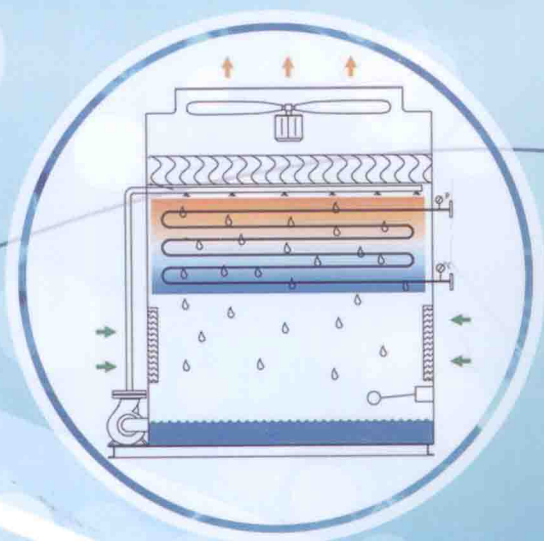


工业循环冷却水处理技术

主 编 赵杉林

副主编 张金辉 李长波 胡春玲



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

工业循环冷却水处理技术

主 编 赵杉林

副主编 张金辉 李长波 胡春玲

编 号 (978) 7-304-01111-2

主 题 词 工业循环冷却水处理技术

中 图 分 类 号 666.97

书 名 工业循环冷却水处理技术

书 号 978-7-304-01111-2

书 名 工业循环冷却水处理技术

中 国 石 化 出 版 社

社 址 北京(100013) 朝阳区

010-64913000 电 话

010-64913000 传 真

http://www.sinopec.com

010-64913000 邮 政

100013 邮 政

100013 邮 政

中国石化出版社

内 容 提 要

本书根据国内外大量文献资料及作者多年的科研实践和教学经验,通过理论阐述和具体实例,对工业循环冷却水处理的各个方面进行了系统介绍。主要内容包括水的冷却原理与循环冷却水系统、循环冷却水系统的水质处理、循环冷却水的前处理及旁流处理、循环冷却水系统中的沉积物及其控制、循环冷却水系统中金属的腐蚀及其控制、循环冷却水系统中微生物的危害及其控制、循环冷却水系统的清洗和预膜、循环冷却水处理剂的筛选和应用、循环冷却水系统的日常运行管理,最后还介绍了循环冷却水系统的事故处理及预防,并把循环冷却水系统相关设计规范与标准作为附录,以增强本书的实用性。

本书内容丰富、结构严密、资料翔实、概念清楚,理论联系实际,实用性强,是一本工业循环冷却水处理领域的综合性著作,适合作为从事工业循环冷却水处理相关工作的科技工作者、管理人员和操作人员的重要参考书,也可以作为高校开设此类课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

工业循环冷却水处理技术 / 赵杉林主编.
—北京:中国石化出版社,2014.12
ISBN 978-7-5114-3133-2

I. ①工… II. ①赵… III. ①工业用水-循环水-冷却-水处理 IV. ①TQ085

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 283907 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。



中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 27.25 印张 686 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定价:90.00 元

前言

改革开放 30 多年来,我国经济保持了年均近 10% 的高增长率,然而水资源形势却日趋严峻。目前,我国已被列为世界人均水资源贫乏国家之一,人均水资源占有量仅为世界平均水平的四分之一。循环冷却水系统作为工业生产中的一个公用工程系统,对于产品质量控制、装置安全稳定运行、水资源消耗及污染物排放等具有举足轻重的作用。循环冷却水在长期运行过程中会出现结垢、腐蚀和微生物滋生等危害,必须进行妥善的处理,否则会严重影响系统安全稳定、增加水资源消耗,并产生大量的污水。

本书根据国内外大量文献资料及作者多年的科研实践和教学经验,通过理论阐述和具体实例,对工业循环冷却水处理的各个方面进行了系统介绍,主要内容包括水的冷却原理与循环冷却水系统、循环冷却水系统的水质处理、循环冷却水的前处理及旁流处理、循环冷却水系统中的沉积物及其控制、金属腐蚀及其控制、微生物的危害及其控制、清洗和预膜、循环冷却水处理剂的筛选和应用、循环冷却水系统的日常运行管理,最后介绍了循环冷却水系统的事故处理及预防,并把循环冷却水系统相关设计规范与标准作为附录或附表,以增强本书的实用性。

本书内容丰富、结构严密、资料翔实、概念清楚,理论联系实际,实用性强,是一本工业循环冷却水处理领域的综合性著作。该书适用范围较广,既可作为从事工业循环冷却水处理相关工作的科技工作者、管理人员和操作人员的技术参考书,也可供从事给排水行业的其他人员以及高校相关专业的师生参考使用。

参与本书编写工作的有赵杉林、张金辉、李长波、胡春玲、李萍、赵国峥、商艳丽,全书由赵杉林教授负责统稿,张金辉教授负责修订和审阅。在编写过程中,刘邓超、薛懂、张芳等研究生和本科生参与了大量的编辑和校对工作,在此表示感谢。

