

绿色防垢技术

周军 窦照英 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

绿色防垢技术

周 军 窦照英 编著



化 学 工 业 出 版 社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

绿色防垢技术/周军, 窦照英编著. —北京:
化学工业出版社, 2003. 12
ISBN 7-5025-5084-4

I. 绿… II. ①周…②窦… III. 防垢-技术
IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 125426 号

绿色防垢技术

周 军 窦照英 编著

责任编辑: 段志兵

文字编辑: 张燕文

责任校对: 李 林 宋 玮

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 424 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5084-4/X · 363

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京朝工商广字第 740 号

前 言

能源危机、水资源匮乏和水体污染，像挥之不去的阴霾笼罩全球三十余载，全世界智者殚思竭虑，共谋对策，时至今日仍是人们关注的大事。

所有用水系统和设备都存在腐蚀和结垢的风险，水处理行业从业者的职责就是积极寻求高效、节能、绿色的水处理技术，并在实践中不断推广应用。

本书以火电厂节水与水平衡研究为例，倡导将废水消纳于工艺中，减少以至不排放废水，这样虽然使用化学药剂防垢，也不影响环境；本书对量大的锅炉用水、循环冷却用水进行系统的绿色防垢研究与设计，使无污染防垢技术系列化、系统化；本书特别关注物理防垢技术，希望在生活用水、中小容量工业用水和热网用水中能充分发挥其作用，希望能使其规范、有序、健康地发展，成为我国节能防垢和水环境保护中的一支新军。

我们带着使命感编写此书，愿在水处理行业中能为节能、节水、防止水体污染作出贡献，希望能通过本书，广开绿色防垢技术之路。望今后受热面、传热面无垢，不再浪费燃料；防垢水处理不再大量浪费药剂；水资源能被更好地利用；尽量减少排水，以保护水环境。

希望本书能对所有存在结垢困扰的企事业单位、机关、公司与家庭有所助益；希望本书对所有从事水处理工作而又关心环境保护的人们有所助益；希望本书能为水处理研究人员、环境专业人员和院校师生的研究、工作、学习有所启迪。

在此还要特别感谢王秀玲、窦云燕同志，她们在本书成稿过程中给予了大力支持和帮助。

编著者

2003. 10

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 绿色防垢技术的内涵	1
1.1.1 水质污染使绿色防垢技术成为当务之急	1
1.1.2 水中固有的杂质	4
1.1.3 水质污染添加的杂质	8
1.1.4 由化学处理转向物理处理是希望之路	11
1.2 节水与绿色防垢技术的紧密联结	20
1.2.1 水资源与水资源危机	20
1.2.2 防止水质污染是最大的节水	25
1.2.3 压缩废水产生量与使废水资源化利用	28
1.2.4 使用绿色防垢技术节约工业用水	36
1.3 绿色防垢技术的基本思路	42
1.3.1 进行水平衡与强化水务管理	42
1.3.2 实现科学节水、减少成垢物质的进入量	52
1.3.3 在水质处理设计中贯彻节水与环保理念	57
1.3.4 有关节水与水环境保护的法规与标准	62
第 2 章 锅炉与蒸汽动力设备的绿色防垢技术	73
2.1 锅炉与蒸汽动力设备的结垢困扰	73
2.1.1 水垢及水垢的正确化验、判断、校核	73
2.1.2 盐垢、锈垢及污垢	91
2.1.3 不同参数锅炉污垢的形成	104
2.1.4 防止锅炉与蒸汽动力设备结垢的效益	109
2.2 常规防垢技术中的环境无害化处理	120
2.2.1 提高水汽质量以防止受热面结垢	120
2.2.2 防止腐蚀以控制受热面的锈垢	135
2.2.3 常规的补充水、给水与锅炉水处理的绿色化改进	153
2.2.4 绿色除垢清洗是绿色防垢技术的延伸	167
2.3 锅炉和蒸汽动力设备的绿色防垢技术	180
2.3.1 水质处理由添加向削减转化	181
2.3.2 蒸馏法的应用	186
2.3.3 膜法水处理	192
2.3.4 反渗透与电去离子的联合应用	198
第 3 章 循环冷却水与采暖系统的绿色防垢技术	201
3.1 冷却水系统中污垢的形成与常规的防垢方法	201

3.1.1	循环冷却水的浓缩与碳酸钙的析出	201
3.1.2	循环冷却水结垢倾向的判断与控制	205
3.1.3	循环冷却水系统的常规防垢处理	207
3.1.4	循环冷却水系统污垢的防止与清除	218
3.2	物理防垢技术	223
3.2.1	磁处理技术	223
3.2.2	电场防垢技术	232
3.2.3	ECO-GEM 电气石防垢技术	237
3.2.4	物理防垢技术评价	245
3.3	作为绿色防垢技术的物理防垢法的应用	250
3.3.1	磁场防垢的应用例证	250
3.3.2	电场防垢的应用例证	253
3.3.3	ECO-GEM 电气石防垢应用例证	255
3.3.4	物理防垢法的监测评定、基本要求及经验教训	258
第4章	设计优化与水平衡是绿色防垢技术的基础	263
4.1	水处理系统的设计优化	263
4.1.1	火电厂水处理系统优化	263
4.1.2	火电厂的绿色防垢设计构想	268
4.2	火电厂的水平衡与排水治理例证	273
4.2.1	火电厂的水平衡例证	273
4.2.2	火电厂废水处理例证	276
后记		279

