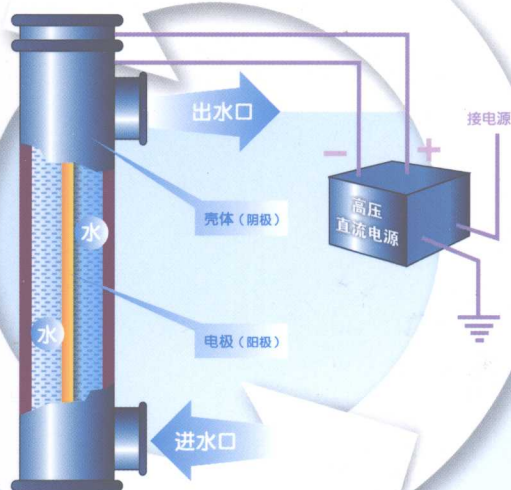


工业冷却水处理的物理方法及工程应用

周本省 编著



化学工业出版社



工业冷却水处理的 物理方法及工程应用

周本省 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工业冷却水处理的物理方法及工程应用/周本省编著.
北京: 化学工业出版社, 2008.7
ISBN 978-7-122-03160-0

I. 工… II. 周… III. 工业用水: 冷却水-水处理-研究 IV. TU991.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 091135 号

责任编辑: 刘丽宏

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 宋 夏

装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 12½ 字数 251 千字 2008 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

冷却水系统在运行过程中常常会遇到一些问题，例如：结垢、腐蚀、微生物、清洗等。这时，人们通常向冷却水中添加一些专用的化学药剂来进行水处理，称为冷却水处理的化学方法。还有一些不依靠添加化学药剂来进行水处理的非化学方法，我们把它们简称为水处理的物理方法。例如：采用静电水处理和电子水处理的电学处理方法；利用牺牲阳极或外加电流的电化学保护法（牺牲阳极阴极保护法和外加电流阴极保护法）和采用不锈钢和超级不锈钢、钛及耐蚀钛合金的耐蚀合金保护法等。

本书作为目前国内流行的冷却水处理方法——化学法的补充，一方面是希望这些方法的使用能降低冷却水处理对环境的污染，另一方面是希望向读者介绍一些较新的物理处理方法，使化学处理和物理处理这两种方法能彼此取长补短，互为补充，让水处理技术百花齐放！

本书重点介绍了静电水处理、电子水处理法、阴极保护法及利用不锈钢、超级不锈钢和钛、耐蚀钛合金制作水处理设备器件的典型水处理实例。

本书在编写过程中，得到了中国科学院上海微系统与信息技术研究所徐乃欣研究员、计又为副编审、王才虎高工、陶秀英工程师、姜兰英工程师等同志的支持。江苏省静电水处理技术推广中心、江苏核工业格林水处理有限公司为本书的第1章提供了不少资料。上海电力学院的吴一平高级工程师、梁磊高级工程师、葛红花教授等为本书第3章中的不锈钢部分提供了大量资料。在此一并表示衷心的感谢！

周本省

目 录

绪 论

一、冷却水处理的一般方法	1
二、物理方法与化学方法的对比	2

第 1 章 静电水处理与电子水处理及其在冷却水处理中的应用

1.1 静电水处理	5
1.1.1 概述	5
1.1.2 静电水处理器的技术参数	5
1.1.3 静电水处理的阻垢试验	6
1.1.4 静电水处理的杀菌试验	8
1.1.5 静电水处理的灭藻试验	9
1.1.6 静电水处理阻垢作用的机理	11
1.1.7 离子棒静电水处理器	15
1.1.8 静电水处理的优点与缺点	16
1.2 电子水处理	17
1.2.1 电子水处理与静电水处理的异同	17
1.2.2 电子水处理杀菌灭藻效果的试验研究	18
1.3 静电水处理器及电子水处理器的系列产品	20
1.3.1 SH 系列静电水处理器	20
1.3.2 EH 系列电子水处理器	21
1.4 应用实例	23
1.4.1 静电水处理在钢铁厂中的应用	23
1.4.2 静电水处理在化肥厂中的应用	24
1.4.3 静电水处理在啤酒厂中的应用	26
1.4.4 静电水处理在制药厂中的应用	27
1.4.5 静电水处理在味精厂中的应用	28
1.4.6 静电水处理在石油基地供热水系统中的应用	29
1.4.7 静电水处理在游泳池水消毒中的应用	31
1.4.8 电子水处理在热水锅炉上的应用	32
1.4.9 静电水处理与电子水处理在中央空调系统中的应用	34
1.4.10 静电水处理与电子水处理在卷烟厂中的应用	35
1.4.11 离子棒静电水处理在氯碱工厂中的应用	37
1.4.12 离子棒静电水处理在制氧厂空冷循环水系统中的应用	38