由于作者学术水平和工作经验有限,在本书的编写过程中难免有不妥及错误之处,敬请专家和读者提出批评和意见。

编者

2014 年 4 月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 水资源与水危机	(1)
第二节 工业冷却用水	(6)
第三节 冷却水的循环利用	(7)
第二章 水的冷却原理与循环冷却水系统	(12)
第一节 水的冷却原理	(12)
第二节 冷却水系统及其构筑物	(15)
第三节 冷却塔的设计计算及工程实例	(25)
第四节 循环冷却水系统的运行操作参数	(34)
第五节 循环冷却水系统中水和盐的平衡	(36)
第三章 循环冷却水系统的水质处理	(39)
第一节 循环冷却水系统的水质要求	(39)
第二节 循环冷却水系统的水质变化特点	(41)
第三节 循环冷却水处理的目的	(43)
第四章 循环冷却水的前处理及旁流处理	(45)
第一节 循环冷却水的前处理	(45)
第二节 补充水处理	(55)
第三节 旁流处理	(77)
第五章 循环冷却水系统中的沉积物及其控制	(82)
第一节 水垢和黏泥的沉积	(82)
第二节 循环冷却水系统结垢趋势判断	(83)
第三节 循环冷却水系统沉积物的控制	(94)
第四节 阻垢分散剂及其作用机理	(105)
第五节 阻垢分散剂在循环冷却水处理中的应用	(124)
第六节 无污染沉积物控制技术	(126)
第六章 循环冷却水系统中金属的腐蚀及其控制	(148)
第一节 循环冷却水中的金属腐蚀机理	(148)
第二节 循环冷却水系统金属腐蚀的类型	(156)
第三节 循环冷却水系统金属腐蚀的影响因素	(162)
第四节 循环冷却水系统金属腐蚀的控制	(170)

第五节 循环冷却水缓蚀剂	(183)
第七章 循环冷却水系统中微生物的危害及其控制	(207)
第一节 循环冷却水系统中常见的微生物	(207)
第二节 微生物对循环冷却水系统的危害	(212)
第三节 循环冷却水系统微生物的控制	(225)
第四节 循环冷却水杀生剂及其应用	(232)
第八章 循环冷却水系统的清洗和预膜	(250)
第一节 物理清洗	(250)
第二节 化学清洗	(254)
第三节 预膜	(264)
第九章 循环冷却水处理剂的筛选和应用	(267)
第一节 阻垢分散剂的筛选	(267)
第二节 缓蚀剂的筛选	(269)
第三节 杀生剂的筛选	(274)
第四节 清洗剂和预膜剂的选择	(275)
第五节 复合水处理剂的筛选和应用	(281)
第六节 水处理药剂的分类命名和储存投加	(288)
第十章 循环冷却水系统的日常运行管理	(294)
第一节 开停工与正常运行操作	(294)
第二节 水质管理	(299)
第三节 加药管理	(303)
第四节 循环冷却水水质监测	(306)
第五节 循环冷却水系统的现场监测	(308)
第六节 循环冷却水系统的定期检修	(320)
第七节 换热器的清洗、损坏与更换	(322)
第八节 循环冷却水系统运行成本节约	(324)
第十一章 循环冷却水系统的事故处理及预防	(330)
第一节 事故原因分析与举例	(330)
第二节 典型事故的应急处理	(331)
第三节 生物酶技术在循环冷却水处理中的应用	(336)
第四节 炼油厂循环水系统油料泄漏及漏点快速检测技术	(342)
附录	(353)
附录 1 循环冷却水系统相关设计规范与分析测试方法	(353)
附录 2 工业循环冷却水处理设计规范	(355)
附录 3 循环冷却水用再生水水质标准	(374)
附录 4 工业循环冷却水水质分析方法规则	(376)
附录 5 工业循环冷却水中化学需氧量(COD)的测定高锰酸钾法	(378)
附录 6 工业循环冷却水中悬浮固体的测定	(380)

附录 7	工业循环冷却水及锅炉用水中 pH 值的测定	(383)
附录 8	工业循环冷却水总碱及酚酞碱度的测定	(386)
附录 9	工业循环冷却水中油含量测定方法	(389)
附录 10	工业循环冷却水中钙、镁离子的测定 EDTA 滴定法	(392)
附录 11	工业循环冷却水和锅炉用水中硅的测定	(394)
附录 12	工业循环冷却水及锅炉用水中钾、钠含量的测定	(400)
附录 13	工业循环冷却水和锅炉用水中氯离子的测定	(407)
附录 14	工业循环冷却水和锅炉用水中硫酸盐的测定	(411)
附录 15	工业循环冷却水及锅炉水中氟、氯、磷酸根、亚硝酸根、硝酸根和 硫酸根的测定 离子色谱法	(416)
附录 16	工业循环冷却水中亚硝化菌的测定 MPN 法	(422)
参考文献		(426)

第一章 概 论

第一节 水资源与水危机

水是地球上一切生命赖以生存、人类生活和生产活动不可缺少的重要物质，是不可替代的重要自然资源。随着现代化建设的迅速发展，人类对水的需求量也迅速增长，但供水量却有减无增，且水污染日趋严重，使得全国范围乃至全球性的供水矛盾日益突出。有预测称人类在石油危机之后，下一个危机就是水危机。目前全世界约有 80 个国家和地区严重缺水，占地球陆地面积的 60%，有 15 亿人缺少饮用水。我国人口占世界 22%，而淡水占有量仅为 8%，是世界 12 个严重贫水国之一。因此，合理地利用水资源，节约用水、循环用水、一水多用，已成为缓解水资源紧张、解决用水危机、平衡供需矛盾的重要措施。

人类对水资源的开发利用分两大类：一类是从水资源取走所需的水量，满足人民生活和工农业生产的需要后，数量有所消耗，质量有所变化，在另外地点回归水源。另一类是取用水能(水力发电)、发展水运、水产和水上游乐，维持生态平衡等，这种利用不需要从水源引走水量，但是需要河流、湖泊、河口保持一定的水位、流量和水质。本节所讨论的水资源利用情况主要是第一类用水形式。