第1章 概述

水、空气和食物是人类与生物生存的要素，食物也是依赖水而生成。人体中约 60% 是水分，婴幼儿则高达 80%。没有了水，则没有了生命，地球将像月球那样孤寂。

水在地球上不会消失，但是生命不可或缺的淡水资源会衰减，以至枯竭。除了工农业生产和人民生活所需水量消耗日益增长外，污染是造成水资源短缺的主要原因。遏制水的污染，是人类与其他生物存活的需要。

人们在喊出“只有一个地球”（1974 年）之后，接着又喊出了“水，生命的重要源泉”（1976 年）。在世界性的节日中，3 月 22 日为世界水日，4 月 22 日为世界地球日，6 月 5 日为世界环境日，6 月 17 日为世界防治荒漠化和干旱日，这些都是和水、水资源以及防止水体污染有关的宣传日。有识之士为节约淡水和防治水污染已努力工作了近半个世纪。

本书作者在 1999 年编写出版了《实用无污染防垢技术》，深受读者关爱与支持。进入 21 世纪后，深感水资源与水环境保护对国计民生的重要性，因此撰写本书，为国为民做贡献，为节水和防止水污染做点切实工作。

1.1 绿色防垢技术的内涵

江泽民同志在谈到全面建设小康社会的奋斗目标时说：“可持续发展能力不断增强，生态环境得到改善，资源利用效率显著提高，促进人与自然的和谐，推动整个社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。”在环境与资源中，备受关注的是水环境的恶化和水资源的短缺。

绿色防垢技术的内容包括：在防止受热表面和传热表面结垢的过程中优先采用没有污染的或（和）污染很少的水质处理技术，以防止污染；在水处理工艺中和用水设备中采取有效的水务管理，减少废水产生量；将防止污染放在比治理污染更为重要的位置上；尽可能使传统的化学处理让位于物理处理。

1.1.1 水质污染使绿色防垢技术成为当务之急

十届一次全国人大通过的《政府工作报告》中，强调坚持走可持续发展道路，促进经济与人口资源、环境相协调发展，提出：“实行计划生育、保护环境和保护资源，是我们的基本国策。绝不能以牺牲环境和浪费资源为代价求得一时的经济发展。”

为了保证城市供水，我国从 1999 年起，对重点江河全流域实行水资源统一调度，启动了塔里木河、黑河流域综合治理；实施引黄济津等应急调水工程。南水北调工程将使长江水分三路北上；东线自扬州溯京杭大运河而上，惠及黄淮平原、山东、天津；中线自丹江口水库经河南至北京；西线在青藏高原巴颜喀拉山使两条母亲河牵手，引长江水入黄河。这些工程成败的关键之一，是确保引水不被污染变质，含有水在使用当中减少污染和进行水质处理时减少药剂的污染。

1.1.1.1 水的污染起自工业化时代

水与地球共生，是先哲认为构成世界的四大元素之一，即水、火、土（岩石、土壤）、风（大气）使万物生存繁衍。

海洋中的水在太阳辐照下蒸腾为水蒸气。云腾致雨，除了大部分回降于海洋外，一部分被气流带入内陆落于地表，形成径流。如果遭遇低温则为降雪。水以液、气、固三态发生着蒸腾、转移、凝降和径流的循环，从古至今，持续进行。亿万年来水在凝降和径流中，可有物质溶解或掺杂进入，但非污染，保持着自然界所需要的有益无害物质在其中。

水体污染起自工业革命，迄今近 200 年，然而严重的污染却是近 60 年内发生的，20 世纪中叶进入高峰。

地质学家根据古生物化石和同位素识别地质年代，可以列出地质年表，见表 1-1，对于水则无法加以识别，但是利用特征污染物，却能辨识一个小区域内，水的污染时间和污染源。

表 1-1 地质年表及生物演化

地质时代			距今年龄 兆年	生物演化
宙	代	纪		
显生宙	新生代	第四纪	1 64	有人类出现
		晚第三纪	23 3	近代哺乳类动物出现
		早第三纪	65	
	中生代	白垩纪	135	被子植物出现
		侏罗纪	208	鸟类、哺乳动物出现
		三叠纪	250	
	古生代	二叠纪	290	裸子植物、爬行动物出现
		石炭纪	362	
		泥盆纪	409	节蕨植物、鱼类出现
		表留纪	439	裸蕨植物出现
		奥陶纪	510	无颌类出现
		寒武纪	570	硬壳动物出现
元古宙	新元古代	震旦纪	800	裸露动物出现
			1000	
	中元古代		1800	真核细胞生物出现
	古元古代		2500	
太古宙			3850	晚期生物出现、叠层石出现
冥古宙				

引起水体污染的物质，有的是在用水的工艺过程中引入的，有的是为防止用水设备结垢腐蚀而添加到水中的。采用化学方法进行水质处理，不可避免地要使排水中含有化学污染物质。不同的生产工艺、不同的用水设备和不同的水质处理方法，排出的化学物质虽然不同，但是都对水体构成污染，而且随着生产的发展，污染在叠加和加重。

