

组编单位：博天环境集团股份有限公司

循环冷却水系统设计指南

主 编：水浩然

副主编：迟 娟 蒋 玮 李 璐 俞 彬

XUNHUAN LENGQUESHUI
XITONG SHEJI ZHINAN

中国建材工业出版社

循环冷却水系统设计指南

主 编 水浩然

副主编 迟 娟 蒋 玮 李 璐 俞 彬

组编单位 博天环境集团股份有限公司



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

循环冷却水系统设计指南 / 水浩然主编; 博天环境
集团股份有限公司组编. --北京: 中国建材工业出版社,
2019. 1

ISBN 978-7-5160-2503-1

I. ①循… II. ①水…②博… III. ①冷却水—冷却
系统—系统设计—指南 IV. ①TV137-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 016670 号

循环冷却水系统设计指南

主 编 水浩然

副主编 迟 娟 蒋 玮 李 璐 俞 彬

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 8

字 数: 140 千字

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

印 次: 2019 年 1 月第 1 次

定 价: 68.00 元

本社网址: www.jcbs.com, 微信公众号: [zgjcgycbs](https://www.weixin.com/zgjcgycbs)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

前 言

我国是水资源短缺的国家。据统计，目前有 300 多个大中城市缺水，其中三分之一城市严重缺水。国外学者认为，人均占有水资源量 1000m^3 是实现现代化的最低标准，我国人均水资源量与这一标准存在较大差距。在我国，华东、华南地区能达到这一标准，而在华北、东北地区要达到水资源人均 500m^3 尚需进行很大投入。故我国在全国范围内节水的任务是很繁重的。

纵观水资源的消耗分配状况，在民用领域，除了人们的日常生活用水，冷却水系统常常在大型公共建筑的空调系统中采用。而在工业用水领域，冷却水的用量有时可达一个企业总用水量的三分之二到四分之三，当冷却水系统从直流型改变成循环型后，能节约用水量百分之九十以上。故为了节约水资源，循环冷却水系统无论在民用或工业领域，都是必须采用的系统。

循环冷却水系统的设计不光是计算、选用冷却塔、循环泵、连接管道和配件，以及检测仪表等系统组件，在循环冷却水系统运行过程中，系统的设备和管道还会发生结垢、腐蚀、微生物滋生等问题，这些问题的产生还需要通过水质处理来解决。本书在重点介绍循环冷却水系统组件计算、选用的同时，也阐述了循环冷却水系统水质处理的原理和运行管理的基本方法。

在本书编写过程中，得到了主编单位博天环境集团股份有限公司的大力支持。博天公司承接了大量石化和其他行业大型企业的循环冷却水工程，公司专门组织现场有经验的工程师撰文介绍了大型循环冷却水工程设计、施工与运行的工程实例，介绍了循环冷却水水质处理方法，丰富了全书的内容。

由于受作者水平和实践经验所限，加之时间仓促，书中若有错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

水浩然
2018.9

目 录

第 1 章	循环冷却水系统组成和原理	1
第 2 章	循环冷却水系统水质处理的基本内容	6
第 3 章	循环冷却水水质结垢与腐蚀的判别	8
第 4 章	循环冷却水系统水量平衡与计算	16
第 5 章	循环冷却水系统水质处理方法介绍	25
第 6 章	循环冷却水系统设计选型与计算	59
第 7 章	循环冷却水系统的运行管理	77
第 8 章	例 题	84
第 9 章	博天环境工程案例	96
第 10 章	附 录	112
参考文献		120

第 1 章 循环冷却水系统组成和原理

用水作为冷却工艺介质的系统称为冷却水系统。我们常遇到的冷却水系统有三种：直流式冷却水系统、敞开式循环冷却水系统和封闭式循环冷却水系统。

在直流式冷却水系统中，冷却水一次性通过换热设备即排放。这种型式的冷却水系统，虽然投资少、操作简便，但是，它用水量大，产生热污染，不符合环保和节约水资源的要求。故在国外已淘汰，在国内早也已列入技术改造的范围。