一、水资源及其重要性

1. 水资源

地球上水的总储量约有 $13.9 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，其中约 97% 为海洋咸水，不能直接为人类利用。而淡水的总量仅为 $0.36 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，而且这不足地球总水量 3% 的淡水中，有 77.2% 是以冰川和冰帽形式存在于极地和高山上，也难以作为人类直接利用；22.4% 为地下水和土壤水，其中 2/3 的地下水深埋在地下深处；江河、湖泊等地面水的总量只占淡水总量的 0.36%。因此，只有约 20% 的淡水是人类易于利用的，而能直接取用的河、湖淡水仅占淡水总量的 0.3%。可见，可供人类直接利用的淡水资源是十分有限的。

2. 水循环

通过循环水资源得到不断的更新。在较长时间内，全球范围的蒸发与降水基本保持平衡，但在一定时间、空间范围内，其数量极为有限，并不像人们想象的那样可以取之不尽、用之不竭。不同形态水的循环速率差异很大，除生物水外，大气水和河流水的循环更替期最短，更新利用率高，是最活跃、最重要，也是与人类和生物生长发育最密切的水资源。

地球表面的水在太阳辐射能和地心引力的相互作用下，不断地蒸发和蒸腾到大气中，并在空中形成云，在大气环流的作用下传播到不同的地域，再以降雨或降雪等形式回到海洋或陆地的表面。这些降水，一部分渗入地下，成为土壤水或地下水；一部分形成地表径流汇入江、海，再经蒸发进入大气圈；还有一部分直接蒸发或经植物吸收而蒸腾进入大气。这种过程循环往复，永无止境。

3. 水资源的重要性

(1) 调节气候 水是大气的重要成分。虽然大气中仅含全球水量的百万分之一,然而,大气和水之间的循环相互作用,确定了地球水循环运动,形成支持生物的气候。大气中的水帮助调节全球能量平衡,水循环运动起着不同地区的能量传输作用。

(2) 物质运输 水可以输送多种多样材料和营养物质。大气中的各种颗粒物质可以沉降到水体,然后由水输送。从这一方面可以看到,水可以把环境污染物输送、扩散到更远、更广泛的区域。

(3) 塑造地球表面形态 流动的水开创和推动土地地貌的形成,重排地表景观以及形成三角洲等。水是形成土壤的关键因素,也在岩石的物理风化中起着重要作用。

(4) 人类赖以生存和生产的最基本的物质基础 水与人类的关系非常密切,不论是生活或是生产活动都离不开水这一宝贵的自然资源,水既是人体的重要组成,又是人体新陈代谢的介质,人体的含水量占体重的 $2/3$,维持人类正常的生理代谢,每天每人至少需要 $2\sim 3\text{ L}$ 水。工业生产、农田灌溉、城市生活都需要消耗大量的水。但是,随着人口的增长和经济活动的加剧,全球的水循环已大大偏离了它的自然状态,水的流动已发生了显著的变化。人口迅速增长,加快了对水资源的消耗,工农业生产发展严重污染了水体,森林破坏改变了蒸发和径流方向等,这些人类活动造成了水资源的严重破坏,使世界面临着水危机。

(5) 一切生物必不可少的物质 生命的形成离不开水,水是生物的主体,生物体内含水量占体重的 $60\%\sim 80\%$,甚至 90% 以上。水是生命原生质的组成部分,并参与细胞的新陈代谢,还是生物体内外生物化学反应的介质。因此,一切生命都离不开水。水与生物以各种方式相互作用。在一个区域范围内,水是决定植被群落和生产力的关键因素之一,还可以决定动物群落的类型、动物行为等。

二、世界水资源利用情况

1. 世界水资源概况

通常人们将全球陆地入海径流总量作为理论上的水资源总量,即全球水资源总量为 47000 km^3 ,而这一水资源数量在全球分布又是不均匀的,各国水资源丰缺程度相差很大。年降水量以大洋洲(不包括澳大利亚)的诸岛最多;其次是南美洲,那里大部分地区位于赤道气候区内,水循环十分活跃,降水量和径流量均为全球平均值的两倍以上。欧洲、亚洲和北美洲与世界平均水平相接近,而非洲大陆是世界上最为干燥地区之一,虽然其降水量与世界平均值相接近,但由于沙漠面积大,蒸发强烈,径流量仅为 151 mm 。相比之下大洋洲的澳大利亚最为干燥,与降水量 761 mm 相对应,其径流量仅为 39 mm ,这是由于澳大利亚有 $2/3$ 地区为荒漠、半荒漠所致。

2. 世界水资源的供给与利用

随着人类文明的进步,对水资源的需要量越来越大,但可供人类使用的水资源却不会增加;甚至会因人为的污染等因素而使其质量变差,可利用数量减少。加之,世界淡水资源的分布极不均匀,人们居住的地理位置与水的分布又不相称,使水资源的供应与需求之间的矛盾很大,尤其是在工业和人口集中的城市,这个矛盾更加突出。据统计,近40年来,全世界农业用水量仅增加了2倍、工业用水增加了7倍,而生活用水增加的更多。在人类消耗的淡水资源中生活用水量只占总用水量的一小部分,目前全世界的生活用水量只占河川径流量的7%,但随着人类生活水平的不断提高,生活用水量在不断增长。

人类在早期对水资源的开发利用,主要是在农业、航运、水产养殖等方面,而用于工业和城市生活的水量很少。随着世界人口的高速增长以及工农业生产的发展,水资源的消耗量越来越大。