1.4.13 离子棒静电水处理在农药厂循环冷却水系统中的应用	40
参考文献	41

第2章 阴极保护及其在冷却水处理中的应用

2.1 阴极保护	43
2.1.1 阴极保护的原理	43
2.1.2 阴极保护的用途	48
2.1.3 阴极保护方法的种类和选择	49
2.1.4 两类阴极保护方法的对比	49
2.2 阴极保护的保护电位值	50
2.2.1 保护电位值	50
2.2.2 保护电位值之间的换算	50
2.3 阴极保护所需的总电流	52
2.4 牺牲阳极阴极保护	52
2.4.1 牺牲阳极的材料及相应的牺牲阳极	52
2.4.2 牺牲阳极的规格	60
2.4.3 牺牲阳极的安装	61
2.4.4 带状镁基牺牲阳极	62
2.4.5 钛铜共用海水冷却器的牺牲阳极阴极保护	63
2.5 外加电流阴极保护	64
2.5.1 辅助阳极	64
2.5.2 参考电极	66
2.5.3 阳极屏	67
2.5.4 直流电源	67
2.5.5 保护电位	68
2.6 阴极保护的应用实例	69
2.6.1 海水换热器的牺牲阳极阴极保护	69
2.6.2 海水凝汽器的联合保护	71
2.6.3 冷却水输水管道内壁的阴极保护	72
2.6.4 淡水换热器的牺牲阳极阴极保护	74
2.6.5 炼油厂水冷器的电偶腐蚀及其牺牲阳极阴极保护	79
2.6.6 化纤厂纺丝生产线油冷器的牺牲阳极阴极保护	80
2.6.7 输水管道外壁涂料-阴极保护的联合保护	83
2.6.8 淡水输水管道外加电流阴极保护的设计与应用	84
2.6.9 深井阳极技术在城市大口径供水旧管线阴极保护中的应用	88
2.6.10 海水输送管线内铝合金牺牲阳极阴极保护的设计	92
2.6.11 不锈钢换热器法兰密封面上的缝隙腐蚀及其阴极保护	95
2.6.12 石化厂碳钢水冷器的锌合金牺牲阳极阴极保护	96

2.6.13	蒸汽喷射真空泵冷凝器涂料-镁合金牺牲阳极的联合保护	99
2.6.14	1Cr18Ni9Ti 不锈钢海水循环水泵的涂料-阴极保护的联合保护	102
参考文献		104

第3章 不锈钢和超级不锈钢及其在冷却水处理中的应用

3.1	不锈钢	106
3.1.1	不锈钢的分类	106
3.1.2	不锈钢在冷却水处理中的应用	107
3.2	铁素体不锈钢	108
3.2.1	概述	108
3.2.2	铁素体不锈钢的分类	108
3.2.3	普通铁素体不锈钢	109
3.2.4	高纯铁素体不锈钢	110
3.3	奥氏体不锈钢	112
3.3.1	概述	113
3.3.2	奥氏体不锈钢的物理性能	114
3.3.3	奥氏体不锈钢的力学性能	114
3.3.4	奥氏体不锈钢的焊接性能	116
3.3.5	奥氏体不锈钢在水溶液中的耐蚀性	117
3.4	双相不锈钢	130
3.4.1	概述	130
3.4.2	双相不锈钢的成分与组织	130
3.4.3	双相不锈钢的物理性能和力学性能	133
3.4.4	双相不锈钢的焊接性能	134
3.4.5	双相不锈钢的耐蚀性	134
3.5	普通不锈钢在淡水冷却水系统中的应用实例——不锈钢管凝汽器	138
3.5.1	不锈钢管凝汽器 (一)	138
3.5.2	不锈钢管凝汽器 (二)	141
3.5.3	不锈钢冷却管凝汽器的组装	144
3.5.4	不锈钢波纹管凝汽器	145
3.5.5	不锈钢多向扰流强化换热管凝汽器	148
3.6	超级不锈钢	151
3.6.1	进一步提高不锈钢耐蚀性的主要途径	152
3.6.2	表征不锈钢耐局部腐蚀性能的指数——耐点蚀当量	153
3.6.3	超级铁素体不锈钢	155
3.6.4	超级奥氏体不锈钢	156
3.6.5	超级双相不锈钢	157
3.7	超级不锈钢在海水冷却水系统中的应用实例——超级不锈钢管凝汽器	158

