

中 低 压 锅 炉 水 处 理

窦 照 英

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书针对中、低压蒸汽锅炉机组经常发生的腐蚀、结垢、积盐问题,由现象入手,从实际出发阐明了其生成原因和表现形式,提出了解决问题的措施。本书内容主要介绍了与水处理有关的基本知识;详细而系统地阐述了炉外水处理与锅内水处理的方法;此外,对防止热力设备结垢和蒸汽流通部位的积盐,也作了较详细的论述。

本书在介绍基本知识时注意了浅显易懂;涉及理论问题时深入浅出;论述腐蚀、结垢、积盐诸问题时广引博采、技术新颖、例证丰富、生动翔实。

本书适于有初中文化程度的采暖锅炉和中、低压工业锅炉、发电厂化学分场的工人和技术人员阅读,也可供锅炉汽机等专业人员参考,此外,也能作培训中、低压动力设备水处理工人的教材之用。

中低压锅炉水处理

窦 照 英

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 12.5印张 275千字

1987年9月第一版 1987年9月北京第一次印刷

印数00001—13600册 定价 2.20 元

书号 15143·6431

前 言

中、低压锅炉是能源工业设备的重要组成部分。它们广泛用于两万五千千瓦以下的发电、工业供汽及采暖上。使用这类设备的有县级地方火电厂、中型企业的自备电厂、中小型企业生产用汽锅炉房、供汽厂、集中供热的锅炉房，以及宾馆、饭店及浴池等生活用汽等等。在我国现有的二十多万台锅炉中，中、低压锅炉约占95%以上。

当前中、低压锅炉存在的突出问题是结垢和腐蚀问题严重，由于水质不良引起的事故超过事故总数的20%。由于结垢和腐蚀，每年浪费燃煤达一千多万吨，消耗钢铁数十万吨。因此，搞好中、低压锅炉水处理工作，防止腐蚀、结垢、积盐对国计民生有很大意义。

本书针对中、低压锅炉普遍存在的腐蚀、结垢、积盐问题，把前处理、给水处理和锅内水处理结合起来阐述，并提供了分析判断水质和汽质的恶化，研究腐蚀结垢原因的方法。本书以解决实际问题为主，对具有初中文化程度、从事水利电力部直属小火电厂、地方国营及自备电厂，以及其他行业的锅炉、化验与水处理等的专业人员，均适宜；此外，也可作为对有关工人培训用。

在本书编写过程中，曾得到顾良诚、王杏卿等同志的帮助，并蒙王家风同志仔细校阅了其中大部分章节，在此谨致谢意。限于水平，书中不妥和错误处在所难免，希读者指正。

姜照英

目 录

前 言

第一章 基本知识	1
第一节 水	1
一、水资源	1
二、水的一般性质	2
第二节 水中杂质	6
一、水中的杂质	6
二、水质分析中的常用单位	8
三、水的分类	9
四、水中杂质对锅炉机组的危害	13
第三节 锅炉水质的要求与标准	14
一、0.78MPa以下锅炉对水质的要求	14
二、0.78~2.45MPa锅炉对水质的要求	16
三、2.94MPa以上锅炉对水质的要求	17
四、热水锅炉的水质标准	19
五、某些国家的低压锅炉水质标准	21
第四节 锅炉	21
一、燃料与燃烧	21
二、基本结构	24
三、锅炉型号	28
四、常见的低压锅炉	30
第五节 常用材料	34
一、炉外水处理常用药剂	34
二、给水处理与锅内水处理常用药剂	38
三、热水锅炉与冷却水处理的常用药剂	40

四、过滤材料与离子交换树脂	41
五、锅炉和水处理设备的常用结构材料	43
第二章 炉外水处理	55
第一节 沉淀软化	55
一、石灰处理法	55
二、石灰、纯碱处理法	62
三、其他沉淀软化法	63
第二节 凝聚与过滤	65
一、凝聚	65
二、过滤	68
第三节 离子交换法水处理	714
一、离子交换剂	71
二、影响离子交换过程的因素	74
三、离子交换剂的使用与维护	76
第四节 阳离子交换软水法	78
一、水的阳离子交换反应	78
二、软化设备与系统	82
三、固定床顺流再生	85
四、固定床逆流再生	87
五、浮动床	90
第五节 降低碱度的方法	92
一、石灰处理与软水加酸	92
二、氢钠离子交换软水系统	94
三、其他方法	97
第六节 提高软化水水质和降低盐耗的措施	98
一、使用新材料、新工艺	98
二、提高专业人员素质和进行调整试验	99
三、其他	103
第七节 电渗析器	104