在敞开式循环冷却水系统中，冷却水用过后不是立即排掉，而是收回循环使用。水的再冷却是通过敞开冷却塔来完成的，冷却水在循环过程中要与空气接触，部分水在通过冷却塔时会不断被蒸发损失掉，因而水中各种矿物质和离子含量不断被浓缩增加。为了维持各种矿物质和离子含量稳定在某一个定值范围，必须对系统补充一定量的冷却水（通常称作补充水），并排出一定量的浓缩水（通常称作排污水）。敞开式循环冷却水系统要损失一部分水，但与直流式冷却水系统相比，能节约大量的冷却水。

封闭式循环冷却水系统又称密封式循环冷却水系统。它也是将冷却水用过后不排掉，而是收回循环使用。与敞开式循环冷却水系统不同的是，封闭式循环冷却水系统是用密封的冷却器代替了敞开的冷却塔，故在循环过程中，冷却水不暴露于空气中，所以除了系统的渗漏之外，水量损失很少，水中各种矿物质和离子含量一般不发生变化。常用的密封冷却器可为空气冷却器或用海水作交换介质的热交换器。这种系统一般用于发电机、内燃机或有特殊要求的单台换热设备。

本书主要介绍敞开式循环冷却水系统。

敞开式循环冷却水系统中主要设备之一是冷却塔。冷却塔的分类方法很多，若按塔内通风方式的不同来分，可分为自然通风式、机械通风式和混合通风式三类。若按水气在塔内的流动方向分，可分为逆流式和横流式两类。所谓逆流式即指水的流动方向与气的流动方向相反；而横流式则是指在水气进行热湿交换的区段，气流是垂直于水流的方向作水平流动的。几种常用冷

却塔的比较见表 1。

表 1 常用冷却塔比较表

名称	优点	缺点	适用条件
自然通风冷却塔	1. 冷效稳定； 2. 风吹水量损失小； 3. 维护简单，管理费用少； 4. 受场地建筑面积影响小	1. 投资多，施工技术复杂； 2. 冬季维护复杂	1. 冷却水量 $>1000\text{m}^3/\text{h}$ ； 2. 高温、高湿、低气压地区，以及水温差 ΔT 要求较高时不宜采用
机械通风冷却塔	1. 冷效高而稳定； 2. 布置紧凑，可设在厂区建筑物和泵站附近； 3. 造价较自然通风塔低	1. 电耗和维护费高； 2. 有一定噪声	1. 气温温度较高地区； 2. 对冷却水温及其稳定性要求严的情况下； 3. 场地狭窄，通风条件稍差的现场
逆流塔	1. 冷效高； 2. 占地面积小； 3. 造价较低	1. 通风阻力大； 2. 淋水密度低于横流塔； 3. 有专门进风口，塔体高，水泵扬程高	1. 淋水密度小； 2. 温度 ΔT 大； 3. 冷幅 Δt 小； 4. 场地不很宽裕的现场
横流塔	1. 通风阻力小，进风均匀； 2. 塔体矮、水泵扬程小，电耗较省； 3. 配水方便	1. 占地大； 2. 单位体积淋水装置的冷效低于逆流塔	1. 淋水密度大，可用于大水量； 2. 温差 ΔT 小； 3. 冷幅 Δt 小