3.7.1	254SMO 不锈钢的性能	159
3.7.2	254SMO 超级不锈钢的应用实例	160
	参考文献	160

第 4 章 钛和耐蚀钛合金及其在冷却水处理中的应用

4.1	钛和钛制耐蚀设备及在冷却水处理中的应用	162
4.1.1	钛制耐蚀设备的应用	162
4.1.2	钛在耐蚀金属材料中的重要性	163
4.1.3	钛制耐蚀设备的经济性	163
4.1.4	钛的使用范围	164
4.1.5	钛材的选用	164
4.1.6	钛的物理性能	165
4.1.7	钛的化学性能	165
4.1.8	钛的耐蚀性能	166
4.2	钛凝汽器在滨海电厂中的应用	168
4.2.1	海水凝汽器(换热)管用材的发展	168
4.2.2	钛凝汽器管的选用	171
4.2.3	钛凝汽器应用的发展趋势	174
4.3	钛在炼油化工行业中的应用	175
4.3.1	炼化设备用钛的一些腐蚀环境	176
4.3.2	钛对一些腐蚀性物质的耐蚀性	176
4.3.3	钛在炼油化工装置中的应用	178
4.3.4	应用实例	181
4.4	耐蚀钛合金及其应用	185
4.4.1	耐蚀钛合金	185
4.4.2	钛钎合金	187
4.4.3	Ti-0.3Mo-0.8Ni	187
	参考文献	188

绪 论

在工业生产过程中，常常需要将工艺物质进行冷却。用以带走工业生产过程中的热量的冷却用水称为冷却水。

一、冷却水处理的一般方法

冷却水系统在运行过程中常常会遇到一些问题，例如：结垢、腐蚀、微生物、清洗等。冷却水系统中的结垢问题主要是水中的碳酸氢钙 $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ 受热或曝气后转变成碳酸钙 (CaCO_3) 沉淀而引起的；碳钢在冷却水中的腐蚀则是冷却水中的溶解氧与碳钢上的铁原子之间的电化学反应而引起的；冷却水中的微生物则主要是冷却水水中的条件特别有利于藻类、真菌和细菌生长繁殖的结果。结垢、腐蚀和微生物生长会造成冷却水系统中金属设备的破坏，冷却效率的降低，水质的污染等问题。这时人们通常采取以下一些方法来控制。

① 向冷却水中添加一些缓蚀剂，例如：聚磷酸盐、锌盐、硅酸盐、亚硝酸盐、钼酸盐、氨基三亚甲基膦酸 (ATMP)、羟基亚乙基二膦酸 (HEDP)、乙二胺四亚甲基膦酸 (EDTMP)、2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸 (PBTCA) 或多氨基多醚基亚甲基膦酸 (PAPEMP) 等来控制或降低冷却水中碳钢的腐蚀速度；添加巯基苯并噻唑 (MBT) 或苯三氮唑 (BTA)，来降低铜和铜合金在冷却水中的腐蚀速度。

② 向冷却水中添加一些阻垢剂和分散剂，例如：氨基三亚甲基膦酸 (ATMP)、羟基亚乙基二膦酸 (HEDP)、乙二胺四亚甲基膦酸 (EDTMP)、2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸 (PBTCA)、多元醇磷酸酯 (POE) 和多氨基多醚基亚甲基膦酸 (PAPEMP)^①、聚丙烯酸 (PAA)、聚马来酸 (水解聚马来酸酐, HPMA)、丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物或聚环氧琥珀酸 (PESA) 等，来控制冷却水中水垢和污垢的生成。

③ 向冷却水中添加一些杀生剂来控制冷却水中微生物的生长。冷却水中常用的杀生剂分为两大类：一类被称为氧化性杀生剂，例如：氯 (Cl_2)、次氯酸钠 (NaClO)、二氧化氯 (ClO_2)、三氯化异氰尿酸 (强氯精) 和二氯化异氰尿酸钠 (优氯净)、臭氧 (O_3) 和溴等；另外一类被称为非氧化性杀生剂，例如：双氯酚、