一、电渗析法脱盐原理	104
二、电渗析器的基本结构	109
三、电渗析器脱盐特点与注意事项	110
第八节 弱酸树脂脱碱软化	112
一、原理	113
二、特点	113
第九节 磁处理法	114
一、磁处理法及其适用范围	115
二、使用情况评述	118
第十节 炉外水处理中常遇到的问题	120
一、低压锅炉炉外水处理中的问题	120
二、提高炉外水处理技术水平的措施	121
第三章 锅内水处理	124
第一节 水垢及其危害	124
一、水垢的形成过程	124
二、水垢的种类及其鉴别方法	126
三、水垢对锅炉的危害	132
第二节 锅内水处理	139
一、锅内水处理与排污	139
二、热水锅炉与立式锅炉的防垢处理	143
三、0.7~2t/h锅炉的防垢处理	150
四、4t/h及其以上低压锅炉的锅内水处理	153
五、中压锅炉的锅内水处理	156
第三节 水垢分析	157
一、碳酸盐水垢	158
二、磷酸盐水垢	164
三、腐蚀产物	165
四、硅酸盐水垢	167
五、水垢与腐蚀产物分析结果的校验	168

第四节 水垢的清除	172
一、机械清除与煮炉	172
二、化学清洗	176
三、清洗工艺	180
第四章 热力设备的腐蚀与保护	187
第一节 金属腐蚀的基础知识	187
一、设备的腐蚀与保护	187
二、表面膜对金属耐蚀性的影响	189
三、金属的电化学腐蚀与保护	193
四、电位—pH图	198
五、腐蚀速度与测量	208
六、腐蚀速度的分级	213
第二节 热力设备常见的腐蚀形式	215
一、化学腐蚀	215
二、电化学腐蚀	217
三、按腐蚀形貌对腐蚀分类	223
第三节 腐蚀事故的分析与判断	227
一、由宏观现象作初步判断	228
二、试验与检验	230
三、现场调查与收集资料	231
第四节 氧腐蚀与除氧	232
一、水中溶解氧与氧腐蚀	232
二、氧腐蚀的一般防止措施	237
三、热力除氧器	239
四、影响热力除氧器脱氧效率的因素	245
五、热力除氧器的异常情况	249
六、热力除氧器的调整试验	250
七、化学除氧	252
第五节 碱腐蚀与防止	256

一、碱腐蚀引起的皿状腐蚀	257
二、产生皿状腐蚀的原因	259
三、防止碱腐蚀的措施	264
第六节 酸腐蚀及防止	266
一、酸腐蚀的原因与表现形式	266
二、酸腐蚀的特点	268
三、防止产生酸腐蚀的措施	270
第七节 应力腐蚀破裂	272
一、应力腐蚀破裂的特点与危害	272
二、应力腐蚀破裂的产生机理与防止	278
三、晶间腐蚀与腐蚀疲劳	282
四、苛性脆化	284
第八节 停用保护	291
一、停用腐蚀与其危害	291
二、短期停用保护法	293
三、中、长期停用保护法	295
第九节 汽水系统的腐蚀与保护	300
一、供水系统设备的腐蚀与保护	300
二、水汽系统的腐蚀与保护	302
三、过热引起的水蒸汽腐蚀	308
第十节 铜与铜合金的腐蚀与保护	309
一、黄铜腐蚀机理	309
二、热交换器管材及其使用条件	315
三、凝汽器管的水侧腐蚀	317
四、凝汽器的汽侧腐蚀	326
五、防止凝汽器铜管腐蚀的一般措施	339
第五章 蒸汽通流部位的积盐与防止	341
第一节 影响蒸汽质量的因素	341
一、汽水分离装置对蒸汽的净化作用	341

