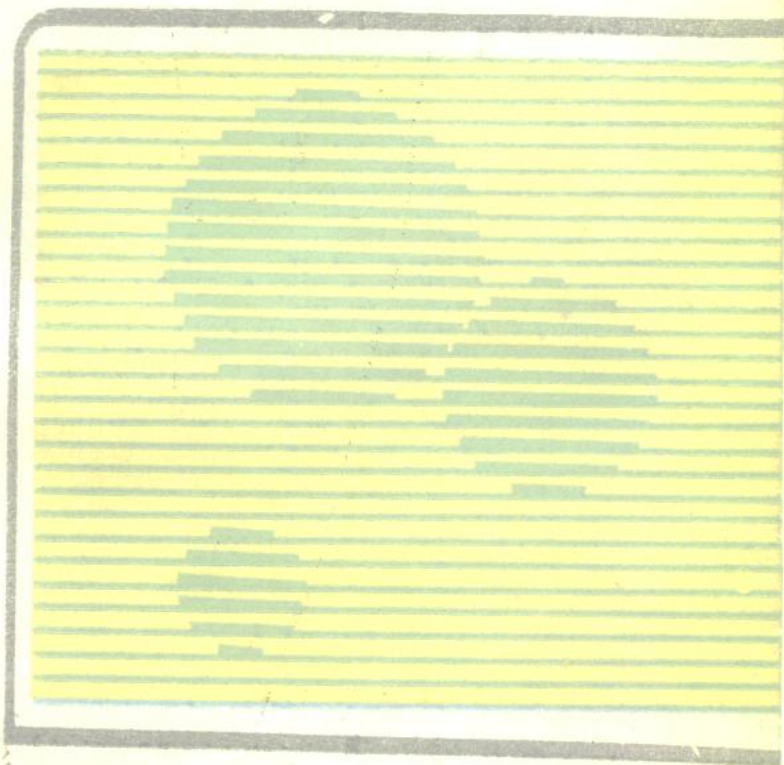


工业废水中 有害无机化合物

〔苏联〕 Я. М. 格鲁什科 著



化学工业出版社

工业废水中有害无机化合物

[苏联] Я. М. 格鲁什科 著

黄炯秋 刘智灵 译

孙昌宝 校

化学工业出版社

内 容 提 要

本书综合了苏联和其他国家的大量文献资料，并加以总结和系统整理。书中较详细论述了工业废水中52种元素的有害无机化合物特性，并列有世界各国在法律上对饮用水、水体和废水中的有害物质所规定的最高允许浓度，以及防止水体污染、废水处理和测定水溶液中有害物质的各种方法，还分别对各有害物质在天然水和废水中的含量、感官性状、对人和温血动物的影响、对水生物和农作物的影响，以及对水体自净作用和废水处理设施的影响等作了介绍。

本书可供化工部门和其他有关部门的科技设计人员和化验员，以及卫生检验机构、企业环保机构的有关人员阅读，也可供有关专业的大专院校师生参考。

本书经化工部化工设计公司徐杰灵同志进行了审查。

Я. М. ГРУШКО

ВРЕДНЫЕ

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

В ПРОМЫШЛЕННЫХ

СТОЧНЫХ ВОДАХ

ЛЕНИНГРАД «ХИМИЯ»

ленинградское отделение 1979

工业废水中有害无机化合物

黄炯秋 刘智灵 译

孙昌宝 校

责任编辑：王士君

封面设计：许立

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本850×1168¹/₃₂印张6¹/₈字数179千字印数1—10,170

1984年11月北京第1版1984年11月北京第1次印刷

统一书号15063·3638定价1.10元

目 录

主要符号说明	1
水体污染的预防措施及有害物质的测定方法	2
无机化合物的危害作用	6
废水处理	9
有害物质的含量标准	13
有害物质的测定方法	16
污染水体的有害物质	21
氮	21
氨	21
铵化合物	24
硝酸盐	29
亚硝酸盐	31
铝	32
钡	40
铍	44
硼	46
溴	49
钒	50
铋	52
钨	54
镓	56
锗	56
铁	57
金	63
铟	64
碘	64
镉	65
钾	71
钙	74
钴	79
硅	83

镧	84
铈	85
铈	87
铈	89
铜	93
钼	104
砷	106
钠	110
镍	115
铌	120
锡	121
汞	123
铷	128
铅	128
硒	135
硫	139
银	144
铈	147
铈	149
铈	151
钽	153
铈	154
钛	155
钽	156
铈	157
磷	159
氟	161
氯	163
铈	169
铈	179
铈	179
铈	187

附件

无机酸及氢离子的浓度 (pH)	189
无机酸	189
硝酸	189

38507

硼酸.....	190
硫酸.....	190
氢氰酸及氰化物.....	190
盐酸.....	193
氢离子的浓度.....	193
全书参考文献.....	196