工程中常用的冷却塔简图如图 1-1 所示。

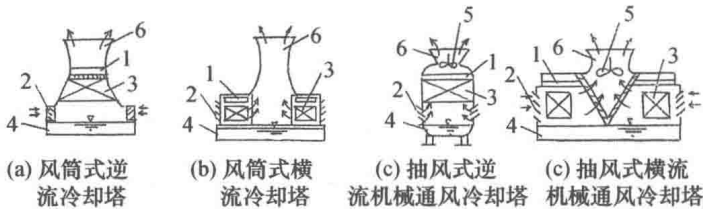


图 1-1 常用冷却塔类型

1—配水系统；2—百叶窗；3—淋水填料；4—集水池（盘）；5—风机；6—风筒

循环冷却水系统除了冷却塔以外，还包括冷、热水池和提升泵。其常规流程如图 1-2 所示。

循环冷却水系统在工程应用时一般有三种形式：

(1) 单元制：单元制循环冷却水系统中，将大系统分成若干个独立单元，每个单元内都有单独的工艺换热器、冷却塔和循环水泵及连接管道等。由于单元制系统适用于中、小型循环冷却水系统，故有时用冷却塔的集水盘加大加深后代替了水池，而省去了冷、热水池。单元制循环冷却水系统如图 1-3 所示。其优点是各单元系统独立运行，互不干扰，管道简洁，操作控制方便。其缺点是管路较多，占用空间大，不能互为备用，但可在循环水水质不同，进、出水温不同时，分单元运行。

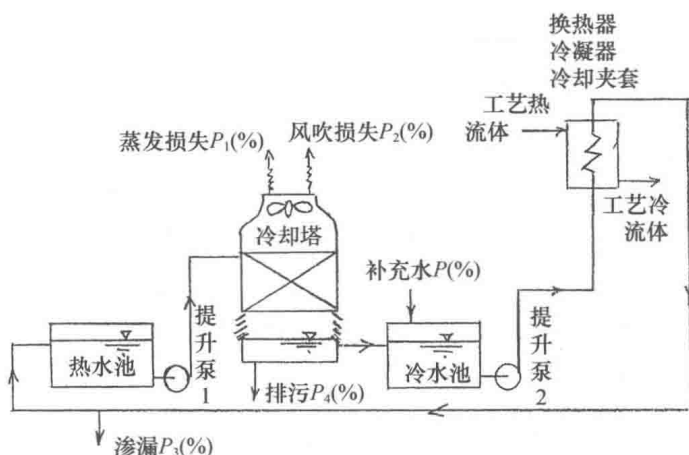


图 1-2 循环冷却水系统流程图

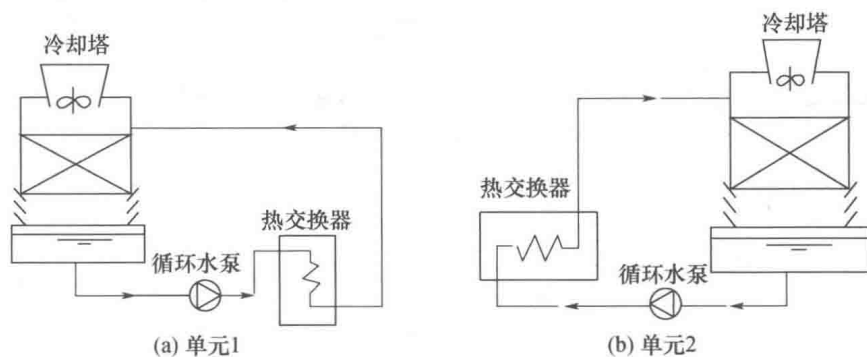


图 1-3 单元制循环冷却水系统

(2) 干管制：干管制循环冷却水系统是将两台或两台以上的工艺热交换设备的冷却水用管道汇集在一起，而将两台或两台以上的冷却塔和循环水泵并联在一起运行，如图 1-4 所示。这种形式的优点是水泵、冷却塔及管路互为备用，提高了系统运行的可靠性，管路占用空间较小。其缺点是运行操作较