① ATMP、HEDP、EDTMP、PBTCA、POE 和 PAPEMP 等有机膦酸及其盐类在冷却水中既有阻垢作用，又有缓蚀作用，故被人们称为阻垢缓蚀剂。

洁尔灭（十二烷基二甲基苄基氯化铵）、新洁尔灭（十二烷基二甲基苄基溴化铵）、二硫氰基甲烷、双（三正丁基锡）氧化物、铜盐、异噻唑啉酮等。

④ 对已有沉积物（水垢、污垢等）的冷却水系统则添加酸或碱、或络合剂、或聚电解质、或表面活性剂、或杀生剂、或有机溶剂分别进行酸清洗、或碱清洗、或聚电解质清洗、或表面活性剂清洗、或杀生剂清洗、或有机溶剂清洗以除去冷却水中的水垢、污垢和微生物，提高冷却水的冷却效果。

由以上可见，上述这些水处理方法的特点是向冷却水中添加一些专用的化学药剂来进行水处理的，故被称为冷却水处理的化学方法。由于这种处理是将冷却水的pH值及其化学性质控制在既不结垢又不腐蚀的水质稳定状态，故又被称为水质稳定法。

二、物理方法与化学方法的对比

除上述水处理的一些化学方法外，还有一些不依靠添加化学药剂来进行水处理的非化学方法，我们把它们简称为水处理的物理方法，例如：采用静电水处理和电子水处理的电学处理方法；利用牺牲阳极或外加电流的电化学保护法（牺牲阳极阴极保护法和外加电流阴极保护法）和采用不锈钢和超级不锈钢、钛及耐蚀钛合金的耐蚀合金保护法等。和物理方法相比，化学方法存在以下一些不足。

① 化学方法对环境有污染，例如，我们在对冷却水系统进行清洗时，通常要向水中加入大量有腐蚀性的酸——无机酸和缓蚀剂。清洗结束后，若废液不处理就直接排放入环境时，就会对环境造成污染。

② 在冷却水系统日常运行时，为控制其腐蚀和结垢，需要添加一些缓蚀剂和阻垢剂。此时，人们通常选择一些有机膦酸盐和无机磷酸盐作为缓蚀剂和阻垢剂加入冷却水中。这些膦酸盐和磷酸盐往往是冷却水中微生物生长的有效养分，容易造成水中赤潮，为此对其排放水中的磷含量应有严格的要求。

③ 日常运行时化学药剂的消耗较大。和外加电流阴极保护法或静电水处理法相比，化学法的设备较为简单，一次性投资较小，这是它的优点。但化学法应用于循环冷却水系统时，由于大部分循环冷却水系统不是完全密闭的系统。它们一边不断地进入补充水，一边又不断地排出排污水，所以它们实际上仅是一种半密闭（封闭）系统。加入水中的缓蚀剂、阻垢剂、分散剂和杀生剂在冷却水的运行过程中随冷却水不断地被排放掉，从而需要不断地补充，否则冷却水中的药剂很快将消耗尽。

现以一个循环水量为 $10000\text{m}^3/\text{h}$ 的冷却水系统为例，对其药剂的消耗量进行粗略的估算。

设该冷却水系统的循环水量为 $10000\text{m}^3/\text{h}$ ，冷却水的浓缩倍数为 3.0，进出口水的温差为 $\Delta t = 10.0^\circ\text{C}$ 。

经计算，得其 1h 的排污损失水量 $B = 87.2\text{m}^3/\text{h}$ ，蒸发损失水量 $E = 174.4\text{m}^3/\text{h}$ 。

2 工业冷却水处理的物理方法及工程应用

1d 的排污损失水量=87.2m³/h×24h/d=2092.8m³/d
 1a 的排污损失水量=87.2m³/h×24h/d×360d/a=7.534×10⁵m³/a
 =7.534×10⁵t/a

设排污水中的药剂（阻垢剂和缓蚀剂）含量为 25mg/L（25ppm），则：
 年消耗药剂（以纯组分计）的量为 7.534×10⁵t/a×25×10⁻⁶=18.84t/a
 即每年需排放掉的药剂量为 18.84t（以 100%的纯物计时）或 37.67t（以含量为 50%计时）。

由此可见，化学法的一次投资虽较小，但其日常的药剂开支却相当大！

④ 人员和设备的配置。并不是所有的水都可以用作冷却水的补充用水和循环用水。中华人民共和国国家标准《工业循环冷却水处理设计规范》GB 50050—2007 中规定：间接冷却敞开式系统循环冷却水的水质指标应符合表 0-1 中的各项规定。

