工，使钢管内侧管壁增厚，而外侧管壁拉薄，钢管的内应力成倍地加速腐蚀。

b) 由于经常停炉与开炉，弯管部位的夹角处受到热胀冷缩形成的交变拉伸与压缩应力，而产生腐蚀性疲劳，加速了这个部位的腐蚀。

根据以上的分析与判断，提出以下的改善措施：

(1) 防止管外腐蚀的措施

a) 改善煤的品种，采用含硫量较低的煤。若仍必须用现在的煤质，可考虑在煤中添加适量的石灰石粉，使烟气中 SO_2 、 SO_3 浓度减少。但要注意加石灰石粉后，有可能会降低灰的熔点。

b) 改进炉子结构，提高炉膛温度，堵住烟气死角部位，避免或减少烟灰的粘附。

c) 改善炉子运行的工况，减少停炉次数保护炉子的工作压力，减小过剩空气系数。

d) 停炉期间关闭灰门、烟道门，减少冷空气进入炉内。

(2) 防止管内腐蚀的措施

a) 装置给水除氧设备。

b) 加强给水处理和锅水排污，降低锅水 CO_2 及 Cl^- 离子浓度控制锅水 pH 值在 10 ~ 12。

c) 通过试验研究，适当向锅内添加证实可靠无害的去极化剂或缓蚀剂。

从【例 1】及【例 2】可以看出：

由于水质不良结垢或腐蚀而形成的爆管，都先有一个管壁变薄的过程。管内结垢时，结垢的部位热阻显著增加，这部分管段得不到管内的水或汽水混合物的冷却，壁温升高，应力下降而鼓泡。管内或管外仅产生腐蚀时，主要是由于管内、外被腐蚀而减薄，减薄后也会由于应力下降而鼓泡，但是鼓泡的程度较轻，而且通常是先穿孔而不是爆裂。但是一般常是结垢伴随着腐蚀同时产生的，管内积存的是垢和腐蚀产物的混合物。因此，爆口一般都是骤然爆破而被急速冷却，变成锐利而质硬。

鼓泡的部位是管子弯曲处，或管内水循环最不利、管内流速较低的管段，这些部位最易沉积垢、渣或积灰。管外，则是受热强度最大的部位，这些部位过热程度最大。

1.1.2 水质管理不善造成大面积水冷壁爆管

【例 3】某县的供热公司所属热电厂，原为锅炉供热。以后逐年分期建立小型热电机组，分期拆除供热锅炉。最后成为具有 4 台 35t/h 中压锅炉。6000kW 汽轮发电机 1 台和 3000kW 汽轮发电机 2 台的小型热电厂。换热站建在厂内，其机组和换热器的冷凝水直接返回锅炉。水处理采用阴阳离子交换单极除盐，并向锅内加磷酸三钠，大气式热力除氧。

运行 1 ~ 2 年后，最早建立的 1 号锅炉发生爆管，随即更换了三十几根水冷壁管。锅炉是链条炉反转炉排，Π 型装置的水