生产工艺用水的污染取决于流程中的物料，有时是不可避免的，应加强对排水的无害化处理；水质处理中的污染取决于所采用的水处理技术，在很大的程度上是可以控制、可以削减甚至可以避免的，这就是使用没有污染的水处理工艺代替一些传统的水处理工艺。

1.1.1.2 火电厂选址制约因素的转移

火力发电的优势是建设周期短，所需资金少，可以在任何缺电的地方兴建火电厂。然

而建厂的灵活性越来越受限制。

大容量火电厂燃料消耗量可观,装机 1GW 的火电厂,年运行 7000h,需要 330 万吨原煤,煤炭的运输及运输引起的煤炭价格升高,都是兴建火电厂的制约因素。因此,兴建矿口电厂,变输煤为输电成为火电厂选址的重要考虑因素之一。

火电厂用水量和耗水量均可观。凝汽器为直流冷却时,1GW 电厂用水量可达 $30\text{m}^3/\text{s}$ 以上。采取节水型设计的大容量火电厂的耗水量为 $1\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{GW})$ 。自淡水资源紧张以来,兴建火电厂的考虑因素除以煤定电之外,又加上了以水定电。

自 1970 年以来,火电厂排废的环境影响逐渐上升为决定性的考虑因素之一。例如,某市热电厂地处东郊,难以向城市西部重要用户提供采暖热源,拟兴建专用于采暖的热电厂,厂址选在市区。为免于烟尘和灰渣的污染,已决定采用燃油锅炉,然而排水却将使护城河水遭受污染。经论证,确定使用蒸馏水作为锅炉补充水,用软化水作为热网补充水,以免除化学除盐系统的酸碱废水污染。但是作为预处理的石灰软化系统的排渣成为河道的最大污染源,虽然不断治理改造,仍不能彻底解决,最终采取反渗透预脱盐处理锅炉补充水。

正是火电厂对大气及水体的环境影响,使许多位于城市中的火电厂被关停,新建电厂已远离城市。例如在著名的泉城济南,位于趵突泉和大明湖之间,有一座装有 5 台锅炉的火电厂,锅炉总蒸发量超过 100t/h ,所排烟尘洒落电厂周围,废水排入泺源河道,为此在该市郊区兴建电厂替代该厂。

自 1985 年起,新建的火力发电厂和改建、扩建的火电厂,在可行性研究阶段要求提供环境影响报告书或填写环境影响报告表,许多建设项目进行了火电厂环境影响评价,对火电厂用水水量水质平衡;对水体(地表水与地下水)的现状进行调查、监测;对排水构成的环境影响作分析和预测。自此之后,环境影响与燃煤状况、水资源状况一样,成为火电厂选址的主要考虑因素。

新建和改建、扩建火电厂项目的环境影响评价工作,推动了火电厂设计中的水平衡与节水工作,把压缩废水和污水产生量、排放量放到重要位置上加以考虑,强化了对各项废水、污水的处理设计工作。

1.1.1.3 环境质量要求采用绿色防垢技术

在火电厂设计中降低工程造价是最基本的要求。水质处理设计较之锅炉、汽轮机和发电机等主要设备有更大的灵活性,不同的水处理系统组合,在得到规定的水质条件下,投资可有较大的差别。其中,是否在锅炉补充水处理中配置反渗透装置,对投资影响较大。

在未充分考虑水处理排废的环境影响情况下,常限定反渗透装置用于原水含盐量 $\geq 1000\text{mg/L}$ 的预脱盐,而且原则认为宜用于 15.7MPa 及以上的凝汽式电厂,参数较低或补充水量过大的系统不宜采用。

某厂临近渤海,位于海河下游,历史上海河有 5 水注入,水量充沛,水质良好,但是自 1958 年起,由于上游建坝蓄水、工农业用水逐年增长和时而出出现的干旱,水量逐渐减少,海水倒灌趋于严重。

该厂投产的首台机组是 230t/h 锅炉和 50MW 凝汽式机组,凝汽器使用 H68 无砷普通黄铜管,投产于 1966 年 10 月,其设计依据是海河水常年氯离子含量低于 20mg/L ,总溶解固形物低于 200mg/L 。锅炉补充水用河水作为原水,经氢钠离子交换后进入蒸发器制

取蒸馏水作为补充水。氢钠离子交换器是用磺化煤作为交换剂，以不足量酸进行饥饿再生控制产品水的残余碱度。

自 1969 年下半年起，海河水量逐月减少，开始出现海水倒灌，水质恶化，1969 年年均河水质量为氯离子 35mg/L，溶解固形物 240mg/L，硬度 1.7mmol/L，碱度 2.8mmol/L。1970 年枯水期河水氯离子 210mg/L，溶解固形物 790mg/L，硬度 3.1mmol/L，碱度 3.5mmol/L，使氢钠离子交换器产水呈酸性，蒸发器经常出现水汽共沸，锅炉水汽质量不合格，并连续发生水冷壁管结垢爆破故障。

在该厂 4 台 50MW 机组凝汽器管更新和锅炉补充水采取化学除盐处理后，锅炉水冷壁管结垢腐蚀故障有所缓和，但未能完全制止，原因是河水水质变动大，枯水期水质恶劣，虽然有井水，其氯离子含量达 240mg/L，溶解固形物 1000mg/L，硬度 0.8mmol/L，碱度 6.5mmol/L，不适于作三床四塔化学除盐设备的原水。