表 0-1 间接冷却敞开式系统循环冷却水的水质指标

项 目	单位	要求或使用条件	许 用 值
浊度	NTU	根据生产工艺要求确定	≤20
		换热设备为板式、翅片管式、螺旋板式	≤10
pH 值			6.8～9.5
钙硬度+甲基橙碱度(以 CaCO ₃ 计)	mg/L	磷酸钙稳定指数 RSI≥3.3	≤1100
		传热面水侧壁温>70℃	钙硬度<200
总 Fe	mg/L		≤1.0
Cu ²⁺	mg/L		≤0.1
Cl ⁻	mg/L	碳钢、不锈钢换热设备,水走管程	≤1000
		不锈钢换热设备,水走壳程传热面水侧壁温≤70℃ 冷却水出水温度小于 45℃	≤700
SO ₄ ²⁻ +Cl ⁻	mg/L		≤2500
硅酸(SiO ₂ 计)	mg/L		≤175
$\frac{[Mg^{2+}]\times[SiO_2]}{([Mg^{2+}]\text{以 }CaCO_3\text{ 计})}$	mg/L	pH≤8.5	≤50000
游离氯	mg/L	循环回水总管处	0.2～1.0
NH ₃ -N	mg/L		≤10
石油类	mg/L	非炼油企业	≤5
		炼油企业	≤10
COD _{Cr}	mg/L		≤100

为此，各冷却水系统用户都必须选择符合于表 0-1 中指定的水质指标的水源，同时工厂还要配备相应的测试装置和技术人员，对其冷却水系统的补充水水质和循环水水质进行日常的检测。

⑤ 水源的选择。一般地说，采用缓蚀剂、阻垢剂、杀生剂作为某冷却水系统

的水质稳定剂（水处理剂）时，都是选择水质较为优良的水源作为该循环水系统的补充水。因此，大部分的循环冷却水都选用优质淡水作为补充水，因为一般淡水的碱度和硬度较低，含盐量较少，腐蚀性较弱或结垢倾向较小。此时一些常用的缓蚀剂、阻垢剂、分散剂等就可以抑制其对碳钢设备的腐蚀作用和结垢作用。但是随着工业的发展、人口的增加、生产规模的扩大，优质淡水越来越少，而很多大型企业，例如：核电站、滨海大型电站、炼油厂、石油化工厂、采油平台等的大量发展，又需要大量的冷却水和补充水，在那里淡水的供应就成为一个严重的问题，只能采用海水或半咸水作补充水。那时采用一些常用的缓蚀剂来防止常用金属（碳钢）设备的腐蚀就不大有效了，即采用一般的化学法（加药）进行水处理的结果不太好，此时必须采用耐蚀的金属和合金，例如采用不锈钢或超级不锈钢、钛或耐蚀钛合金等来制造冷却设备或采用阴极保护法对铜合金冷凝器进行阴极保护了。

表 1-0-1 工业冷却水水质标准

项目	单位	标准	备注
总硬度	mg/L	≤100	以 CaCO ₃ 计
总碱度	mg/L	≤100	以 CaCO ₃ 计
pH 值		7.0~9.0	
溶解氧	mg/L	≤0.1	
氯离子	mg/L	≤100	
硫酸根	mg/L	≤100	
铜离子	mg/L	≤0.1	
铁离子	mg/L	≤0.1	
锌离子	mg/L	≤0.1	
镍离子	mg/L	≤0.1	
钼离子	mg/L	≤0.1	
氟离子	mg/L	≤0.1	
氨氮	mg/L	≤0.1	
亚硝酸盐氮	mg/L	≤0.1	
硝酸盐氮	mg/L	≤0.1	
总磷	mg/L	≤0.1	
总氮	mg/L	≤0.1	
电导率	μS/cm	≤1000	

工业冷却水水质标准中 1-0-1 表为工业冷却水水质标准，此表为工业冷却水水质标准，其标准值为：总硬度 ≤100 mg/L，总碱度 ≤100 mg/L，pH 值 7.0~9.0，溶解氧 ≤0.1 mg/L，氯离子 ≤100 mg/L，硫酸根 ≤100 mg/L，铜离子 ≤0.1 mg/L，铁离子 ≤0.1 mg/L，锌离子 ≤0.1 mg/L，镍离子 ≤0.1 mg/L，钼离子 ≤0.1 mg/L，氟离子 ≤0.1 mg/L，氨氮 ≤0.1 mg/L，亚硝酸盐氮 ≤0.1 mg/L，硝酸盐氮 ≤0.1 mg/L，总磷 ≤0.1 mg/L，总氮 ≤0.1 mg/L，电导率 ≤1000 μS/cm。