主要符号说明

B_{HKn} ——生化需氧量：在一定时间内（2、5、8、10、20天），对有机物质进行生物氧化所需要的总氧量，毫克 O_2 /毫克物质（不包括硝化过程）。

$B_{HKn_{0.01}}$ ——硝化过程开始前（出现0.01毫克/升硝酸盐之前）的完全生化需氧量，毫克 O_2 /毫克物质。

DL_{50} ——半致死量：被试验动物一次摄入后，引起50%死亡的物质剂量。

CK_{50} ——半致死浓度：被试验动物一次摄入后，引起50%死亡的物质浓度。

[0 1], [0 2] 等——全书参考文献（参见196页）。

水体污染的预防措施及 有害物质的测定方法

有关预防水体污染方面的问题，在苏共及一些政府会议的决议^[1~3]中已有明文规定。《保护地表水规范》^[4~19]规定，水体中有毒物质的浓度不应直接或间接危害居民的身体健康。

苏联正在不断采取措施保护水体不受废水污染。在审核企业的新建和改建设计时，要求设计中必须考虑环境保护措施（包括水体保护）。在老企业中也要采用类似的保护措施。这些环保措施已列入苏联国民经济计划中，为此国家要拨出大量资金。但废水处理设施的基建费和操作费均较高，故必须在工艺上采取措施以减少废水量，在生产过程中循环利用废水和回收有害物质。这些措施均由部属工业科学研究院和企业的废水处理专家、化学家及工艺师等制定，对其鉴定工作则由生物学家、卫生学家及鱼类学家来完成。

工业废水、生活污水、溶解或悬浮在水中的固体生产废料、含有农药的地表水及生产废物排入大气后沉积在土壤表面上的有害物质等都是有害无机物污染水体的污染源。

目前，在采用无机化合物的生产企业中，废水排放量已相当可观。而随着工业的发展，用水量及排入水体的废水量还在增加。据美国国情调查局报道^[20~54]，铸钢工业用水量约210亿米³/年（其中循环水占42%）。据资料^[20~49]记载，美国金属加工工业的用水量为37.6亿米³/年，其中钢铁生产企业用水量为33.4亿米³/年。

苏联各工业部门正不断降低工业废水的绝对量及生产一吨产品排放废水的相对量。但要改变生产工艺毕竟还很困难，因此目前某些工业部门尚不能保证大量减少废水量及全部采用循环水^[6~27]。苏联化工企业的废水循环水系统一天虽可蓄积废水几千万米³^[4]，但仍需进一步降低用水量及废水排放量^[4]。苏联机器制造业一年内排入水体的废

水量为6340米³，其中经过处理的为3360米³，未经处理的为2980米³ [5]。

社会主义国家经济互助委员会 (C O B) 对各工业部门生产一吨产品的废水排放量限额作了规定，并要求多数工业部门采用全循环给水系统，其余部门采用部分循环给水系统 [0 27]。但是，目前许多工业部门生产一吨产品所规定的废水排放量仍然很大 (参见表 1)。

表 1 经济互助委员会对某些工业部门
废水排放量 (米³/吨产品) 的规定

工 业 生 产	供水系统	排入水体的年平均废水量			
		总 量	其 中		
			工业废水量	生活污水量	不需处理的废水量
化 学 工 业					
溴化铁	直流水	110	92	18	0
制碘	直流水	670	652	18	0
强双氧水（电化学法）	循环水、循序用水	486.14	0	0.92	485.22
粘胶丝	循环水	1000	980	20	0
粘胶短纤维	直流水	440	435	5	0
粘胶帘子线纤维	回用水	705	700	5	0
铜氨法纤维	回用水	555	550	5	0
卡普隆纤维	循环水	435	420	15	0
有 色 冶 金 工 业					
炼钴	循环水和直流水	407.3	400	7.3	0
工业用氧化钴	循环水和直流水	309	269	18	22
三氧化钨	循环水和直流水	475.1	469	3.1	3
轧制钢板	循环水和直流水	7049	7035	14	0
轻 工 业					
缂丝厂	循环水	3263	1800	193	1270
丝棉联合工厂	直流水	300	240	20	40
衣料漂白染色厂	循序用水	315	260	5	50
精梳毛呢绒（包括纺织、漂白）联合工厂	直流水	420	350	30	40
细亚麻纺织品联合工厂	直流水	360	310	10	40

琼脂厂、毛皮厂、重型机器制造厂、下水管和陶瓷件生产厂等均有大量废水排入水体。

美国对生产一吨产品所排放的废水限额规定如下：羊毛——530米³，炼钢——246米³，焦炭——13.6米³ [101]。

由于人口不断增长、工业逐步发展、用水量及废水排放量也随之日益增多，这就导致了水体有被污染的危险（特别是被有害物质污染）。其中许多有害物质作为生产废料排入大气，再沉降到地面上，并随大气降水一起顺地面的坡度进入水体。