1987 年，在研究该厂 4×200MW 扩建锅炉机组锅炉补充水处理时，均认为应使用反渗透器作为预脱盐，在同一城市南郊的亚临界参数燃油电厂使用反渗透预脱盐已有 8 年以上的成功经验，可资参考。

在关于反渗透装置用于锅炉补充水处理的原水水质条件的讨论中，从保证出水质量合格考虑，认为总溶解固形物应为 1000mg/L 上下；但是从减少排废考虑，认为应为 500mg/L 上下，而且应该作为主要考虑因素。

某省省会的热电厂位于市区，使用总溶解固形物为 500mg/L 以上的黄河水作为锅炉补充水的原水，在该厂拟扩建 2×200MW 机组时，投资方的领导人征询是否可以采取反渗透装置。对此作了肯定性的回答，指出：对于位于市区的热电厂来说，为了减少再生废液的排放，必须采取反渗透装置进行预脱盐。该工程安装了 6 台 59t/h 反渗透器，可将除盐系统酸碱再生废液削减 90% 以上。具有很好的环境效益和社会效益，产品水质量也将提高。

20 世纪 90 年代，首都某热电厂扩建 10.8MPa 级锅炉机组时，拟采用反渗透装置。按照传统的设计管理，认为这是不够合理的。基于该地区对排水总量控制的限制，出于削减排废总量的考虑，为该厂设计了反渗透预脱盐系统，受到地方环保部门的赞许，并得到电力环境监测及管理单位的支持。该热电厂采取反渗透预脱盐系统近 10 年的运转经验表明，采取反渗透预脱盐处理，提高了锅炉水汽质量，防止了锅炉结垢腐蚀，也防止了汽轮机结盐垢，减少 95% 的废水生成量，改变了火电厂是水体污染大户的形象，扭转了人们对反渗透装置关于参数、容量及原水含盐量限定的传统观念。

1.1.2 水中固有的杂质

1.1.2.1 水在升腾、迁移和径流中引入的杂质

地球表面 71% 被海洋覆盖，太阳给予地球的能量达到 5Mt/s 标煤所发出的热量。如果把太阳能全部收集起来，10min 收集的能量，可供全球一年使用。巨大的太阳能使海洋水蒸发升腾。水蒸气由海洋中蒸发时，可以携带约 0.03% 的海水雾沫，相当于 10mg/L 以上的盐分。如果浪涌较大，或者有能起 2~2.5m 浪涌的风（风速超过 8m/s，相当于 5 级的风），则携带的盐分（实际是气流与气流带有的海水雾沫）将大幅度增长。在海洋中这种情况是经常出现的，实测滨海降水及钢铁表面凝露中氯离子含量分别可超过 50mg/L 和 100mg/L。

水蒸气在迁移过程中，首先是和大气中成分掺混，没有遭受污染的大气成分见表 1-2，当云气凝成降水时，水中将溶有大气的成分，其溶解程度与大气中气体成分及各该气体在水中的吸收系数有关。氮、氧和二氧化碳的吸收系数见表 1-3。吸收系数与水温有关，亦即与气体分子的动能有关。

表 1-2 近地处大气中各种气体成分（体积分数）

大气成分	氮	氧	氢	二氧化碳	氖	氩	氦	氙
含量/%	78.09	20.95	0.93	0.03	0.0018	0.0005	0.0005	0.00005

表 1-3 不同水温下气体的吸收系数/(g/L)

温度/℃	10	20	30	40	50	60
氮	0.025	0.020	0.0175	0.015	0.0138	0.0125
氧	0.0542	0.0433	0.0372	0.0329	0.0300	0.0272
二氧化碳	2.435	1.724	1.296	1.041	0.864	0.707

氧与二氧化碳溶入水中可引起金属与合金设备腐蚀，二氧化碳溶入水中引起水的 pH 值下降，可使石灰岩产生岩溶蚀刻。氮气的吸收系数虽低于氧气，但是其在大气中含量高于氧气，在水中的溶存量也可观。在进行水处理工程设计时，应充分考虑到它在水中析出时对混凝沉降过程的影响。

利用表 1-2 和表 1-3 的数据，可按式计算各气体在水中的含量。

$$c = \alpha p \times 10^3$$

式中 c ——气体在水中的含量，mg/L；

α ——在给定温度下某气体的吸收系数，g/L；

p ——大气中该气体的体积分数。

降水落到地面之后，除了有一部分又蒸发之外，绝大部分的水经地表与地下汇集径流。在地表径流过程中，接触到表层土壤，溶解其中可溶和易溶的盐分，并以胶体和悬浮状态携带难溶物质和腐殖酸盐和硅酸盐。

表层土壤中所含盐分除受地下矿床影响外，也受周围环境影响，不同地域会有很大变化，不同季节也会有较大变化。例如，内蒙准格尔旗的黄河水氯离子含量月均值可在 79～186mg/L 范围内变化，除了枯水季节河水的总溶解固形物与氯离子含量会升高外，其总溶解固形物与氯离子含量的峰值出现在丰水季节的暴雨之后，其原因是降水在漫流与地表径流中把盐碱地中的盐分冲入河槽当中。