第 1 章

静电水处理与电子水处理 及其在冷却水处理中的应用

1.1 静电水处理

1.1.1 概述

静电水处理 (Electrostatic Water Treatment) 法又称高压静电法。它的核心部分是一台静电水处理器 (又称为静电水垢控制器、静电水发生装置等)。其结构如图 1-1 所示。

静电水处理器由两部分组成: 水处理器和高压直流电源。

水处理器是将一根导电良好的金属芯棒 (钢棒或不锈钢管) 置于四氟乙烯套管 (或圆筒) 内作阳极, 将镀锌的无缝钢管制成的壳体作阴极。阳极和阴极之间保持一定的距离, 从而两者之间形成一个腔体, 以便让需要进行静电处理的水能从阳极和阴极之间的腔体内通过, 并进行静电处理。水在腔体内经受静电场处理后, 再进入用水设备。

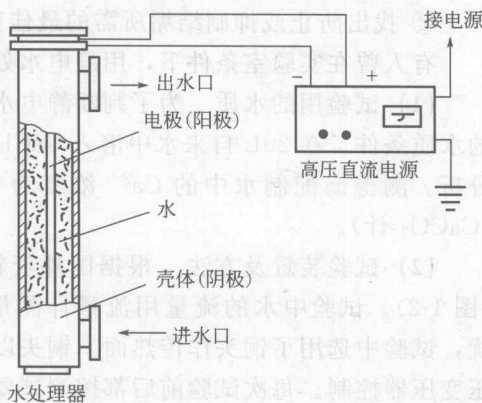


图 1-1 静电水处理器的结构示意图

高压直流电源的作用是向水处理器提供所需的高压直流电。它的输出电压的正端与水处理器的金属芯棒 (阳极) 相连接; 它的输出电压的负端则与水处理器的壳体 (阴极) 相连接。之后, 高压直流电就在水处理器的腔体内产生一个强的静电场, 对流过腔体内的冷却水进行静电水处理。

水处理器两端的外加直流静电电压通常为 $3400 \sim 6000\text{V}$ 。

1.1.2 静电水处理器的技术参数

现以 ESC-100 型静电水处理器为例, 介绍其有关的技术参数:

高压直流电源的输入电压(交流)/V	220	进水口直径/mm	76.2
高压直流电源的输出电压(直流)/kV	4~5	出水口直径/mm	101.6
水处理器外管内径/mm	150	电耗/W	15
水处理器外管长度/m	1.2	运行方式	连续
聚四氟乙烯管外径/mm	110	水温/℃	<90
聚四氟乙烯管击穿电压/kV	10	最大流量/(t/h)	100
聚四氟乙烯管抗拉强度/MPa	19.6	外形尺寸/mm	1200×280×450
聚四氟乙烯管断裂延伸率/%	≥250		

1.1.3 静电水处理的阻垢试验

工业上使用的敞开式循环冷却水系统一般具有以下的特点：

- ① 水通过换热器对工艺介质进行冷却；
- ② 水中的成垢离子主要是 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ；
- ③ 水以一定的流速循环流动；
- ④ 水与大气相接触，且在冷却塔内充分曝气。

静电水处理阻垢试验的目的是在实验室的条件下，在模拟冷却水系统的一些特点的装置中分别在水通过和水不通过静电水处理器时观察和测量金属传热表面上的结垢情况，去了解 and 判断：

- ① 静电水处理能否抑制或阻止水的结垢；
- ② 找出防止或抑制结垢所需的最佳直流静电电压。

有人曾在实验室条件下，用静电水处理器进行了以下的阻垢试验。

(1) 试验用的水质 为了判断静电水处理器能否阻垢，该试验特意选择了苛刻的水质条件。在 20L 自来水中溶入 CaCl_2 12.2g 和 NaHCO_3 14.2g，然后进行水质分析。测得该配制水中的 Ca^{2+} 浓度为 590mg/L (CaCO_3 计)，碱度为 488mg/L (CaCO_3 计)。