复杂，由于干管容积有限，为了防止循环水泵抽空，也不适合用于大型系统及循环水泵经常启停的场合。

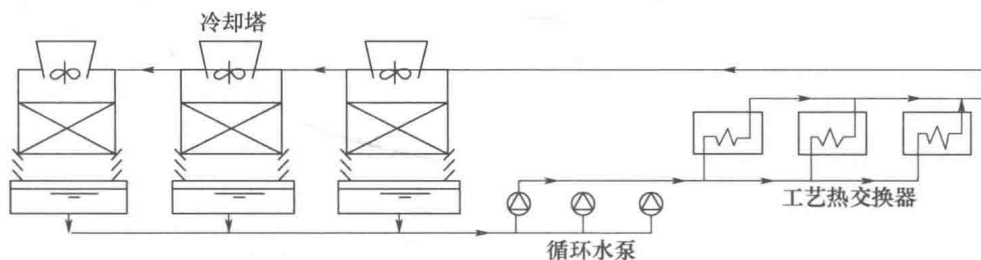


图 1-4 干管制循环冷却水系统

(3) 集水池式循环冷却水系统：该系统设有集水式冷、热水池，以汇集从热交换器和冷却塔下来的水。其优点是特别适合在大型循环冷却水系统中，用水不规律、流量变化较大时使用。这时，热、冷水池起到了调节和均衡水质的作用。实际使用时，有时会取消冷水池，用加大、加深冷却塔底下的集水盘来代替冷水池。集水池式循环冷却系统如图 1-5 所示。

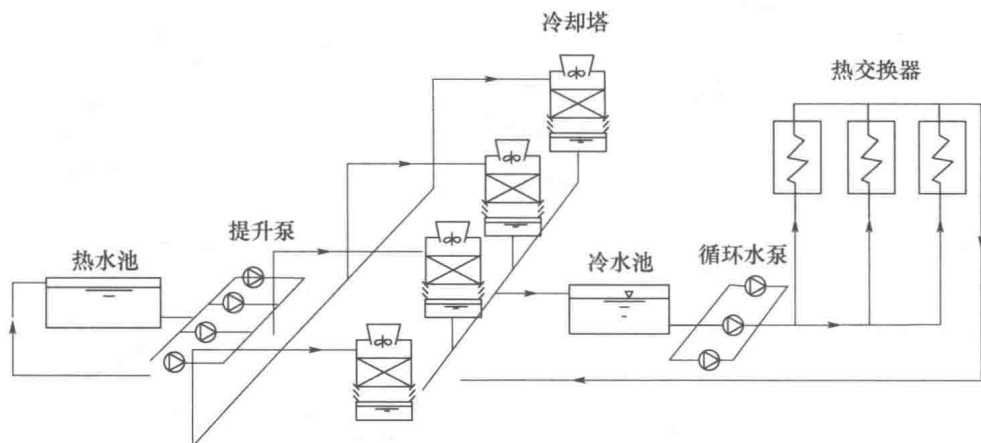


图 1-5 集水池式循环冷却水系统

关于间接传热开式循环冷却水系统的规模，《化学工业循环冷却水系统设计规范》GB 50648—2011 的第 3.3.6 条中有规定：

- (1) 系统能力大于或等于 $15000\text{m}^3/\text{h}$ 时为大型；
- (2) 系统能力大于或等于 $3000\text{m}^3/\text{h}$ 且小于 $15000\text{m}^3/\text{h}$ 时为中型；
- (3) 系统能力小于 $3000\text{m}^3/\text{h}$ 时为小型。

该条文是结合目前国内冷却塔单塔能力、系统组合布置等因素，对循环

冷却水系统大、中、小型规模的范围提出的原则性建议，并非严格的界限，其目的是在工程设计中，便于结合业主要求，根据其规模的大小，考虑监测、控制和视频监视系统的设置及水平。

第 2 章 循环冷却水系统水质处理的基本内容

在循环冷却水系统中，水质引起起垢和腐蚀的现象是比较普通的，循环冷却水水质常常不是起垢就是腐蚀，有时能使两者同时存在。真正稳定型的水，即不结垢又不腐蚀的情况很少。有资料介绍，由于冷却水中钙盐和镁盐的反向溶解性，使水加热到 35℃ 以上时，就有可能析出晶体并吸附在容器和管道的壁上，这就是通常所说的结垢。因此，循环冷却水的结垢或腐蚀问题必须引起人们的重视。

