

《节能技术丛书》之五

锅炉除垢与水处理

方铎荣 吴季茂 编著

28

宇航出版社

内 容 简 介

本书是《节能技术丛书》的第五册。书中系统地介绍了锅炉除垢与水处理技术，全书共七章，分别介绍锅炉除垢、防垢在节能工作中的重要意义；化学除垢的原理；化学除垢的工艺及安全防护；锅炉的腐蚀缓蚀剂；蒸汽污染；给水和炉水处理。介绍的除垢技术简便实用，投资少，节能效果好，且不污染环境。本书可供工业企业节能技术人员参考，亦可用作节能培训班的教材。

锅炉除垢与水处理

方铎荣 吴季茂 编著

责任编辑：陈学兰



宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号

邮政编码 100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

三河县印刷一分厂印刷



开本：787×1092 1/32 印张：5.375 字数：125千字

1990年6月第1版第1次印刷 印数：1—7000册

ISBN7-80034-313-8/TB·057 定价：2.50元

《全国“星火计划”丛书》编委会

主任委员

杨 浚

副主任委员（以姓氏笔划为序）

卢鸣谷 罗见龙 徐 简

委 员（以姓氏笔划为序）

王晓方 向华明 米景九 应日珪

张志强 张崇高 金耀明 赵汝霖

俞福良 柴淑敏 徐 骏 高承增

序

经党中央、国务院批准实施的“星火计划”，其目的是把科学技术引向农村，以振兴农村经济，促进农村经济结构的改革，意义深远。

实施“星火计划”的目标之一是，在农村知识青年中培训一批技术骨干和乡镇企业骨干，使之掌握一、二门先进的适用技术或基本的乡镇企业管理知识。为此，亟需出版《“星火计划”丛书》，以保证教学质量。

中国出版工作者协会科技出版工作委员会主动提出愿意组织全国各科技出版社共同协作出版《“星火计划”丛书》，为“星火计划”服务。据此，国家科委决定委托中国出版工作者协会科技出版工作委员会组织出版《全国“星火计划”丛书》，并要求出版物科学性、针对性强，覆盖面广，理论联系实际，文字通俗易懂。

愿《全国“星火计划”丛书》的出版能促进科技的“星火”在广大农村逐渐形成“燎原”之势。同时，我们也希望广大读者对《全国“星火计划”丛书》的不足之处乃至缺点、错误提出批评和建议，以便不断改进提高。

《全国“星火计划”丛书》编委会

1987年4月28日

《节能技术丛书》编辑委员会

编辑委员	王补宣 (清华大学)
	葛绍岩 (中国科学院)
	吕灿仁 (天津大学)
	陈明绍 (北京工业大学)
	马重芳 (北京工业大学)
	闵桂荣 (中国空间技术研究院)
	马庆芳 (中国空间技术研究院)
	侯增祺 (中国空间技术研究院)
主任委员	闵桂荣
执行委员	马庆芳

节能技术丛书书目

1. 能源管理与测试技术
2. 节能技术的热工理论基础
3. 工业余热的回收与利用
4. 工业锅炉与炉窑节能技术
5. 锅炉除垢与水处理
6. 新型换热器与传热强化
7. 绝热保温技术
8. 太阳能的热利用
9. 内燃机与汽车的节能
10. 空调、制冷与低温技术中的节能
11. 热管在节能技术中的应用
12. 电工节能技术

前 言

节约能源是人类当前面临的重要任务之一，对于我国，任务尤为艰巨。

虽然从长远看，太阳能、核聚变能、地热能等可以为人类提供几乎无限的能量，但由于技术上的困难，目前这些新能源还不能大规模开发利用，人类近期只能以化石燃料（煤、石油、天然气）为主要能源。以1984年为例，化石燃料占世界能源消费的90%，而在我国则高达95%。化石燃料不可再生，且资源有限。据估计，世界探明的石油贮量仅可供开采30余年，贮采比为35.4:1；天然气的情况略好一些，贮采比为56.8:1；煤的贮量较为丰富，但按1984年的产量，也只够开采160年。所以，节约化石燃料对于人类是至关重要的。

我国的能源形势尤为严峻，这突出表现在资源不足和供应紧张两方面。从总贮量来看，我国常规能源总贮量占世界第三位，其中煤的贮量仅次于苏联和美国，水力资源居世界首位。但由于我国人口众多，人均可采能源资源占有量很低，仅及世界平均水平的一半，相当于美国的1/10、苏联的1/7。从这个角度看，我国也可说是能源贫国，因此，对能源尤为珍惜。