(2) 试验装置及方法 根据国外资料，设计了有传热面的动态结垢试验装置(图 1-2)。试验中水的流量用流量计测量及控制。为了排除腐蚀因素对结垢的干扰，试验中选用了铜头作传热面。铜头以安装在内部的电热丝加热，其温度则由调压变压器控制。每次试验前后都按测试要求，对铜头、水槽、管道等进行处理和清洗。结垢试验前后的铜头都用精度为 1/10000 的天平称重。试验中是以铜头的增重值作为垢的重量，并据此来判断静电水处理器的阻垢作用。同时，还每隔 1h 测定一次水的硬度、碱度和 pH 值作为参考。试验过程中铜头上的垢层、颜色及结晶情况可透过有机玻璃套筒进行观察。空白试验是指水不通过静电水处理器时作的试验。

(3) 选择最佳直流静电电压的试验

① 试验的条件

水温	50℃	流量计读数	20 格
铜头表面温度	约 100℃	试验时间	6h

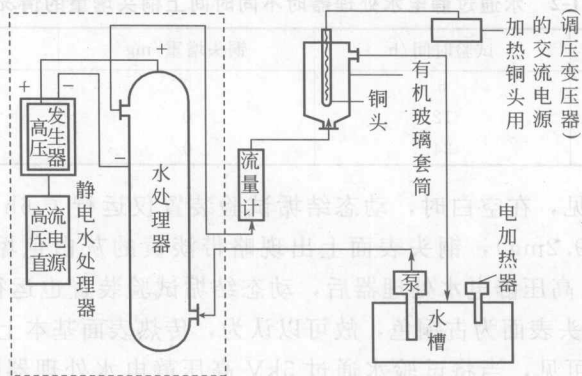


图 1-2 有传热面的动态结垢试验装置的示意图

② 试验的结果。试验得到的铜头上的垢重-高压直流电源的静电电压的关系曲线示于图 1-3 中。空白试验则相当于直流静电电压为 0 时的试验。由图 1-3 中可见：

a. 直流静电电压的大小对静电水处理器的阻垢效果有很大的影响；

b. 在该试验的条件下，铜头上垢重的最低点，即静电水处理器防垢、阻垢作用最强时的静电电压为 4~5kV。

(4) 静电水处理器阻垢作用的有效性试验 还做了空白试验和水通过静电水处理器的阻垢试验。试验的条件和试验的结果如下。

① 试验的条件

水温 50℃
铜头表面温度 约 100℃
流量计读数 20 格
试验时间 6h(表 1-1)和 6h、12h、24h(表 1-2)

② 试验的结果。示于表 1-1 和表 1-2 中。

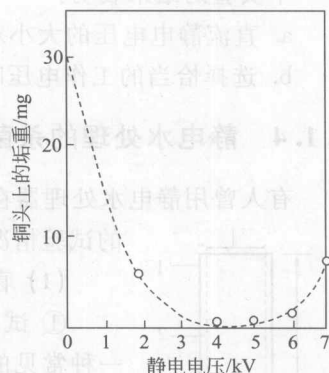


图 1-3 不同静电电压时的垢重

表 1-1 空白时与水通过静电水处理器时铜头结垢情况的对比 (试验时间 6h)

试验条件及编号	铜头增重/mg	铜头平均增重/mg	铜头表面颜色
空白试验,1	29.3	29.2	略带淡黄的灰白色
空白试验,2	29.3		略带淡黄的灰白色
空白试验,3	29.0		略带淡黄的灰白色
5kV 静电电压,1	0	0.2	古铜色
5kV 静电电压,2	0		古铜色
5kV 静电电压,3	0.5		古铜色

表 1-2 水通过静电水处理器时不同时间上铜头增重的情况

试验电压/kV	试验时间/h	铜头增重/mg	铜头表面颜色
5	6	0	古铜色
5	12	0	古铜色
5	24	0	古铜色

由表 1-1 中可见，在空白时，动态结垢试验装置仅运行了 6h，铜头就已明显增重（平均增重 29.2mg），铜头表面上出现略带淡黄的灰白色垢层。与此相反，当试验水通过 5kV 高压静电水处理器后，动态结垢试验装置也运行了 6h，但铜头仅增重 0.2mg，铜头表面为古铜色，故可以认为，传热表面基本上没有垢生成。

由表 1-2 中则可见，当将试验水通过 5kV 高压静电水处理器时，动态结垢试验装置运行了 6h、12h 和 24h，铜头都不增重，铜头的传热表面仍保持古铜色，没有结垢。