二、炉水含盐量对蒸汽质量的影响	352
三、硅酸盐选择性携带与蒸汽清洗	358
四、锅炉运行条件对蒸汽质量的影响	361
第二节 提高蒸汽质量的措施	363
一、水处理工艺与汽水分离装置的配合	364
二、锅炉运行工况与检修质量	368
第三节 积盐原因的分析及对策	374
一、盐垢及其沉积规律	374
二、积盐原因及盐垢成分分析	376
三、蒸汽遇流部位积盐的处理	382
第四节 汽鼓锅炉的热化学试验	384
一、试验目的	384
二、准备工作	385
三、炉水浓度试验	387
四、蒸发量试验	389
五、水位试验	389

第一章 基 本 知 识

第一节 水

锅炉水处理包括炉外处理和锅内处理两大部分。前者主要是补充水的预处理、软化或除盐；后者为防止腐蚀、结垢、积盐而进行的给水处理和锅内处理。

水处理涉及的知识范围较广，除了对水化学要具备一定知识外，还应对锅炉设备及其常用材料有一定的了解。

一、水资源

水以多种形式存在于自然界，除了常见的江河湖海水以外，在地层中、土壤中、大气中以及动植物体内也有大量水。

淡水是生活和工农业用水的主要水源。我国水资源比较缺乏，在工农业迅速发展的今天，淡水需用量日益紧张，因此，节水与水的合理利用应体现在一切工作中。

为发电、供汽和采暖服务的中低压锅炉水处理面临的现实是：水源短缺与水质恶化。因此许多行业已制订了用水指标以限制用水量，实行超指标累进收费制度。因此在考虑水处理工艺时，必须选择节水型的设计。在水处理工艺中应充分采取水的回收复用，以降低自用水率；减少水汽损失可以降低补水率。在缺水和水质恶劣的地区，可以使用淡化装置制水，甚至研究废水的再生利用。搞好冷却水处理和冲灰水的节约与复用，可以大幅度节约用水。

二、水的一般性质

1. 物理性质:

纯净的水是无色、无臭、无味的液体，浅层几乎无色，深层呈蓝色。

在4℃时，一升水的质量为一千克，密度最大。

水在0.101MPa[●]、0℃时凝结为冰。此时其密度最小，体积最大；在同样压力下于100℃时沸腾。一公斤水在结冰时，能放出335kJ[●]（千焦）的热量，融化时要吸收同样数量的热。水在沸腾转化为蒸汽时要吸收热量，一公斤水在 $9.81 \times 10^4 \text{Pa}$ （帕）时吸收2257kJ（千焦）的热量。当这些水蒸汽凝结时，也要放出相同数量的热。在常见的物质中，水的比热最大。因此，常用水作为热交换介质。

当水中含有其他物质时，冰点将有所下降，沸点有所上升。当所溶解物质为1mol（摩尔）时，沸点可上升0.52℃，冰点可下降1.86℃。

水和蒸汽在温度升高时吸收热量，温度降低时放出热量。吸收和放出的这部分热量，称为热容量。在一般物质中，水的热容量较大，为4.187kJ/kg。

水的沸点随压力升高而升高。水的这一性质对蒸汽锅炉有重要意义。水在不同压力下的沸点如表1-1所示。

通常将2.45MPa以下的锅炉称为低压锅炉，2.45~4.41MPa压力锅炉称为中压锅炉。水虽然不能被压缩，但是蒸汽却可被压缩并蓄积能量，对容器产生巨大压力，可以对外作功。热水锅炉利用水作为传热介质用于采暖；工业锅

● Pa(帕)为压力的法定计量单位，1MPa(兆帕)= 10^6Pa 。1MPa=10.2kgf/cm²。

● J(焦)为热量的法定计量单位。1J=0.239cal。

表 1-1

水在不同压力下的沸点

压 力 (MPa)	饱 和 温 度 (°C)	压 力 (MPa)	饱 和 温 度 (°C)
0.098	99.1	2.45	225.0
0.49	158.1	2.94	234.6
0.981	183.2	3.43	243.0
1.47	200.4	3.92	250.7
1.96	213.8	4.41	256.3

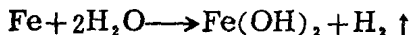
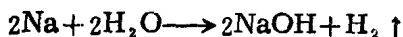
炉利用蒸汽传递热量或者作膨胀功；发电锅炉用蒸汽推动汽轮机做功生产电能；热电厂则把在汽轮机内作过一部分功的蒸汽再供给热用户，实现热电联产，提高热能利用率。