由于各种原因，我国目前能源供应极为紧张。1985年缺煤2000万吨、石油1000万吨，缺电400亿千瓦小时。由于能源不足，工业生产能力有30%不能发挥作用。这种情况在相当长的一段时期内不会根本改变。党的十二大提出，从1981年到本世纪末的20年内，要在不断提高经济效益的前提下，

力争全国工农业总产值翻两番，即由1980年的7100亿元增加到2000年的28000亿元。而在此期间能源产量只能翻一番，即由1980年的6.36亿吨标准煤提高到2000年的12.1亿吨标准煤。如不提高能源利用率，能源将短缺13亿吨标准煤。所以，靠节约能源（不仅是直接节能，还包括广义节能）、降低万元产值能耗来解决这一矛盾，是一项十分迫切的任务。

我国工业节能潜力很大，由于不少部门和地区生产技术落后、设备陈旧、管理水平低、生产规模小以及产业结构的原因，单位产值能耗很高，这种情况在乡镇企业中更为突出。我国平均热效率只有28%，而国外先进水平为50%，相差将近一倍。我国单位产值能耗是世界平均水平的2.7倍、日本的6.5倍，这突出说明了我国节能潜力很大、节能工作大有可为。

节能在我国具有特别重要的地位，我国的能源方针是：开发和节约并重，近期要把节能放在优先地位，大力开展以节能为中心的技术改造和结构改革。为贯彻这一方针，近年来我国各企业普遍设立了节能机构。但在各类节能机构的工作人员中，有很大一部分未受过专业技术教育。乡镇企业的节能技术人员更为不足。这种情况严重地影响了节能工作的开展。

有鉴于此，我们组织航天工业部和中国科学院一些研究所、上海交通大学、北京工业大学、北京太阳能研究所等单位的部分科技人员，编写了《节能技术丛书》，这套技术读物以具有中等文化水平的企业初级节能工作人员为主要对象，系统地介绍工业节能知识。本丛书侧重介绍通用的技术节能基础知识，不专门叙述广义节能和行业节能知识。由于人类目前能源供应的90%直接或间接来自热能，所以本丛书大部分篇幅介绍热工节能问题。本丛书的编写原则是：侧重

实用、兼顾理论；侧重热工节能，兼顾电工节能；丛书构成的知识体系、每册皆可独立成篇；内容通俗浅显，具有中学文化水平即可接受。

本丛书共十二册，它们是：《能源管理与测试技术》、《节能技术的热工理论基础》、《工业余热的回收与利用》、《工业锅炉与炉窑节能技术》、《锅炉除垢与水处理》、《新型换热器与传热强化》、《绝热保温技术》、《太阳能的热利用》、《内燃机与汽车的节能》、《空调、制冷与低温技术中的节能》、《热管在节能技术中的应用》和《电工节能技术》。

本书是《丛书》的第五册，系统地介绍了锅炉除垢与水处理技术。我国有20余万台锅炉，其中70%是小中型锅炉，这些锅炉相当部分没有水处理设备，也不能做到定期清洗，因而结垢相当严重。做好锅炉除垢和水处理可以收到明显的节能效果。例如北京市1980年拥有各类锅炉2万4千余万台，年耗煤2176万吨，如以锅炉平均节垢3mm计算（北京水质硬，据数十台锅炉典型测试，一般结垢均高于此值），采取除垢、防垢有效措施后，估计每年可节约能源350万吨标准煤。可见锅炉除垢和水处理在节能工作中占有多么重要的地位。

本书由方铎荣（编写第一～四章）和吴季茂（编写第五、六章）合著，方铎荣统稿。王补宣、闵桂荣认真审阅了书稿。书中难免有错误或不妥之处，欢迎读者批评指正。

《节能技术丛书》编委会

1987.5

目 录

第一章 锅炉除垢防垢与节能	(1)
1.1 水垢的成因与特性	(1)
1.1.1 水中的杂质	(2)
1.1.2 水垢的成因	(4)
1.1.3 水垢的特性	(5)
1.2 水垢的危害	(9)
1.3 除垢后的节能效果概算	(10)
1.3.1 锅炉的热效率	(10)
1.3.2 水垢对锅炉热效率影响的概算方法	(12)
1.4 除垢的节能效果试验	(15)
1.4.1 锅炉热效率的简易测定	(15)
1.4.2 热效率试验中的注意事项	(19)
第二章 水垢的化学清洗原理与缓蚀剂	(21)
2.1 国外酸洗除垢概况	(21)
2.2 酸洗除垢的基本原理	(24)
2.2.1 溶解作用	(24)
2.2.2 剥离作用	(24)
2.2.3 疏松作用	(25)
2.2.4 硅、铜垢的溶解原理	(25)
2.3 酸洗缓蚀剂的应用	(26)
2.3.1 酸洗缓蚀剂的作用	(26)
2.3.2 酸洗缓蚀剂的缓蚀原理	(26)
2.3.3 酸洗缓蚀剂的性能指标	(27)
2.4 常用酸洗缓蚀剂	(28)
2.4.1 正确选择酸洗缓蚀剂	(28)