水在管道和用水设备中产生沉积物的现象称为起垢。沉积物也称为污垢，污垢可分为水垢、泥垢、黏垢和腐蚀产物四种。水垢是由溶解性盐类产生沉淀引起的沉积物；泥垢的主要成分是泥土等悬浮物；由微生物所引起的黏状沉积物称为黏垢；腐蚀产物是指由腐蚀引起的铁锈、铁瘤等沉淀物。

冷却水在循环过程中，其水质主要发生了如下变化：

(1) 总溶解固体的浓缩

冷却水在循环运行过程中，由于蒸发、风吹、排污和渗漏四种水量损失，需不断补充一定数量的新鲜水。补充水中含有钙、镁、钠、钾、铁和锰元素的碳酸盐、重碳酸盐、硫酸盐等无机盐和氯化物。开始运行时，循环水质和补充水质相同，随着循环的进行，由于水的蒸发是以不含盐的水蒸气形式散失，使水中的总溶解固体和悬浮物逐渐积累，造成循环水系统中水的含盐量不断增高。

(2) 二氧化碳散失

补充水中钙、镁的碳酸盐、重碳酸盐与二氧化碳之间存在以下化学反应式的平衡关系：



循环冷却水在冷却塔中与空气充分接触时，水中的 CO_2 被空气吹脱而逸入空气中，从上反应式看出，由于 CO_2 的散失，反应向右侧转移，即水中的

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 生成 CaCO_3 、 MgCO_3 沉淀析出，即水质产生了结垢。同时，由于 CO_2 的散失，水中酸性物质减少，不加酸任其自然变化，pH 值就会上升，产生结垢。为了防止结垢，有时需采用加酸法使冷却水的 pH 值降低。

(3) 溶解氧升高

循环水在冷却塔中与空气充分接触，使得空气中的氧能较好地溶解到水中。水吸收空气中的氧，直至水中的氧接近平衡溶解度。冷却塔集水盘或冷水池中含氧接近饱和的水送往换热设备后，由于吸收了热量而使温度升高，从而降低了氧在水中的溶解度。而在 $20^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$ 范围内，水中氧的溶解度随温度升高而逐渐下降，其腐蚀率却是逐渐增加。因此，冷却水系统金属的腐蚀与溶解氧的含量有密切关系，且溶解氧含量高是循环冷却水对金属具有腐蚀性的主要原因之一。

(4) 杂质增多

循环水在冷却塔中吸收和洗涤了空气中的污染物（如 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 等）以及空气中携带的泥灰、尘土和植物的绒毛甚至昆虫等，其结果使水中的杂质增多。在不同地区、季节和时间的空气中，杂质的含量不同，进入循环水的污染量也不同。另外，当热介质发生泄漏时，泄漏的流体也会污染循环水。

(5) 微生物滋生

循环水中含有的盐类和其他杂质量较高，溶解氧充足，温度适宜（一般 $25^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ ），许多微生物（包括细菌、真菌和藻类）能够在此条件下生长繁殖，导致冷却水系统中形成大量黏泥沉淀物，附着在管壁、器壁或填料上，影响水气分布，降低传热效率，加速金属设备的腐蚀，微生物也会使冷却塔中的木材腐朽。

综上所述，冷却水长期循环使用后，会出现结垢、腐蚀、微生物滋生等问题，影响系统的正常运行。循环冷却水处理就是通过添加化学药剂，改变运行条件、改变设备材料性能等，用水质处理的方法来解决这些问题。

具体来说，包括三个方面：

(1) 控制结垢的方法：从冷却水中去除成垢离子，降低补充水浊度；加酸或通 CO_2 气体，降低 pH 值；投加阻垢分散剂等。

(2) 控制腐蚀的方法：添加缓蚀剂；提高冷却水的 pH 值，在碱性条件下运行；选用耐腐蚀材料；控制冷却水的氧含量、pH 值、悬浮物及微生物量等。

(3) 控制微生物的方法：添加杀生剂；选用耐腐蚀材料；控制冷却水的氧含量、pH 值、悬浮物及微生物养料等。

第 3 章 循环冷却水水质结垢与 腐蚀的判别

冷却水中的水垢一般由 CaCO_3 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 CaSO_4 、硅酸钙（镁）等微溶盐组成。由于这些盐类溶解度很小，故特别容易在温度高且水达到过饱和状态时析出盐的结晶。当水流速度较小或传热体表面较粗糙时，这些结晶就容易沉积在传热体表面上，形成水垢。