本实验的结果表明：

- a. 直流静电电压的大小对静电水处理器的阻垢效果有很大的影响；
- b. 选择恰当的工作电压时，静电水处理器将具有很明显的阻垢作用。

1.1.4 静电水处理的杀菌试验

有人曾用静电水处理器在实验室条件下对埃希大肠杆菌进行了杀菌试验。具体的试验情况和结果如下。

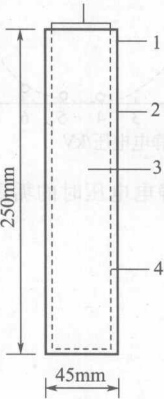


图 1-4 水处理器模拟装置结构示意图

1—水处理器；2—不锈钢外壳；3—聚四氟乙烯绝缘管；4—产生静电场的腔体

(1) 菌种和菌悬液

① 试验用的菌种。供试验用的菌种为埃希大肠杆菌。这是一种常见的革兰染色反应阴性细菌。在工业循环冷却水中，它和其他种类的好气异养菌群以及其他一些腐蚀性的自养菌群共同作用下，对工业设备具有一定的腐蚀促进作用。

② 菌悬液的制备

a. 菌种活化。将冰箱中保存的肉膏斜面转接到新鲜肉膏斜面上，在 37℃ 下培养 24h。

b. 扩大培养。将活化的菌体转接于 100mL 液体肉汤培养基中。在 37℃ 下静置培养 24h。

c. 收集菌体。用普通离心机在 4000r/min 转速下，离心 15min。倾去上清液，再用 pH7 的磷酸缓冲液洗涤一次，即可收集到足够的菌体。

d. 菌悬液制备。将收集到的菌体悬于 2000mL pH7 的磷酸缓冲液中，使菌悬液中含菌数为约 10^6 个/mL。磷酸缓冲液可使悬于循环流动水体中的细菌减缓繁殖，以尽可能保持菌数的稳定。

(2) 静电水处理的杀菌试验

① 水处理器的模拟装置。见图 1-4。

② 静电水处理杀菌动态模拟试验装置。见图 1-5。

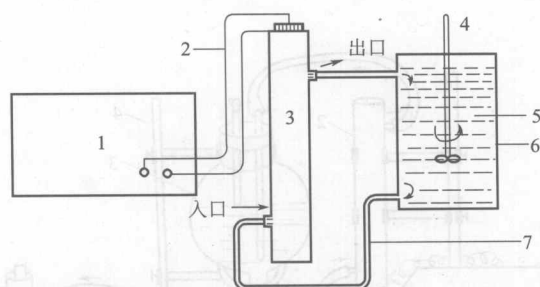


图 1-5 静电水处理杀菌动态模拟试验装置的示意图

1—高压直流电源；2—导线；3—水处理器；4—搅拌器；
5—菌悬液；6—超级恒温装置；7—导管

③ 杀菌动态模拟试验的参数。水处理器的容积为 120mL，菌悬液通过水处理器的流速为 32.2mL/s。模拟试验装置中水的温度为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ （用超级恒温装置控制）。根据当时的实际情况，确定静电水处理时间为 6.5h（其中静置 2h）。考虑到 6.5h 后，刚好是水中细菌进入对数生长的前期，处于这一阶段的细菌生理代谢活动旺盛，具有一定的代表意义。

(3) 试验的结果 以平板计数法计活菌数，求杀菌率。

静电水处理前的活菌数为 2.41×10^6 个/mL；

静电水处理后的活菌数为 0.17×10^6 个/mL；

静电水处理后细菌的存活率为 7.1%；

静电水处理的杀菌率为 92.9%。

(4) 试验的结论 从对埃希大肠杆菌的实验室动态模拟杀菌试验可以看出，静电水处理有明显的杀菌作用，杀菌率约为 92.9%。

1.1.5 静电水处理的灭藻试验

有人还曾在实验室的条件下用静电水处理对斜生栅列藻进行了灭藻试验。具体的试验情况和结果如下。

(1) 藻种和藻液

① 藻种。供试验用的藻种为绿藻中经常出现于各有关大化肥厂、大化工厂及钢铁厂循环冷却水中的一种绿藻，即斜生栅列藻。实验室中培养于水生 6 号培养液中。

② 藻液。将保存于固体斜面上的栅列藻藻种用水生 6 号培养液进行培养。待生长达到富集或同时分裂时（细胞多数处于分裂时），进行扩大培养，达到培养液至 5L，每毫升培养液内含有栅列藻细胞数为 10^3 以上时为止。培养时控制水温在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，光照强度 6000lx（勒克斯）。

(2) 静电水处理的灭藻试验