2.4.2	正确使用酸洗缓蚀剂·····	(29)
2.4.3	常用酸洗缓蚀剂介绍·····	(30)
第三章 锅炉化学清洗工艺		
3.1	化学清洗方案的制定·····	(34)
3.1.1	清洗用药品及工艺条件·····	(34)
3.1.2	清洗系统设计·····	(37)
3.2	化学清洗工程的实施·····	(42)
3.2.1	化学清洗的准备工作·····	(42)
3.2.2	化学清洗的步骤·····	(44)
3.2.3	检查清洗质量与恢复锅炉系统·····	(50)
第四章 锅炉化学清洗中的安全及防护		
4.1	化学清洗中使用的几种药品的毒性·····	(51)
4.2	化学清洗工程中的安全措施·····	(54)
4.3	化学清洗过程中的废液处理及排放·····	(55)
第五章 锅炉的腐蚀及蒸汽的污染		
5.1	金属的腐蚀及其影响·····	(58)
5.1.1	锅炉腐蚀的基本形式及机理·····	(58)
5.1.2	影响锅炉腐蚀的主要因素·····	(63)
5.1.3	锅炉金属苛性脆化·····	(65)
5.2	蒸汽的污染·····	(67)
5.2.1	影响蒸汽品质恶化的主要因素·····	(67)
5.2.2	蒸汽污染的表现形式·····	(68)
5.2.3	蒸汽污染的危害·····	(69)
第六章 给水和炉水处理		
6.1	水处理概述·····	(71)
6.2	锅炉的参数、结构及蒸汽用途与水处理方法的关系···	(73)
6.2.1	锅炉的参数与水处理方法的关系·····	(73)
6.2.2	锅炉结构与水处理方法的关系·····	(75)
6.2.3	蒸汽用途与水处理方法的关系·····	(76)
6.3	锅炉给水及炉水的水质指标·····	(79)
6.3.1	指标含义·····	(79)

6.3.2 标准指标.....	(83)
6.4 炉外处理.....	(88)
6.4.1 固体杂质去除法.....	(89)
6.4.2 气体杂质去除法(除气).....	(99)
6.4.3 溶解固形成分去除法.....	(102)
6.5 锅炉内的水处理.....	(132)
6.5.1 炉内水处理的适用范围.....	(133)
6.5.2 炉内水处理的机理.....	(135)
6.5.3 炉内水处理药剂的作用、配方及使用方法.....	(136)
6.5.4 锅炉排污.....	(146)
6.6 磁场处理水.....	(149)
6.6.1 原理.....	(149)
6.6.2 国内外发展情况.....	(150)
6.6.3 磁水器.....	(152)
附录.....	(154)
参考文献.....	(159)

第一章 锅炉除垢防垢与节能

我国中小型锅炉数量庞大，全国约23万余台，每年耗煤近2亿吨，接近全国全年耗煤量的三分之一。这些中小型锅炉的运行效率一般都较低，能源浪费很大。效率低的重要原因之一，就是在锅炉的受热面上经常沉积着导热系数很低的水垢，导致锅炉传热效率下降，使耗煤量增加。根据有关单位对我国6省3市9万台工业锅炉的调查表明，大部分锅炉结垢厚度1~2mm，有的达到10mm。据调查，吉林省中小型锅炉结垢厚度一般为2~3mm，北京市为3~4mm。如果按蒸汽蒸发量低于4吨的中小型锅炉19万台、年耗煤1.6³亿吨、水垢平均1.5mm、每mm厚的水垢增加能耗4.5%计算，那么全国中小型锅炉由于结垢造成的多余消耗至少有1000万吨煤炭。由于结垢严重，还会造成锅炉破坏事故。图