冷却水系统的腐蚀指的是系统器具和管道的金属表面在周围介质——循环水的作用下，由于化学反应、电化学反应或物理作用而使金属受到破坏或性能恶化的现象。

在循环冷却水中，腐蚀和污垢是两大主要运行障碍。腐蚀产物会形成污垢，污垢又导致腐蚀，两者密切相关，又相互影响。因而在循环冷却水的运行和管理中，需要通盘考虑，进行综合处理。

判断循环冷却水在运行过程中是稳定，还是结垢，或是腐蚀，方法有多种，下面介绍常遇到的两种判别方法：

1. 方法一：Langelier 饱和指数（SI）法：

$$\text{SI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (3-1)$$

式中 pH ——循环冷却水实测 pH 值；

pH_s ——循环冷却水饱和 pH 值，又称碳酸钙饱和 pH 值。

根据饱和指数 SI 来判断冷却水的结垢或腐蚀倾向：

当 $\text{SI} > 0$ 时，水中 CaCO_3 过饱和，有结垢倾向，溶液 pH 值越高， CaCO_3 越容易析出。

当 $\text{SI} = 0$ 时，水中 CaCO_3 刚好达到饱和，此时系统既不结垢，也不腐蚀，水质是稳定的。

当 $\text{SI} < 0$ 时，水中 CaCO_3 未饱和，有过多的 CO_2 存在，将溶解原有水垢，该系统存在腐蚀倾向。

用饱和指数（ SI ）来判断 CaCO_3 结晶或溶解倾向是一种经典方法。以饱和指数（ SI ）来鉴别水质的稳定性，从理论上说是很清楚的，但是它只能说明水质的稳定倾向，并不能指出不稳定的程度。在实际工程中发现按饱和指

数 (SI) 控制循环水系统偏于保守, 有时出现与实际情况不符的现象。有时会出现判断上应当结垢, 实际上没有结垢, 甚至出现腐蚀的现象。

例如有两种水:

(1) 在 75℃ 时, $pH_s=6.0$, 实际 $pH=6.5$, $SI=+0.5$;

(2) 在 75℃ 时, $pH_s=10.0$, 实际 $pH=10.5$, $SI=+0.5$ 。

从饱和指数 SI 看, (1)、(2) 两种水是一样的, 都属于结垢型的, 但实际上不是。为此, 又发展出了其他判断方法。

在公式 (3-1) 中: pH 为循环冷却水实测值。当然最好的方法是建立起循环冷却水系统后再进行实测, 若工程当地有类似规模和运行状态的循环冷却水系统, 也可取自类似系统的 pH 值。若都没法得到时, 也可采用如下方法估算得到。

循环水 pH 值的预测:

循环水的 pH 值主要是决定于循环水中的 $CO_3^{2-}-HCO_3^- - CO_2$ 平衡系统。但是要通过计算来解决这些组分相互关系的联立方程式, 从而推算循环水的 pH 值, 即使数据十分充分, 也是十分冗长而繁杂的。