降水的地下径流将溶有径流沿途的深层土壤与岩层中可溶和易溶的成分。这在一定程度上与地壳的元素成分有关，更与径流沿途的矿床有关。

水是良好的溶剂，降水是纯净水，对于易溶、可溶和微溶的物质来说，都是未达溶解平衡的，可以使之溶入其中。

所有物质的硝酸盐和醋酸盐都是易溶的，硝酸盐在自然界广泛存在。除银、汞、铅的氯化物外其他氯化物都是易溶的，因此，自然界中有大量氯化物可供溶入地下径流的水中。银、汞、铅、钡、锶的硫酸盐难溶，钙的硫酸盐处于可溶与微溶之间，因此，水中会存在许多硫酸盐。天然水阴离子中以碳酸氢根为主，钠、钾、钙、镁和铁的碳酸盐可以溶存。

地壳中主要元素成分见表 1-4。

表 1-4 地壳中主要元素含量/(10^{-4})

氧	硅	铝	铁	钙	钠	钾	镁
4671	2769	807	505	365	275	258	208
钛	氢	磷	碳	锰	硫	钡	其他
62	14	13	9.4	9.0	5.2	5.0	24.4

由表 1-4 可知地壳表层主要是硅、铝的氧化物和钙镁的碳酸盐，由这些物质风化形成的土壤也有与之相近的矿物质。在地下径流的水所含成分与土壤关系更密切。土壤除了矿物质外，还有有机质（腐殖质）。它可以胶体状态进入水中，是水中有机物的主要来源。

1.1.2.2 水中杂质的存在状态

水中杂质可概分为溶解的、胶体状态的和悬浮的三大类。以离子或分子溶解存在的物质粒径 $\leq 1\text{nm}$ ；腐殖酸类大分子物质颗粒为 $1\sim 100\text{nm}$ ，为胶体状态，如胶体硅和构成化学耗氧量的物质等；超过 100nm 为悬浮物，在水中是不溶和难溶的物质。不溶物质当粒径很小时，可以较长时间保留在水中而不沉降；难溶物质当其量超过其溶解度时，有一部分能够在水中以亚稳定状态在一段时间内过饱和存在而不析出。

在水中悬浮的粒径在 $100\text{nm}\sim 100\mu\text{m}$ 间的物质常称做悬浮物，其中粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒能自然沉降，粒径在 $100\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒易于过滤除去。它们是泥沙、腐殖质和菌藻。细菌粒径最小的为 $0.2\mu\text{m}$ ，最大的达几十微米，一般球菌为 $1\sim 2\mu\text{m}$ ，杆菌 $1\sim 4\mu\text{m}$ ，螺旋菌宽度为 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。

粒径在 100nm 以下的物质可长期稳定地存在于水中，它们具有很大的比表面积，具有较大的表面活性，能自水中吸附极性分子和离子，使微粒带电。由于同种的微粒带有相同的电荷，使之彼此推拒而难以聚集。这类物质常称做胶体，大分子的蛋白质等有机物，氧化硅、氧化铁和氧化铝等无机物的水合分子都可呈现此特点，腐殖酸类也易于形成胶体物质。

胶体物质不仅不能自然沉降，也难由常规手段过滤除去。通常要进行絮凝过滤或精密过滤、纳米级过滤处理。

许多物质可以离子或分子状态溶解于水中，如食盐和蔗糖。有许多气体在水中溶解度较大，如氨气和二氧化碳。表 1-5 列出了常见物质在水中的溶解度；表 1-6 列出了常见气体在水中的溶解度。

表 1-5 常见物质 20°C 下的溶解度 (100g 水中溶解克数)

物 质	溶解度	物 质	溶解度	物 质	溶解度
硝酸银	222	硫酸钾	11.1	硫酸钙	0.1
硝酸铵	192	高锰酸钾	6.4	碳酸镁	0.027
硝酸钠	88	硼酸	4.8	磷酸氢钙	0.027
硫酸铵	75.4	四硼酸钠	2.7	碳酸钙	0.0008
铬酸钾	61.7	氯酸钾	1.8	氢氧化镁	0.0007
氯化钠	36.0	氯化铅	0.98	氢氧化亚铁	0.0001
氯化钾	34.0	硫酸银	0.79	氢氧化铝	2×10^{-8}
硝酸钾	31.6	氢氧化钙	0.17	氢氧化铁	2×10^{-9}

表 1-6 常见气体在常压、20℃ 水中的溶解度

气 体	1L 水中 溶解量 mL	气体与水的 质量比×100	气 体	1L 水中 溶解量 mL	气体与水的 质量比×100
氯化氢		42	氧化亚氮	675	
氨		34.5	氙	123	
三氧化硫		9.42	乙烯	122	
氯		0.71	氩	33.6	
硫化氢	2910		氧	31	
乙炔	1050		氢	17.8	
二氧化碳	878		氮	15.1	

由表 1-5 和表 1-6 可知，不同的物质或不同的气体在水中溶解度的差异很大。对于固体物质，通常把 20℃ 下每 100g 水中能溶解 30g 以上的称为易溶物质，能溶解 1g 以上的称为可溶物质，低于 0.2g 的称为难溶物质。许多气体在水中溶解时起化学反应，显得其溶解度相当大。例如，三氧化硫（硫酸酐）和水形成硫酸，氨气在水中形成氢氧化铵，二氧化碳在水中形成碳酸等。