农业用水的耗水量主要是灌溉用水,并且农业用水的损失比工业用水要高得多,因此,农业用水对水资源的消耗是最大的。自 1950 年以来,世界灌溉农田增加了近 3 倍,达到 $2.7 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。淡水资源总量并不能充分为人们所利用,例如,美国人均年占淡水资源 10230 m^3 ,但约有 $2/3$ 通过湖泊、河流、湿地等的蒸发及植物表面蒸腾进入到大气或流回海洋。因此,对水资源的消耗应当合理有序,否则,就会引起一系列的不良后果。如广州佛山最近出现许多地面塌陷的现象,专家指出其原因是采矿的同时大量提取地下水造成的。此外,大量废水的排放引起纳污水体的污染,使水资源更加紧张,出现严重的水资源危机。在工业用水中,主要是能源部门的冷却用水量。在热电厂,每生产 $1000 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电,需用水 $200 \sim 500 \text{ m}^3$;而原子能电站需水量多一倍。世界能源年产量为 $4 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电,耗水量约为 $1.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。在保持现代工业发展进度情况下,冷却水用量占全球需水量的 30%,工业发达国家则可能到 60%。其次冶金工业和化学工业耗水量也很大。

3. 水危机产生的原因

从总的水储量和循环量来看,地球上的水资源是丰富的,如能妥善保护与利用,可以供应 200 亿人的使用。但由于消耗量不断增长和可利用水域的污染等原因,造成可利用水资源的短缺和危机,主要有以下几个方面的原因:

(1) 自然条件影响 地球上淡水资源在时间和空间上的极不均匀分布,并受到气候变化的影响,致使许多国家或地区的可用水量甚缺。例如我国长江、珠江、浙、闽、台及西南诸河流域的水量占总水量的 81.0%,而这些地区的耕地仅占全国的 35.9%;而华北和西北处于干旱或半干旱气候区,其降雨和径流都很少,季节性缺水很严重。北非和南撒哈拉地区、阿拉伯半岛、伊朗南部、巴基斯坦和西印度是年降雨长期平均变化最大的区域,其变化幅度超过 40%。美国西南部、墨西哥西北部、非洲西南部、巴西最东端以及智利部分地区也是如此。因此,世界许多地区会出现区域性的供水危机。

(2) 水体污染 水体有两个含义,一般是指河流、湖泊、沼泽、水库、地下水、海洋的总称,在环境学领域中则把水体当作包括水中的悬浮物、溶解物质、底泥和水生生物等的完整生态系统或自然综合体。由于污染物的入侵,使许多水体受到污染,致使其可利用性下降或丧失。因此,水体污染是破坏水资源、造成可利用水资源缺乏的重要原因之一。主要的水体污染物包括各种有机物、酸污染、悬浮物、有毒重金属和农药以及氮磷等营养物质。

(3) 城市与工业区集中发展 200 多年来,世界人口趋向于集中在占全球较小部分的城镇和城市,自 20 世纪中期以来这种城市化进程已明显加快。我国在改革开放后的 30 多年中,城市的数量增加了好几倍,城市的规模也越来越大。目前世界上城市居民约占世界人口的 41.6%,而城市占地面积只占地球上总面积的 0.3%。在城市和城市周围又大量建设了工业区,因此集中用水量很大,超过当地水资源的供水能力。

(4) 盲目开发地下水 由于地表径流的减少,水资源的开发由地表转入地下,但由于对地下水的盲目过量开采,引起了一系列的后果。我国在 19 个省份中超过 50 个城市发生了不同程度的地面沉降,累计沉降量超过 200mm 的总面积超过 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中,河北省沉降面积高达 $3.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉降范围超过两个石家庄的面积,河北省东部已形成 7 个深层地下水位降落漏斗,沉降幅度在 300~2000mm 之间不等,成为全国地下水位降落漏斗面积和地

面沉降面积最大的地区。由于过量开发地下水,一些沿海城市出现了海水入侵,使地下水含盐量过高,失去饮用价值。

(5) 用水浪费 城市生活和工农业用水都存在大量的浪费。由于管理不善,工程配套差和工艺技术落后,城市管网和卫生设施的漏水很普遍,是城市生活用水中浪费最大的一项。据统计,美国城市管网漏水量平均达每人每天 60 L,占全部用水量的 10%~15%。北京漏水量占总用水量的 10%~40%,甚至可达 70%。工业上从水源取用的水量远远超过其实际耗水量。农村大水漫灌,利用率很低,而且渠道渗漏很大,不仅浪费水资源,而且引起土壤的次生盐渍化和潜育化,降低土壤质量。

三、我国的水资源分布及特点

1. 我国的水资源分布

我国有 1km^2 以上的湖泊 2300 多个,总面积 7187km^2 ,约占国土面积的 0.8%;湖水总储量约为 $7088\times 10^8\text{m}^3$,其中淡水量占 32%。我国还有丰富的冰川资源,共有冰川 43000 余条,集中分布在西部地区,总面积 58700km^2 ,占亚洲冰川总量的一半以上,总储量约 $52000\times 10^8\text{m}^3$ 。我国平均年降水量为 $61889\times 10^8\text{m}^3$,平均降水深 648.4mm,年均河川径流量 $27115\times 10^8\text{m}^3$,合径流深 284mm。河川径流主要靠降水补给,由冰川补给的只有 $500\times 10^8\text{m}^3$ 左右。我国年平均地下水资源为 $8287.6\times 10^8\text{m}^3$ 。根据分析计算,我国地表水和地下水的量分别为 $27115\times 10^8\text{m}^3$ 和 $8288\times 10^8\text{m}^3$,扣除二者间的重复量 $7279\times 10^8\text{m}^3$ 后,我国多年平均水资源总量为 $28124\times 10^8\text{m}^3$ 。