2. 化学性质：

水是由两个氢原子和一个氧原子组成的化合物，分子式为 H_2O 。按水的质量百分数组成，氢占11.19%，氧占88.81%，其分子量为18.01。

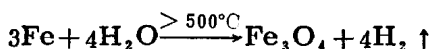
氢与氧作用生成水时是放热反应，可引起燃烧与爆炸。如果要使水分解为氢和氧，则要由外界吸收一定能量才行。这表明，水比较稳定。

在常温下，水易与活泼的金属元素作用，生成碱并放出氢气。水虽也可与其他活泼的金属元素反应，但较缓慢，有的要在高温下进行：



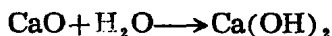
在较高温度下，水可作为氧化剂与某些元素起作用。例

如高温水和水蒸汽与钢铁直接作用，反应如下：

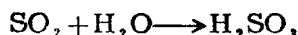
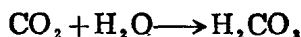


当水中有氢氧化钠时，上述反应可在较低温度下（ $>200^\circ\text{C}$ ）发生，这就是中低压锅炉常见到的碱腐蚀，它常产生于蒸发受热面上。

金属的氧化物与水作用生成碱；非金属的氧化物与水作用生成含氧酸。例如：



空气中所含侵蚀性气体溶于水中，可引起蒸汽动力设备腐蚀。例如二氧化碳或二氧化硫可生成酸，当金属表面有水膜时则产生大气腐蚀：



3. 水的解离和常见物质在水中的溶解度：

水是很好的溶剂，许多气体与固体能或多或少地溶于其中，它还能与许多液体互溶。

气体在水中的溶解度一般随温度升高而降低。热力除氧器就是利用这一原理，把水加热除掉氧与二氧化碳的。气体在水中的溶解规律遵从亨利定律，据此使除氧器中水蒸气分压接近100%而除氧，在脱二氧化碳塔中鼓风脱除二氧化碳。

硫酸和酒精等许多液体可以和水以任意比例互相溶解。水的极性较大，按照溶解度规律，离子化合物和由极性分子组成的物质易溶于水。

大部分盐类可溶于水，一般说来随温度升高其溶解度也

增高（个别物质如氯化钠基本不受温度影响）。有些物质甚至随温度升高溶解度降低，这常是在锅炉上能形成水垢的物质。难溶化合物的溶解度可用其溶度积表示。也就是在难溶化合物的饱和溶液中，各种离子浓度的乘积。它在一定温度下接近于一定的常数值。

纯净的水在常温下解离甚微，在一万吨水中，有18g的水被解离（即在一万吨水中有一克分子水解离成一克离子氢离子与一克离子氢氧根离子）。在一升水中，水分子的浓度为55.3mol/L（摩尔/升）。以此值乘水的解离常数称为水的离子积，以 K_w 表示：

$$K_w = [H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-7} \times 10^{-7} = 10^{-14}$$

在纯水中，氢离子与氢氧根离子浓度相等，均为 10^{-7} mol/L，呈中性反应。由于此数值太小，使用起来不方便，因此用pH表示氢离子多少，并规定pH等于氢离子浓度的负对数，即：

$$pH = -\lg[H^+]$$

pH为7是中性，pH小于7是酸性，pH大于7是碱性。pH是重要的水质指标，提供给动力设备用水的pH应大于7；排水pH合格范围为6~9°锅炉给水和炉水的pH一般为9和9以上。

电解质溶于水中可解离为带正电荷的阳离子和带负电荷的阴离子，从而使溶液具有导电能力。水的电导率可以近似地反映其中溶解盐类的数量。电导率的单位为S/cm（西/厘米），对于测量水质来说，此单位太大，实际上使用其 10^{-6} ，即 $\mu S/cm$ （微西/厘米）。纯水与蒸汽凝结水的电导率小于 $1\mu S/cm$ ，天然水为 $100 \sim 1000\mu S/cm$ ，低压锅炉的炉水可达 $10000\mu S/cm$ 。水的含盐量可以近似地用电导率估

算，通常认为 1mg/L （毫克/升）盐使溶液产生 $2\mu\text{S/cm}$ 电导率。

和固体物质电导率随温度变化的规律相反，温度升高溶液的电导率升高。通常温度每增高 1°C ，溶液电导率提高 2% 。

第二节 水中杂质

水在自然界循环流动时，总要溶解一些杂质。水中杂质对锅炉设备危害很大，水处理就是通过阻垢、防蚀、软化、除盐等手段，限制或消除它们的危害，以防止锅炉设备的腐蚀、结垢、积盐。