降水过程中，水首先与大气中的尘埃和气体作用，将其淋洗、溶解带下。雨滴的直径约 0.5mm，其淋洗溶解能力极强，在大气中二氧化硫和氮氧化物含量高的地区，降水（雨）的 pH 值可为 5 或 5 以下，这就是酸雨。

1.1.2.3 天然水中常见的杂质成分

天然水含海洋水、河湖水及地下水。能作为工业用水原水、农业灌溉用水和生活用水原水的淡水，是人们研究和关注的对象，包括地表水和地下水。相对于降水而言，水中溶存和掺混的物质都是杂质。用于不同目的的水，对于水中杂质及其含量有不同要求，天然水经过一定的处理才能满足用水设备或用水者的要求。

水中溶解的杂质是盐类和溶解气体，盐类可以解离成离子，氮、氧等气体以分子状态存在，二氧化碳则为碳酸或碳酸盐。掺混的物质则为胶体和悬浮物。

(1) 水中常见的盐类

盐类在淡水中总含量低于 1000mg/L，可解离为离子状态存在。其中阳离子主要是钙、镁、钠、钾；阴离子主要是碳酸氢根、硫酸根、氯离子和硝酸根。其中钙的硫酸盐溶解度较低，但是在总溶解固形物 $\leq 1000\text{mg/L}$ 时，还达不到其饱和溶解度。

上述阳离子与阴离子的排序，是一般地表水与地下水中其含量的排序。有的水钙镁离子含量少于钠离子，这种水的阴离子中除了碳酸氢盐含量高之外，还常含有少量碳酸根。有的水矿化度较高，钙、镁离子含量远高于钠离子，阴离子中硫酸根、氯离子等强酸阴离子含量也会高于碳酸氢根。

硝酸根的存在常表明水体曾有生物污染，如果有亚硝酸根则表明仍存在生物污染，此时甚至还可检出氨（铵、胺）。

如果有上述常见离子之外的离子较大量的存在，可能是有矿床（地下水）或漫流引入（地表水）。例如，有萤石矿可使水中氟离子超过 5mg/L，有磷灰石矿可使磷酸根超过 3mg/L，有钡离子时常有重晶石类物质，有硼离子时可有硼砂存在。有地热资源的地区，水中硫离子、铁和重金属离子均可出现。

(2) 水中胶体物质和悬浮物质

胶体物质中既有有机物，也有无机物，而且以前者为主。

有机胶体物质多来自土壤的有机质，来自动植物体的生物分解作用，如腐殖酸、富里酸、氨基酸、蛋白质等，它们的存在使水具有化学需氧量 COD 和生化需氧量 BOD 等特征指标，也可用总有机碳反映其存在。当腐殖酸含量较高时，水会有色度，在紫外分光光度计上有消光值。

无机胶体物质有硅酸盐和铁、铝、锰等物质。硅酸盐是地壳的主要构成成分，岩石和由岩石风化形成的土壤中都以硅酸盐为主。最常见的如石英、长石、花岗岩、高岭土均是，常以二氧化硅为代表。

水中二氧化硅含有可溶的与胶体的（除外悬浮的砂粒），可溶解部分也并非单纯的偏硅酸（ H_2SiO_3 或 $SiO_2 \cdot H_2O$ ），而是多分子的聚集体（ $nSiO_2 \cdot mH_2O$, $n \leq 5$ ），它可在测试中直接与试剂反应，无须转化；胶体硅是更多二氧化硅水合物的聚集体，如果不经转化处理，不能直接与检测试剂起反应。

铁、铝氧化物的水合物（氢氧化物）多为胶体状态，它们的溶度积很小，溶解度低，在水中的含量低于 $1mg/L$ 。

水中悬浮物多为黏土微粒，其粒径超过 $100nm$ ，其成分多为硅酸盐。如果水样不进行过滤或滤层孔径不适当，它们中的一部分会被当做二氧化硅检测出来，引起测试误差。

1.1.3 水质污染添加的杂质

1.1.3.1 可能进入水中的污染物质

(1) 不同行业可能排放的污染物质

矿山开采与选矿排水以悬浮物为主，矿石品位越低，排出的悬浮物量越大。煤炭的洗选除了悬浮物外，色度影响也很大。

钢铁冶炼与有色金属冶炼行业，除了排水中悬浮物外，还有重金属、硫化物。所配备的炼焦企业有化学耗氧量、氰等成分。

石油炼制与加工企业除了油和化学耗氧量外，还有相应的产品和物料进入排水中。

纺织、印染、造纸及纤维工业排水有很高的 BOD 、 COD 含量，水的色度高，异味也重。肉类加工及食品工业排水 BOD 、 COD 含量非常高。

(2) 危害严重污染物的可能来源

汞、砷、铬、镉、铅、铍、锰及其化合物可以产生于这些物质的采矿、矿产品加工和冶炼过程中，可以出现在使用这些物质的行业中，如电镀、制造农药、电池生产等。

黄磷及磷化合物、氰化物、氯、硫化氢、氟化氢等可产生于这些物质的生产工艺废水中，也可产生于杀虫剂、电镀、树脂生产、氟塑料生产过程中，有些物质是人为添加的（如氯），有的是副产品（如硫化氢）。有的正在被替代中，如氟氯烃。