2. 我国水资源的特点

(1) 水资源时空分布不均 降水是我国河川径流的主要补给来源,全国降水量的 44% 转化为径流,平均径流深 284mm。而我国降水量受海陆分布和地形等因素的影响,在地区上分布很不平衡,年降水量和径流深都由东南沿海向西北内陆递减。东南沿海径流深为 1200mm,而西北干旱区小于 50mm,甚至等于零。水资源的地区分布与人口和耕地的分布很不适应,南方耕地面积只占全国的 35.9%,但水资源却占总量的 81%,人均水资源约为全国平均的 1.6 倍,亩均水量为全国平均的 2.3 倍。北方黄河、淮河、海河、辽河四大流域的耕地多、人口密,淡水资源量只有全国的 19%,人均占有水量只有全国平均的 18% 左右,亩均水量仅为全国均值的 15%。我国干旱和半干旱地区,由于降水稀少,蒸发旺盛,蒸发能力大大超过降水能力。

我国地表径流随时间的分布也很不均匀,径流的季节性分配具有夏季丰水、冬季枯水、春秋过渡的特点,而且年际变化北方大于南方。我国东北平原,黄河、淮河、海河平原以及长江中下游平原的地下水补给以降雨为主;而在西北内陆盆地则主要以河川径流补给为主。南方山区地下水补给量大,一般为 $(20\sim 25)\times 10^4\text{m}^3/(\text{km}^2\cdot \text{a})$;而东北西部、内蒙和西北内陆河山丘区一般小于 $5\times 10^4\text{m}^3/(\text{km}^2\cdot \text{a})$ 。在西部内陆沙漠和草原地区,蒸发能力达到 1600~2000mm,为我国蒸发能力最强的地区。而在东北大小兴安岭、长白山,千山丘陵区和三江平原,气温既低、湿度又大,因此,年蒸发量较小,仅 600~1000mm。

(2) 水资源总量较丰富,人均和地均拥有量少 我国多年平均年水资源总量为 $28124\times 10^8\text{m}^3$,其中河川径流约占 94%,低于巴西、前苏联、加拿大、美国和印度尼西亚,约占全球径流总量的 5.8%,居世界第 6 位。平均径流深为 284mm,为世界平均值的 90%,居世界第 7 位。可见,我国的水资源量还是比较丰富的。然而,我国人口众多,平均每人每年占有

的河川径流量 2260m^3 ，不足世界平均值的 $1/4$ ，分别是美国人均占有量的 $1/6$ ，前苏联的 $1/8$ ，巴西的 $1/19$ 和加拿大的 $1/58$ 。我国地域辽阔，平均每公顷耕地的河川径流占有量约 28320m^3 ，为世界平均值的 80% 。所以，我国水资源量与需要不适应的矛盾十分突出，以占世界 7% 的耕地和 6% 的淡水资源养活着世界上 22% 的人口。

(3) 我国水资源开发利用各地很不平衡 在南方多水地区，水的利用率较低，如长江只有 16% ，珠江 15% ，浙闽地区河流不到 4% ，西南地区河流不到 1% 。但在北方少水地区，地表水开发利用程度比较高，如海河流域利用率达到 67% ，辽河流域达到 68% ，淮河达到 73% ，黄河为 39% ，内陆河的开发利用达 32% 。地下水的开发利用也是北方高于南方，目前海河平原浅层地下水利用率达 83% ，黄河流域为 49% 。

(4) 水土流失严重，许多河流含沙量大 由于自然条件的限制和长期人类活动的结果，中国森林覆盖率只有 12% ，居世界第 120 位，水土流失严重，全国水土流失面积约 $150 \times 10^4 \text{km}^2$ ，约占国土面积 $1/6$ 。结果造成许多河流的含沙量大，如黄河年平均含沙量为 $37.7\text{kg}/\text{m}^3$ ，年输沙总量 $16 \times 10^8 \text{t}$ ，居世界大河之首。

四、水资源的利用和保护

随着人口的增长，城市化、工业化以及灌溉对水的需求日益增加，21 世纪将出现许多用水紧缺问题。在可供淡水有限的情况下，应积极采取措施保护宝贵的资源。

(1) 实行科学灌溉，减少农业用水浪费 全世界用水的 70% 为农业灌溉用水，但其利用率很低，浪费严重。据估计，全世界有 37% 的灌溉水用于作物生长，其余 63% 都被浪费掉了。因此，改革灌溉方法是提高用水效率的最大潜力所在。灌溉方式的改进，是农业节水的重要途径。20 世纪 60 年代在以色列发展起来的滴灌系统，可将水直接送到紧靠植物根部的地方，以使蒸发和渗漏水量减到最小。当前，国外灌溉节水技术的发展趋向是采用完整的灌溉排水管道系统，它具有能源消耗少，输水快，配水均匀，水量损失小，不影响机耕等优点。此外，一些国家还研究了新的灌溉技术，如涌流灌溉、水平畦田灌溉、采用自动升降竖管等。内布拉斯加农业和自然资源研究所设计了一种灌溉计算机程序，利用各小型气象站收集来的数据计算各地区生长的不同作物的蒸发蒸腾率，指导农民调整灌溉日期。自动灌溉技术，利用计算机控制流量、监测渗漏、调节不同风速和土壤湿度条件下的用水量，并使肥料用量最佳化。我国最新的研究表明，覆盖滴灌对水的利用效率更高，是适合干旱半干旱地区的新型灌溉技术。

(2) 降低工业用水量，提高水的重复利用率 降低工业用水量的主要途径是改革生产用水工艺，争取少用水，提高循环用水率。如炼钢厂用氧气转炉代替老式平炉，不但提高了钢的质量，而且用水量降低了 $86\% \sim 90\%$ 。如果把全国工业用水的平均重复利用率从目前的 20% 提高到 40% 。每天可节水 $1300 \times 10^4 \text{t}$ ，相应地节省供水工程投资 26 亿元，节水量和经济效益都是相当可观的。提高工业用水重复利用率，不仅是合理利用水资源的重要措施，而且减少了工业废水量，减轻了废水处理量和对水体的污染。