图1-1 由于结垢导致锅炉爆管实例

1-1是锅炉管结垢后，由于管子表面过热造成鼓包、变形，最后导致破裂的实例。

图1-2是水垢全部堵塞了锅炉换热管，使这一管子完全失去了传热效能的实例。

图1-3是结垢厚度

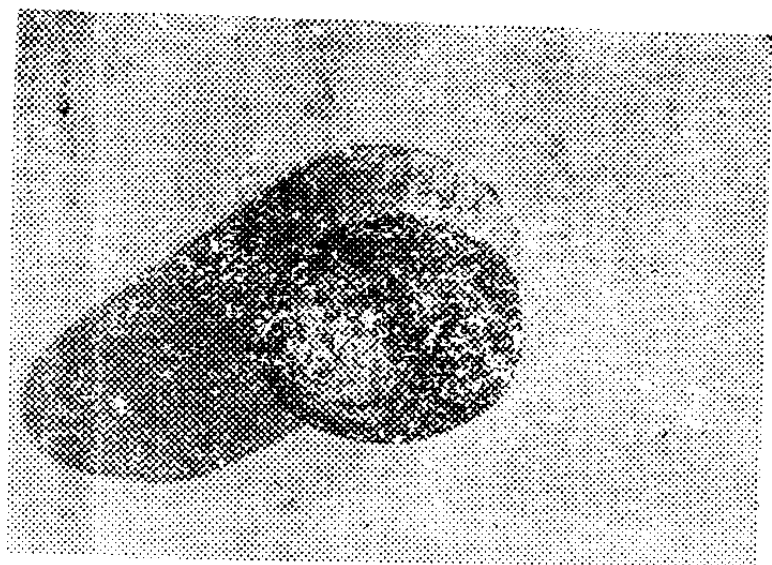


图1-2 水垢完全堵塞锅炉热交换管实例

为0.5、5和18mm的实例。本章将分别叙述水垢的成因、特性与危害，以及除垢与节能效果的概算与试验等问题。

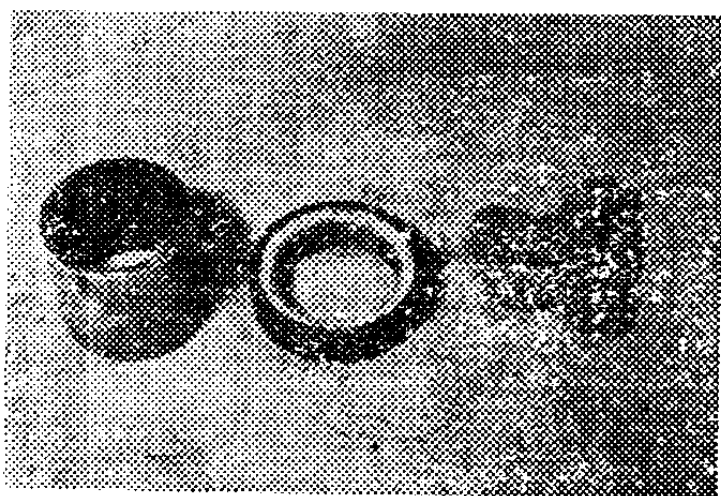


图1-3 水垢厚度分别为0.5、5和18mm厚的实例

1.1 水垢的成因与特性

1.1.1 水中的杂质

自然界中的水大体可以分为三种，即：大气水，它是以雨或雪的状态降下的水，是自然界中品质最好的水，由于它难以大量收集，所以不能用作锅炉用水；地表水，包括洋、海、

湖、人造水库、江、河中的水；地下水，指藏在地面以下的水。

自然界的水是不纯净的。地表水含有较多的泥、砂等悬浮物，我国的黄河就是含泥砂较多的河流之一。地表水还含有动植物和腐蚀质等有机物质、微生物及工业排放的污染物质。此外，地表水也会含有一些溶解盐类（河水的含盐量为 $50\sim 500\text{mg/L}$ ，而海水含盐量为 3.5% ）和溶解气体。地下水比地表水含泥砂悬浮物少，但溶解盐类和溶解气体含量却增加了，例如，地下水含盐量一般在 $100\sim 2000\text{mg/L}$ 之间。大气水比前两者纯净些，但由于雨、雪从天空降下的时候，与空气中的尘埃和气体接触，降至地面时，也溶解了一些盐类（含盐量为 $40\sim 50\text{mg/L}$ ）和气体，所以也不是一种纯净的水。