在水处理工艺中使用许多有一定毒害的物质。大宗使用如硫酸、盐酸、氢氧化钠、磷（磷）系列水质稳定剂、氯及次氯酸钠等。用量较少的是联氨、氨、磷酸钠各类缓蚀剂，氢氟酸和各种清洗剂等。其他如石灰乳类沉淀剂、硫酸亚铁类混凝剂、覆盖过滤用的纸浆等，分别可致悬浮物和 COD 污染。

(3) 污水中的污染物质

除了工业废水可向水体引入污染物外，任何行业 and 任何城镇都有生活污水排放，其中除悬浮物、 BOD 、 COD 之外，有洗涤剂、硫化物、氨氮之类污染物质。

1.1.3.2 污染物质的分类

(1) 按水中污染物对人体影响程度区分

GB 8978—1996《污水综合排放标准》按照水中污染物对人体健康产生的影响分为两类。

第一类污染物能在环境或动植物体内蓄积，对人体健康产生长远不良影响，要求在车间或车间的处理设施排出口处的浓度为表 1-7 的数值。

表 1-7 第一类污染物最高允许排放浓度/(mg/L)

污染物	最高允许排放浓度	污染物	最高允许排放浓度
总汞	0.05 ^①	总砷	0.5
烷基汞	不得检出	总铅	1.0
总镉	0.1	总镍	1.0
总铬	1.5	苯并[a]芘 ^②	3×10^{-5}
六价铬	0.5		

① 新建、扩建、改建的烧碱行业采用 0.005。

② 为试行标准，暂只对 1、2 类水域考核。

第一类污染物在一般的水体中不易遇到。第二类污染物是指其长远影响小于第一类污染物，但都是经常遇到的，其最高允许外排含量见表 1-8。

表 1-8 第二类污染物最高允许排放浓度/(mg/L)

项 目	一级标准		二级标准		三级标准
	新建、扩、改建	现有	新建、扩、改建	现有	
pH 值	6~9	6~9	6~9	6~9	6~9
色度(稀释倍数)	50	80	80	100	—
悬浮物	70	100	200	250	400
生化需氧量 BOD_5	30	60	60	80	300
化学需氧量 COD_{Cr}	100	150	150	200	500
石油类	10	15	10	20	30
动植物油	20	30	20	40	100
挥发酚	0.5	1.0	0.5	1.0	2.0
氰化物	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0
硫化物	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0
氨氮	15	25	25	40	—
氟化物(括号内为低氟区)	10	15	10(20)	15(30)	20
磷酸盐(以 P 计)	0.5	1.0	1.0	2.0	—
甲醛	1.0	2.0	2.0	3.0	—
苯胺类	1.0	2.0	2.0	3.0	5.0
硝基苯类	2.0	3.0	3.0	5.0	5.0
阴离子合成洗涤剂(LAS)	5.0	10	10	15	20
铜	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0
锌	2.0	2.0	4.0	5.0	5.0
锰	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0

(2) 按污染物质分

由表 1-7 及表 1-8 可知，对水体产生污染的引入物质均系化学物质，可以概分为无机物和有机物，还可进一步按其危害程度分为有毒物质和有害物质。

无机物中的有毒物质为表 1-7 中的重金属，它们除了对人体和生物具有毒害作用外，还由于其难以排泄出来而在肌体和脏器中发生积累，加重毒害。

无机物中的有害物质可以是酸碱等使水体 pH 值改变的物质；也可以是各类无机盐，它们的积累使水体难以继续用于工业生产的工艺中，无法用于农业灌溉，更无法作为生活用水。磷、氮等物质可使水体富营养化，导致低等生物大量繁殖和腐败，使水体缺氧，鱼类死亡。除了工业排水引起的富营养化外，生活污水、养殖业和食品业废水及农业、废弃物都可造成湖泊、水库、池塘等缓流水域富营养化。

有机物中的有毒物质主要有苯的衍生物、多环芳烃和农药。苯环上加羟基为酚，加硝基为硝基苯，加胺为苯胺，均是毒性较强的物质，有机农药对土壤构成污染，又随降雨和径流进入水体，它们还可以积蓄在水生生物体中，再通过食物链进入人体。

有机有害物质如脂肪、蛋白质、糖类，虽无毒性，但是在生化分解过程中大量消耗水中氧气，影响水生物存活。油脂尤其是矿物油可覆盖水面，妨碍大气中氧的补充。合成洗涤剂中的磷具有富营养化作用，有的对生物有致畸作用。洗涤剂引起的水面泡沫，除了产生令人厌恶的感观不快外，还使细菌微生物作为载体栖息、存活和繁殖。

1.1.3.3 感官污染与热污染

水在地表径流中，除了会添加化学污染物质，使水体具有毒害作用，不适于人与生物使用外，还会产生颜色、浊度、泡沫、臭气等感官污染。向水体排放温热水，引起水体温度升高，影响生态改变，会构成热污染。

天然水体应无色透明，水层深厚略呈碧绿。碧波万顷，放眼望去，给人一种视觉享受。遭受有机物污染时，常伴随着产生颜色改变，造纸废水流入河溪，可使整条河道的水染为黄色；纺织印染的漂洗水，红红绿绿；炼焦炼油废水灰、黄、褐、黑，不堪入目。

有颜色改变的同时，水面会有漂浮的油花、泡沫，或有菌丝藻团聚簇。有的泡沫是排废自身产生的，如含有合成洗涤剂之类的水体，有的泡沫则是水体富营养污染后发酵产生的或是生化作用产生的，有的是甲烷（沼气）类气体。