循环冷却水是指用水来冷却生产设备、产品、制冷机等，水自身的温度升高了，通过冷却设备把水温降低下来，再去冷却生产设备或产品，这样往复循环使用，仅补充少量在循环过程中损失的水量。冷却水是用水大户，这样就大幅度地节省了用水量。同时冷却水的水质要求不高，污水达到排放标准后再经过滤等深度处理后可用于循环冷却水，是开辟第二水源，进行中水回用的重点用户。这样，既不用水质好的水资源水，也不使用自来水，对缓

解水资源紧缺、解决供需矛盾起到保证作用。

第二节 工业冷却用水

一、冷却水应用的范围及行业

工业生产中，冷却的方式有很多，有用空气来冷却的称为空冷，有用水来冷却的称为水冷。但是，在大多数工业生产中是用水作为传热冷却介质的。这是因为水的化学稳定性好，不易分解；它的热容量大，在常用温度范围内，不会产生明显的膨胀或压缩；它的沸点较高，在通常使用的条件下，在换热器中不致汽化；同时水的来源较广泛，流动性好，易于输送和分配，相对来说价格也较低。水作为冷却介质在生产设备的正常运行、产品的质量控制等方面发挥着十分重要的作用。如发电厂汽轮机，在发电过程中温度升高，为保证发电机的正常发电，就要用水来不断地冷却发电机；炼油厂为了使热的油品冷却到一定的温度，炼成各种油类产品，必须用低于 30℃ 的水通过冷却器，用水吸收热油中的热量，把油的温度降低下来；集中式空调系统在空调制冷的过程中，制冷机温度升高，为保证空调系统正常运行，使制冷机维持在规定的温度范围内，就要用水来连续不断地冷却制冷机。

冷却水的使用范围面广量大，在冶金工业中用大量的水来冷却高炉、平炉、转炉、电炉等各种加热炉的炉体；在炼油、化肥、化工等生产中用大量的水来冷却半成品和产品；在发电厂、热电站则用大量的水来冷凝汽轮机回流水；在纺织厂、化纤厂则用大量水来冷却空调系统及冷冻系统。近年来，高层建筑愈来愈多，其空调系统也需用大量冷却水。这些工业和服务行业冷却水用量占工业用水总量的 70% 左右，其中又以石油、化工和钢铁工业为最高。

如上所述，水在冷却油的全过程中，油的温度降低了，但水自身的温度从原来的 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ 经冷却器后升高到 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ ，那么要继续用水去冷却油，进行循环使用，则必须把水温再降低到 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ ，这叫循环水的冷却。把循环水水温降低下来的设备，总称为冷却构筑物，而通常用的是冷却构筑物中的冷却塔。

二、冷却水用水量

随着现代工业和国民经济的迅速发展，工业用水量也越来越大。用万元产值的用水量来衡量，现已大幅度下降。从平均来看，由 20 世纪 80 年代的 500 多立方米/万元下降到目前的 210 m^3 /万元，有的地方小于 100 m^3 /万元，向世界先进水平靠拢。但因产值成倍增加，国民经济增长迅速，故总的用水量仍呈增加趋势。表 1-1 列出了各行业单位产品用水量的概况，表 1-2 给出了一些工业企业的用水分配情况。

表 1-1 各行业单位产品用水量

产 品	用水量/(m^3 /t)	产 品	用水量/(m^3 /t)
钢铁	300	合成橡胶	125~2800
铝	160	合成纤维	600~2400
煤	1~5	棉纱	200
石油	4	毛织品	150~350
煤油	12~50	醋酸	400~1000

续表

产 品	用水量/(m ³ /t)	产 品	用水量/(m ³ /t)
化肥	50~250	乙醇	200~500
硫酸	2~20	烧碱	100~150
炸药	800	肉类加工	8~35
纸浆	200~500	啤酒	10~20

表 1-2 部分工业企业的用水分配率

%

工业名称	用途及分配比率					
	冷却水	锅炉房	洗涤水	空调	工业用水	其他
石油	90.1	3.9	2.8	0.6		2.6
化工	87.3	1.5	5.9	3.2		2.1
冶金	85.4	0.4	9.8	1.7		2.7
机械	42.8	2.7	20.7	12.8		21.0
纺织	5.0	5.1	29.7	51.8		8.4
造纸	9.9	2.6	82.1	1.3		4.1
食品	48.0	4.4	30.4	5.7	6.0	5.5
电力	99.0	1.0				

第三节 冷却水的循环利用

工业冷却水在各国工业用水总量中都占最大份额。在我国,冷却水量约占工业总用水量的 50%~80%。如一个年产 300kt 的合成氨厂,冷却水量达 23500t/h,一个 $10 \times 10^4 \text{ kW}$ 的火电厂,冷却水量达 9000t/h,一个年产 3500t 聚丙烯的化工厂,冷却水量达 3000t/h 左右。由于冷却水主要是温度升高,水质变化不大,若采取适当措施降温处理后回用,形成循环回用系统,将是节约工业用水的重要途径。

要使工业冷却水形成正常的循环系统,需要采取两项关键的处理措施:一是使升温的冷却水降低到可回用的温度,以保持较好的冷却效果,此过程称为循环水的冷却;二是使循环水质保持稳定,防止换热设备与管路结垢和腐蚀。虽然冷却水在每次使用后的物理性状变化很小,但长期循环使用后,会因水中某些溶解物浓缩或散失、尘土积累、微生物滋生等原因,造成设备内垢物沉积或金属设备表面腐蚀。为防止循环冷却水回用系统中垢物沉积或设备腐蚀而对冷却水进行处理的过程称为循环冷却水处理。