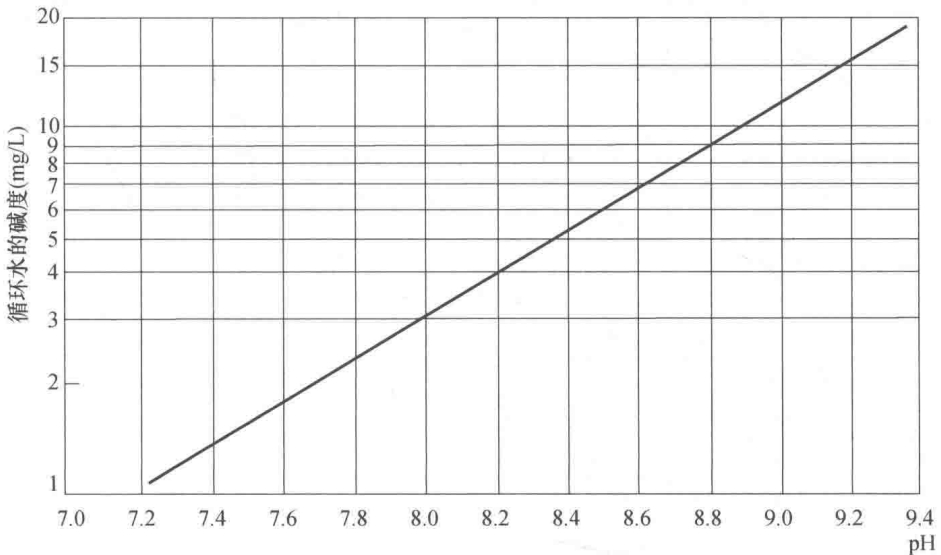


图 3-1 循环水中碱度和 pH 值关系曲线

图 3-1 给出了循环水的碱度和 pH 值之间的关系曲线。它是根据 40 多台不同型式的冷却塔和不同补充水质和不同处理方法, 在回归统计了大约 400 多个数据后绘制而得。

图 3-1 的绘制条件是, 此时水中游离 CO_2 含量范围为 $1\sim 10\text{mg/L}$, 水的温度为 10°C 。若游离 CO_2 增加 1mg/L , 循环水的 pH 会降低 $0.1\sim 0.2$ 个单位; 当循环水的温度从 10°C 增加到 60°C 时, pH 值约降低 0.2 个单位; 总溶解性固体含量 (TDS) 对循环水的 pH 值也有一定影响, 当 TDS 增加 3000mg/L 时, pH 将降低 0.1 个单位。

应该指出, 从补充水水质到循环水水质, 在不发生碳酸钙沉积的情况下, 循环水的总碱度大致可由补充水碱度乘以浓缩倍数来求得。

在公式 (3-1) 中, pH_s 为饱和 pH 值, 也称被碳酸钙饱和的 pH 值。它的计算方法如下:

(1) 已知循环水的 TDS、水温、钙硬度和总碱度, 用公式 (3-2) 求得:

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (3-2)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D ——系数, 可查表 3-1 得到。

表 3-1 A、B、C、D 系数换算表

TDS (mg/L)	A	温度 ($^\circ\text{C}$)	B	Ca^{2+} 硬度或总碱度 (以 CaCO_3 计, mg/L)	C 或 D	Ca^{2+} 硬度或总碱度 (以 CaCO_3 计, mg/L)	C 或 D
45	0.07	0	2.60	10	1.00	120	2.08
60	0.08	2	2.54	12	1.08	130	2.11
80	0.09	4	2.49	14	1.15	140	2.15
105	0.10	6	2.44	16	1.20	150	2.18
140	0.11	8	2.39	18	1.26	160	2.20
175	0.12	10	2.34	20	1.30	170	2.23
220	0.13	15	2.21	25	1.40	180	2.26
275	0.14	20	2.09	30	1.48	190	2.28
340	0.15	25	1.98	35	1.54	200	2.30
420	0.16	30	1.88	40	1.60	250	2.40
520	0.17	35	1.79	45	1.65	300	2.48
640	0.18	40	1.71	50	1.70	350	2.54
800	0.19	45	1.63	55	1.74	400	2.60
1000	0.20	50	1.55	60	1.78	450	2.65
1250	0.21	55	1.48	65	1.81	500	2.70
1650	0.22	60	1.40	70	1.85	550	2.74
2200	0.23	65	1.33	75	1.88	600	2.78
3100	0.24	70	1.27	80	1.90	650	2.81
≥ 4000	0.25	80	1.16	85	1.93	700	2.85