那么，天然水中含有哪些杂质呢？按水中杂质的颗粒大小不同可以分为悬浮物、胶体和溶解物质三大类。悬浮物是指颗粒直径约在 10^{-4}mm 以上的微粒，包括泥砂、草木植物和动物有机体的微小碎片、纤维或死亡后的腐败产物等；胶体是指颗粒直径约为 $10^{-6}\sim 10^{-4}\text{mm}$ 之间的微粒，主要是铁、铝、硅的化合物及动植物的有机体分解产物；溶解物质是指颗粒直径小于 10^{-6}mm 的微粒，它们往往以离子、分子或气体状态存在于水中，天然水中溶有最多的离子有钠离子（ Na^+ ）、钙离子（ Ca^{2+} ）、镁离子（ Mg^{2+} ）、碳酸氢根（ HCO_3^- ）、硫酸根（ SO_4^{2-} ）、氯离子（ Cl^- ），浓度含量为几 mg/L 至几万 mg/L 。另外，在天然水中常见的还有硅的化合物，含量为几 mg/L 至几十 mg/L 。硅的化合物一部分以离子状态的硅酸氢根（ HSiO_3^- ）和硅酸根（ SiO_3^{2-} ）存在，一部分以二氧化硅 $\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 的胶体状态存在，也能以多硅酸 $X\text{SiO}_2\cdot Y\text{H}_2\text{O}$ 的状态存在。如果把上述离子

组合，可以得到以下几种盐类：氯化钠 (NaCl)、氯化钙 (CaCl_2)、氯化镁 (MgCl_2)、硫酸钠 (Na_2SO_4)、硫酸钙 (CaSO_4)、硫酸镁 (MgSO_4)、碳酸氢钠 (NaHCO_3)、碳酸氢钙 ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)、碳酸氢镁 ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$)。

1.1.2 水垢的成因

锅炉给水中所含有的杂质进入锅炉以后，经过不断地蒸发和浓缩，达到过饱和程度时，就会在锅炉金属表面上析出固相的沉淀物俗称“水垢”。具体地说，就是水中某些溶解盐类，由于炉水温度升高，或因溶解度降低而沉淀出来，或因分解形成难溶的盐类。例如，硫酸钙、硅酸钙在温度升高时，其溶解度急剧降低（硫酸钙的溶解度在 20°C 时为 2980 ppm^①， 40°C 时为 2010 ppm， 100°C 时为 670 ppm， 200°C 时为 76 ppm）；碳酸氢钙和碳酸氢镁遇热分解成难溶的碳酸钙和氢氧化镁的沉淀物。与此同时，锅炉在连续给水、连续蒸发过程中，纯净的水变成蒸汽由锅炉送出，使水中的盐类留在炉内不断浓缩，含量不断升高，在炉水含盐程度达到饱和状态，甚至过饱和状态时，一些钙、镁盐类就从水中析出，生成沉淀物。这些沉淀物的一部分粘结在热负荷较大的受热面上，形成坚硬或松软的水垢；另一部分则悬浮在炉水中，随炉水循环而流动，当受热面处水循环不良、流速降低时，则沉积在受热面上形成二次水垢，或者沉积于流速本来就不高的锅筒、联箱下部，形成泥垢，随定期排污而排出炉外。

水垢的产生，在很大程度上还决定锅炉的运行状态。水的蒸发速率越大，沸腾强度越高，循环性能越好，就会生成

① ppm 为百万分之一。

容易为水循环所破坏的疏松沉淀，可以减少水垢在锅炉蒸发面上集结的数量。与此相反，蒸发速率越小，沸腾强度和循环速度越低，就容易在锅炉蒸发面上结成水垢。

1.1.3 水垢的特性

1) 水垢的分类和鉴别方法

由于给水和锅炉水的组成与性质，以及生成水垢的具体条件不同，使水垢在成分上有很大的差别。按其化学组成，水垢可以分为下列几种。

(1) 碳酸盐水垢

碳酸盐水垢多为白色，以碳酸钙为主，也有少量的氢氧化镁和碳酸镁。按其生成条件的不同，可以是坚硬、致密的硬垢；也可以是疏松海绵状的软垢。常在锅炉水循环较差的部位、给水的进口等处集结。热水锅炉中集结的水垢，多为碳酸盐水垢。此水垢遇稀盐酸时可大部分溶解，且生成大量的气体（ CO_2 ），所剩残渣量很少。

(2) 硫酸盐水垢

硫酸盐水垢多为白色或黄白色，主要成分是硫酸钙。它是特别坚硬和致密的石膏质水垢，常沉积在锅炉内温度最高、蒸发率最大的蒸发面上。此水垢在热的稀盐酸中溶解极慢，如加10%氯化钡溶液后，能生成大量的白色沉淀（ BaSO_4 ）。

(3) 硅酸盐水垢

硅酸盐水垢多为灰色或灰白色，是一种非常坚硬、导热性非常差的水垢，容易在锅炉温度高的蒸发面上沉积。它的主要成分是硬硅钙石（ $5\text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）或镁橄榄石（ $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ）；另一种是软质的硅酸盐，主要成分是蛇纹石（ $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）。此水垢在热的盐酸中也很难