一、冷却水循环利用的意义

1. 节省水资源,缓解水危机

我国淡水资源并不丰富,且时空分布甚不均衡,北方缺水少雨,更显水资源紧张。各地先后不同程度地出现了水危机,有些地方还出现了农业用水、工业与城镇用水、水运、渔业等相互争水问题。

目前我国工业用水约 $605 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,冷却用水按 75%计为 $454 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。如直接排放是对水资源的极大浪费,会增加水资源紧缺矛盾和水危机,如采用冷却后循环使用,则仅补充

蒸发、排污、渗漏的水量，一般不超过 3%，即每年仅补充水量小于 $13.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，节省水资源 $440.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。以年产数万吨的化肥厂为例，每小时用水量为 $6000 \sim 10000 \text{ m}^3$ ，采用循环水回用后，每小时仅需补充新鲜水 $100 \sim 150 \text{ m}^3$ 。

循环冷却水的水质要求并不高，如果把污、废水处理后达到冷却水的水质标准，回用于循环冷却水，则不仅没有占用水资源，而且开辟了第二水源——污废水回用，同时减少了排污量，有利于环境保护和生态平衡。这方面已有不少的成功经验，早在 1990 年太原市北郊污水厂，二级处理 (A^2/O 法) 水量 15 kt/d ，其中 10 kt/d 回用于太原钢铁厂的循环冷却水；1991 年大连春柳河污水厂，二级处理 (常规曝气) 水量 60 kt/d ，其中 10 kt/d 用于化工厂循环冷却水的补充水；1993 年大连开发区污水厂，二级处理 (A/O 法) 水量 60 kt/d ，其中 30 kt/d 用于热电厂循环冷却水；1995 年北京方庄小区污水厂二级处理 (A/O 法) 水量 40 kt/d ，其中 20 kt/d 用于热电厂循环冷却水。著名的北京高碑店污水处理厂，规划二级处理 (常规曝气) 1000 kt/d ，计划 90% 以上回用，其中主要回用于高碑店发电厂的循环冷却水。1996 年之后，大连马栏河污水厂 (A^2/O 法)、邯郸市污水厂 (三沟式氧化沟)、大同市东郊污水厂、西安市污水处理厂、鞍山市污水厂等，污水处理后均回用于循环冷却水。

污水回用首先出现在大连、青岛、北京等水资源紧缺地区，以后逐渐向全国发展，回用的大户是循环冷却水。在我国水资源贫乏、紧缺、普遍出现水危机的情况下，把用水大户——冷却水进行循环使用，这对于缓解水危机、水资源供需矛盾和使国民经济持续发展，是重大的措施和有利的保证。

2. 节能节电，节省投资

冷却水循环利用节省水资源，同时节能节电、节省投资。这些是以冷却水循环利用与直接排放进行比较的。为说清楚问题，以冷却水量 10 kt/d (416 t/h) 为例，进行以下方面比较。

(1) 节能节电比较 虽然冷却水的水质与自来水相比，要求不高，但如果采用冷却后直接排放，则对地面水水源来说，需建水厂净化处理后才能使用。现将建水厂的投资暂不计，先计其节能节电的比较。设从水源取水送至水厂净化处理构筑物的一级泵站扬程为 20 m ，从水厂清水池把水送至冷却设备和产品的二级泵站扬程为 30 m ，则电耗按式 (1-1) 计算：

$$E = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102\eta} T \quad (1-1)$$

式中 E ——一天的电耗， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

ρ ——水的密度， kg/m^3 ；

H ——水泵扬程， m ；

Q ——水泵流量， m^3/h 或 m^3/s ；

η ——电机与水泵的效率，%；

102——单位换算系数， $1 \text{ kW} = 102 (\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}$ 。

取 $\eta = 75\%$ ， $Q = 10000 / (24 \times 3600) = 0.115741 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $T = 24 \text{ h}$ 代入得：

$$E = 1000 \times 0.115741 \times 50 \times 24 / (102 \times 0.75) = 1815.55 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

一年电耗为 $1816 \times 365 = 662840 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，电费以 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 0.6 元计，则一年电费为 39.77 万元。

冷却水循环使用不需要水厂，故不需要一、二级泵站，仅需要 2 台 200 t/h 的冷却塔，逆流式 200 t/h 冷却塔高约 4 m 左右，加上水头损失和出水余压，以 8 m 计，则一天的电耗为：

$$E_1 = 1000 \times 0.115741 \times 8 \times 24 / (102 \times 0.75) = 290.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

一年的电耗为 $106028 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，一年的电费为 6.362 万元，每年节电 $556812 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，节省电费 33.534 万元。

(2) 水处理药剂费及工资 水厂水处理药剂费以每吨水 0.05 元计，则一年的药剂费为 14.6 万元。

10kt/d 水厂，三班制，包括干部、水质化验人员、门卫、驾驶员，还应考虑轮休，以 24 人计，平均工资以 1500 元/(人·月)计，则一年的工资为 43.2 万元。

上述两项为 57.8 万元。

(3) 造价比较 建造产水量为 10kt/d 的水厂，按目前的投资，偏低的估算为 1000 元/t 水，则 10kt/d 水厂需投资 1000 万元。加上土地费、道路、绿化、通电等，远超过 1000 万元。而 2 台冷却水量为 200t/h 的冷却塔，售价仅为 6 万元左右，因此投资(或造价)是无法比较的。