第 3 章 循环冷却水水质结垢与腐蚀的判别

续表

TDS (mg/L)	A	温度 (°C)	B	Ca ²⁺ 硬度或总碱度 (以 CaCO ₃ 计, mg/L)	C 或 D	Ca ²⁺ 硬度或总碱度 (以 CaCO ₃ 计, mg/L)	C 或 D
≤13000				90	1.95	750	2.88
				95	1.98	800	2.90
				100	2.00	850	2.93
				105	2.02	900	2.95
				110	2.04		

(2) 已知循环水的总碱度、钙硬度和电导率, 用公式 (3-3) 求得:

$$\text{pH}_S = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3-3)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 ——系数, 可查表 3-2 得到。

表 3-2 系数 C_1 、 C_2 、 C_3 换算表

总碱度 [H ⁺] (mmol/L)	C ₁	钙硬度 (德国度)	C ₂	电导率 (μS/cm)	C ₃
0.0	1.0	5.0	3.06	300	1.68
0.1	3.8	5.6	3.01	320	1.69
0.2	3.7	6.8	2.94	400	1.70
0.3	3.6	7.8	2.87	520	1.71
0.4	3.4	9.0	2.80	600	1.72
0.5	3.33	10.0	2.76	800	1.73
0.6	3.23	11.2	2.70	900	1.74
0.7	3.15	12.0	2.67	1000	1.75
0.8	3.1	13.4	2.63	1200	1.76
0.9	3.06	14.4	2.60		
1.0	3.00	15.6	2.56		
1.2	2.91	16.6	2.52		
1.4	2.85	18.0	2.49		
1.6	2.8	20.0	2.46		
1.8	2.74	22.0	2.38		
2.0	2.70				
2.4	2.63				
2.8	2.56				
3.2	2.50				
3.6	2.45				

电导率最好由已运行的循环冷却水系统提供, 当无法提供时, 也可采用

如下方法粗算得到:

① 循环水的电导率可粗略地用其 TDS 值除以 0.55~0.7 之间的一个系数而算得。

② 在取得循环水中各种离子的情况下,用公式(3-4)求得:

a. 算出循环水的离子强度 I

$$I = 2.5 \times 10^{-5} \times C_r \quad (3-4)$$

式中 I ——离子强度, g/L;

C_r ——循环冷却水的含盐量(可用 TDS 替代), mg/L。

b. 求出水中第 i 种价离子的活度系数 f_i

$$\lg f_i = -A \cdot Z_i^2 \cdot \left(\frac{I^{1/2}}{1+I^{1/2}} - 0.2I \right)$$

$$f_i = 10^{-A \cdot Z_i^2 \cdot \left(\frac{I^{1/2}}{1+I^{1/2}} - 0.2I \right)} \quad (3-5)$$

式中 f_i ——水中第 i 种价离子的活度系数;

A ——活度系数计算常数,可取 0.5;

Z_i ——水中第 i 种离子的价数。

c. 求得第 i 种价离子的活度 a_i

$$a_i = f_i \cdot C_i \quad (3-6)$$

式中 a_i ——水中第 i 种价离子的活度;

C_i ——水中第 i 种价离子的浓度, mg/L;

f_i ——水中第 i 种价离子的活度系数。

d. 再采用公式(3-7)计算循环冷却水的电导率 F :

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

$$= a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n \quad (3-7)$$

式中 F ——循环冷却水的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$;

F_1, F_2, \dots, F_n ——循环冷却水中含各种离子的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$;

b_1, b_2, \dots, b_n ——冷却水中各种价离子在 25℃、1mg/L 浓度下的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。可查表 3-3 取得。

表 3-3 各种离子的电导率

离子种类	电导率 b_i (25℃、浓度为 1mg/L 时) $\mu\text{S}/\text{cm}$	离子种类	电导率 b_i (25℃、浓度为 1mg/L 时) $\mu\text{S}/\text{cm}$
Al^{3+}	3.44	Fe^{3+}	3.65
HCO_3^-	0.715	Mg^{2+}	3.82