一、水中的杂质

天然水中所含杂质甚多，常见的离子近20种，污染水则视污染源不同，所含杂质也不同，概略地分为溶解物质、胶体物质和悬浮物三大类。

1. 溶解物质：

盐类和气体溶于水构成真溶液，不能用离心分离或过滤等一般分离手段除去。盐类在水中含量大、种类多，在气体中则较少。

地壳和土壤中含有几十种元素和由它们构成的种类繁多的化合物。常见成分为硅（Si）、钠（Na）、钾（K）、钙（Ca）、镁（Mg）、铁（Fe）、铝（Al）等。它们常以氧化物、硅酸盐、碳酸盐等形式存在，有时也以磷酸盐、硫酸盐、硝酸盐和氢氧化物等形式存在。水流过土壤和地层时，可以溶解地层中的某些成分。由于不同物质在地层中的

含量和溶解度差异很大，水中溶解物质的比例与它们在土壤和地层中的数量无关。

硅多以硅酸或氧化硅的形式存在，其含量变化不大，一般不超出5~20mg/L。铁、铝以氧化物形式存在的可能性大，其总含量小于10mg/L。钙、镁、钠、钾在水中含量变化较大。淡水中它们的总含量低，以钙、镁为主，钙常为镁含量的2~3倍。咸水和碱性水中钠、钾含量高，钠常为钾含量的两倍以上。在苦咸水和海水中，镁的含量比钙的高。

天然水中阴离子有重碳酸根、硫酸根、氯离子、碳酸盐、硝酸根、亚硝酸根等。淡水中主要是碳酸根和硫酸根离子，海水中则主要是氯离子。海水成分比较稳定，各地海洋水的成分差别不大，其中各种离子的相对比例及含量基本接近。河水的成分差别大些，但是其中各种成分的相对比例大体一致。表1-2列出了河水中各种成分的关系；表1-3列出了海洋水中各种成分的关系。

溶于水中的气体和液面上该气体分压及其吸收系数有关。空气中氧的分压较高，而二氧化碳的吸收系数较大。根

表 1-2 河 水 成 分

成分	SiO ₂	R ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
含量 (%)	11.67	2.75	20.39	3.41	5.79	2.12	5.68	12.14	35.15	0.90

表 1-3 海 洋 水 成 分

成 分	Na	K	Ca	Mg	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	CO ₂
含 量 (%)	30.61	1.09	1.19	3.70	55.20	7.72	0.28	0.19	0.02

据这两种气体在大气中的分压和在水中的吸收系数，可算得常温下天然水中氧的含量为 $7\sim 9\text{mg/L}$ ，二氧化碳为 $0.5\sim 1\text{mg/L}$ 。

2. 胶体物质：

胶体物质的颗粒直径在 $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 之间，它能长期地稳定于水中，不因自身重力而下沉。胶体物质能穿过一般的过滤材料滤层，透过常见的滤膜。这种杂质一般用絮凝或吸附除去。

硅酸和细微分散的氧化铁、腐植酸与腐植酸盐等在水中常呈胶体状态。当它们含量较高时，可使水带有微黄色，透明度会有所变化。

菌藻类微生物也常以胶体状态存在于水中，它们常使水带有腥味。菌藻应以杀菌灭藻剂来杀灭。

3. 悬浮物：

悬浮物的粒径大于 $0.1\mu\text{m}$ ，它是机械携带于水中，可用各种滤网、滤膜和滤层过滤掉。泥沙是最常见的悬浮物，其他如动植物的腐败产物、微生物、腐蚀产物等，都能以悬浮物状态存在于水中。水处理工艺中的细微沉渣也可成为悬浮物。

悬浮物除了能和胶体物质一样引起炉水发泡外，还可造成供水系统污堵和设备磨蚀。

二、水质分析中的常用单位

水质分析的惯用单位与其他物料分析所用单位不同。由于其含量甚微，不用百分数表示，而是用百万分之一，取其英文字首为“ppm”，其数值与“毫克/升”相近，因此常用 mg/L 表示。

除盐水、蒸汽凝结水等纯水中的盐类等杂质含量很低，