不计水厂造价，仅计上述的电费、药剂费、工资费，循环水冷却与直接排放相比较，每年可节省 91.334 万元，10 年为 913.34 万元。每天循环冷却水 10kt/d 是很小的水量，相当于一般规模的宾馆、饭店的冷却水。对于大型化肥厂、化纤厂、发电厂、钢铁厂等来说，冷却水量在 200kt/d、300kt/d 以上，则节能、节电、节省经费是很可观的。

3. 有利于环境保护和生态平衡

冷却水冷却生产设备、产品、制冷机等，水的自身温度可升到 40°C 、 50°C 以上，而水体的温度(江、河、湖泊等水温)一般 $10\sim 25^\circ\text{C}$ ，若直接排入水体，不仅会产生温差引起的异重流，而且使水体面上产生雾气，更主要的是水体水温升高，使水体中的鱼类、水生物及水生植物等逐渐死亡，使水体及水体周围的生态平衡遭到破坏。同时排放水中含有一定量的污染物，会使水体受到一定的污染。而冷却水循环使用，就不存在热水的排放，也不存在上述的热污染。

二、循环冷却水水源

地面水、地下水、海水等都可以作为冷却水水源。但作为循环冷却水，不同的工业、不同的生产设备、产品、不同的换热器等，其循环冷却水的水质要求也有所不同，不论哪种水源，都应进行净化处理，达到符合水质要求。现将有关水源的特点简述如下。

1. 地面水资源

这里指的地面水不包括含盐高的海水，是指地表淡水。地面水包括江、河、湖泊、水库等水。选择水源的原则是：水源水质良好，水量充沛，便于保护。地面水是循环冷却水的主要水源。地面水的特点是浊度较高，硬度较低，有机物和细菌含量高，水质和水温随季节性变化大，易受人为污染。但地面水取用相对较方便，管理较集中，水量能满足冷却水量的需要。山区性河流水量会受季节变化大的影响，洪水期与枯水期会相差几十倍之多，有些河流洪枯水位的变幅(水位差)竟达 30m 以上，给取水造成很大困难；沿海地区河段会受咸潮的影响；西北、东北的河流会受冰凌及浮冰的影响；有些河段受草、植物等漂浮物的影响，这些都会对构筑物造成复杂性。

不同的地面水，其水质也存在着差异。江河水一般浑浊度、含砂量、悬浮物较高，平原地区河流易受生活污水、工业废水、农田农药等污染，一般水质较差；湖泊水常规来说比江河水水质好，因湖泊相当于一个天然沉淀池，经过沉淀自净作用，去除了部分物质。但湖泊

水流缓慢,春、夏会有藻类繁殖,有些湖泊如巢湖、太湖等,藻类繁殖相当严重,富营养化程度大幅度上升,夏季水明显发臭,对水处理造成很大困难;水库水是由众多的山区小溪汇集而成,水质一般清澈透明,通常浊度 $\leq 5\text{NTU}$,有时 $< 3\text{NTU}$,只有暴雨洪水期浊度大些,但经水库沉淀自净后又会较好。虽然春夏也会有藻类繁殖,但富营养不严重,水库水是地面水中水源水质最好的水。

地面水环境质量标准应按 GB 3838—2002 执行。依据地表水水域环境功能和保护目标,按功能高低划分为 5 类:

I 类:主要适用于源头水、国家自然保护区;

II 类:主要适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵场等;

III 类:主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区;

IV 类:主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区;

V 类:主要适用于农业用水区及一般景观要求水域。

5 类水体的水质标准见《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002)。为避免与城镇供水、渔业用水等争水,循环冷却水的水源应取自 IV 类水体。

2. 地下水水源

地下水埋藏于地下含水层中,由地面水经渗流补给,因在地层中缓慢地渗流,经过地层的自然过滤,水质透明无色,一般不需要处理,作为生活饮用水仅需要消毒;与地面水相比,生物或有机物含量很少,但在渗流过程中溶解了不同的矿物质,其溶解性固体物含量高于地面水;地下水不易直接受地面污染物,卫生条件较好;地下水埋藏在含水层中,水温低,基本上不受气温的影响,常年水温变化不大,是冷却用水和空调用水最为理想的水源,因水温低,冷却效率高,用水量小。

因地下水在渗流过程中溶解了各种矿物质,故含盐量和硬度较高,特别是硬度(Ca^{2+} 、 Mg^{2+}),用作冷却水,在水温升高的过程中更容易形成 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 而沉淀结垢,产生危害。因此硬度高的地下水用作冷却用水时,需要进行适当的软化处理或实施防垢、阻垢、除垢的措施。

3. 海水

海水是量最大的水资源,可以说“取之不完,用之不尽”。但海水含盐量高,平均为 35000mg/L ,腐蚀性特别强,如一般的水泵叶片,使用 3 个月就被腐蚀穿透。对海水进行淡化处理成本很高,我国目前还较难以承受。只有某些沿海和岛屿地方,实在没有淡水源,地下水也为苦咸水,为解决饮用水问题才配备了小量的海水淡化装置。中东海湾地区的国家,因产石油,经济实力雄厚,建造海水淡化水厂来解决淡水资源紧缺的矛盾,大的海水淡化处理厂的处理水量已达到 $20 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

把海水用作冷却水在世界很多国家采用,如美国、英国、法国、日本等。我国沿海地区淡水资源紧缺,而冷却水量又大,故不少地方也用海水冷却,如浙江秦山核电厂、上海石化的发电厂等。用海水冷却必须注意两点:一是直流式冷却,即热水直接排入海中,不存在循环使用;二是设备一定要严格地做好防腐蚀处理。

对于冷却水量大的企业,往往自建自来水厂,从水源取水经水厂净化处理后供循环冷却水的补充水、其他生产用水和生活用水等;民用冷却水(影剧院、体育馆、宾馆饭店、综合