遭受有机污染或无机污染都可能使水体变得浑浊，最常见的是悬浮物含量高引起的浑浊，如含有泥沙和煤灰的排水。水处理工艺中澄清池排水悬浮物含量高，如果使用铁盐混凝剂还带有黄色，如果有石灰软化处理，排出的泥渣为乳白色。胶体物质含量高时，同样影响水体的透明度，而且会使水体长期保持浑浊，难于自身澄清沉降。

水体遭受有机物污染时，往往伴随产生臭气，这是有机物质发生厌氧性腐败时产生的，硫细菌可产生硫化氢臭气，亚硝酸还原菌则产生氨或胺类臭气，藻类产生鱼腥味，综合一起，使水体带有阴沟气味，令人恶心、憋闷。

具有上述视觉、嗅觉污染的水体，常是水生生物灭绝，只有低等生物存活。某城市的通惠河在历史上曾是胜景之一，由于与护城河相接，沿途大量污水注入，枯水季节全部是城市污水，水中含氧量几乎为零，没有生物存活，丰水季节仍然浑浊、黄褐，带有泡沫和臭气。经建立污水处理厂与封闭生活污水排口后，水体逐渐还清。

大量的温排水可使水体温度升高到有害的程度。水温升高，水中含氧量必然会减少，水温由 10℃ 升高到 40℃，可使含氧量减少 40%，水生生物存活困难，厌氧微生物将大量繁殖，使水体更加缺氧。水温升高，还使水中生物化学作用加快，水体的有机污染加重。水的热污染还会加重病原体污染，影响人群健康。

1.1.4 由化学处理转向物理处理是希望之路

20 世纪是化学的辉煌世纪,有机化学的蓬勃发展,使世界上充满了合成材料和合成产品,替代了大量天然资源;生物化学的发展,使人们得窥生命的奥秘,步入解释遗传密码的神圣殿堂。在水处理领域中,合成离子交换树脂的出现,使化学除盐完全取代了物理的蒸发脱盐。从水质方面比较,深度化学除盐水胜过了多重蒸馏水,同样进入了水处理的化学时代。

然而,水环境污染的现实和环境质量要求的不断提高,使水处理科研设计者不得不转而再次寻求物理处理。

1.1.4.1 水质术语及单位

国际标准化组织对常用的水质术语作了规定,即 ISO 6107,我国国家标准等效采用,为 GB 6816—1986。水中杂质所用的单位主要是毫克/升 (mg/L) 和毫摩尔/升 (mmol/L),这是和其含量较少有关,尤其是淡水用其较为合适。

(1) 水中常见盐类离子及单位

溶于水中的盐类离解为离子。常见的阳离子是钙离子、镁离子和钠离子,它们均可单独进行检测,钾离子是进行平衡时计算得到,并非实测。被污染的天然水和特定的工艺水中有铵离子。常见的阴离子是碳酸氢根、硫酸根、氯离子、硝酸根,有的水中含少量亚硝酸根、碳酸根、氟离子。被污染的水和特定的工艺水中可检测出硫离子、磷(磷)酸盐。可溶的硅酸盐被认为是偏硅酸盐离子,但是通常表示为二氧化硅,为分辨其存在状态,用全硅(总的二氧化硅)和溶解的(或活性的)二氧化硅表示。

铁、铜、锰、锌在水中含量较少,多是腐蚀产物,被认为是以氧化物形式存在,氧是以分子状态存在。二氧化碳溶入水中后,形成碳酸,但是仍以游离二氧化碳表示。

天然水中淡水和微咸水的上述物质主要用 mg/L 表示,与其相近的是 ppm (百万分之一),后者在国外文献中仍广泛使用。海水中盐类总量和氯、钠等离子含量很高,不宜使用 mg/L 表示,常使用 10^{-3} 、% 表示,也可用 g/L 表示。

水中离子可以使用 mmol/L 表示,尤其钙镁离子更常使用。应该注意的是存在基本单元取用问题。按照国外习惯及国际标准化组织的原则规定,应使用 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为基本单元。国内个别行业使用 $1/2 \text{Ca}^{2+}$ 和 $1/2 \text{Mg}^{2+}$ 为基本单元。在阅读有关文献,尤其是使用水质分析数据时务必弄清基本单元,以免引入误差。

在水质术语中除了上述各种离子和溶解气体、胶体物质外,还有一些较为特殊的水质指标,有些是表示水的结垢、腐蚀性质,有的表征水的污染情况。

(2) 水中固体物含量

总固体物是指水中全部固体物的总和 (TS),它既含有溶解的固体物,也包含不溶解的固体物。

总溶解固体物 (TDS) 是指水中全部溶解的固体物质 (主要是盐类) 和可以透过过滤水样的滤纸或滤料、滤膜的胶体物质。胶体物质的总含量不大,但是对于水处理设计及水处理工艺产生很大影响。例如,胶体硅酸盐不能用常规的过滤手段阻滤,也不参与阴离子交换器中的交换反应 (或者说不完全参与交换反应),在高参数锅炉中它可溶于蒸汽中,形成选择性携带。

悬浮物 (SS) 也称悬浮固体物,这是指在水样测试时被阻滤的部分。悬浮物虽可实