各种生产废水所含无机物如下：

采矿	金属、酸
木材加工	氟、锌
陶瓷	钡、镉、锂、锰、硒、氟化物
皮革	钙、硫化氢、硫化钠、铬、钾、碱
炼焦化学	氨、硫化氢、碱
油漆颜料	钡、氯酸钾、镉、钴、铜、锡、铅、氯化物、锌、氨、苛性钠、酸
机器制造	铵化合物、酸、金属、氟化合物、氯、碱
冶金	铵化合物、酸、金属、硫化氢、硅、硫酸盐、氯、氯化物、磷酸盐、碱
肥皂制造	钡、苛性钠、硫化氢、钾
石油化工	酸、金属、硫化氢、碱、氯化物、硫化物、硫酸盐
烟火制造	硝酸、钡、氯酸钾、铈、铈、锂
农药	钡、镉、铜、砷、硅氟化物、氟、氯、钾
食品	钡、镍、铈
橡胶制品	氢化硼、亚硝酸盐、硒、铈、锌、碱
火柴	硼酸、氯酸钾、铅、铈、磷、铬
玻璃	钾、硼酸、锰、铜、砷、亚硝酸盐、硫化物、氟化物、锡、硒、锂、硫化氢
纺织	铵化合物、锡、铅、氟、氯、氯化物、

	碱、钾、铜、锌、钡、铬
肥料	钾、氮、硝酸盐、硫化氢、磷酸盐
照相材料	镉、银、碱
化学制药	氢化硼、溴、铵化合物、钾、酸、金属、 碱、氯、碘
化学工业	氮、铵化合物、溴、酸、金属、磷酸盐、 氯、氯化物、硫化氢、碱
纸浆造纸	苛性钠、金属、氯、硫化物、硫酸盐、 硫化氢、亚硫酸盐

文献中对以上工业废水中的有害无机物及其浓度报道很少，其中呈化合物形式的汞、铍、镉、硒、砷、铅等毒性最强的金属报道则更少^[10-14]。

地表水在形成过程中可能受到农药、企业固体废料、无法排走的杂质以及企业排入大气而沉降在地表面的或大气降水从空中冲洗下来的有害物质的污染。这种所谓假定净水经雨水下水道排入水体，其中许多有毒物质的含量是生活污水的10~100倍^[10-35]。目前已发现大气降水中含有镉、镍、铬及其它无机化合物^[6]。

排入城市下水管网的生活污水中含有铜、锌、铬、铅、铁、镍、镉、锰、汞、银、钴等金属。污水经过物理和生物处理之后，可减少上述有害物质的含量，但不能将其完全脱除。处理有害物质浓度高的废水时，其净化效率低于浓度低的废水。根据美国三个洲的生活污水研究资料记载，在90%的情况下，即使对生活污水进行物理和生物处理，污水中有害无机化合物的浓度仍然很高^[7]。虽然污水在一些污水处理公共设施中经过沉淀池、离心机、膜式过滤器和曝气池处理，仍不可能完全去除污水中的金属；相反，某些金属，如镉、锌、汞、锰等的含量反而增高了^[10-49]，这一现象表明污水已受到二次污染。因此，只有经过二级生物处理才能将污水中的有毒金属浓度降低30~87%。污水中某些可溶性的有害物质浓度，如锌、镉、汞，在处理后也出现增高现象^[8]。即使采用快速过滤器对生活污水进行再次处理后，其金属含量仍降低不多^[8]。

无机化合物的危害作用

许多无机化合物（汞、镉及其它化合物）对人和温血动物有危害作用。苏联的一些专家^[10, 11, 0-5]指出,某些化学物质可通过饮用水对人体产生危害,还指出了保护水体必须采取的措施。在《保护地表水规范》中也明文规定企业必须采取这些保护措施^[0-19]。

美国专家委员会在给国会的报告中指出,高浓度有毒物质排入水体,可使水体严重污染^[12]。世界卫生组织^[13, 0-17]认为,不仅要研究化学物质随饮用水进入人体后的致毒作用,而且还要研究它们的致癌作用、致畸作用和致变作用。美国环境理事会^[12]指出,排入外界(其中包括水体)中的许多化学物质随饮用水进入人体后,可产生致癌作用(产生恶性肿瘤)、致变作用(引起遗传变异)和致畸作用(引起新生儿畸形)。在试验条件下,砷、硒、锌、镉、钡、钇等随饮用水进入体内,或铬、铍、铅、汞、钴、镍、银、铈、钽、镓、钪、铀、白金和镆等由其它途径进入体内,均对温血动物有致癌作用^[0-53]。在试验条件下,镉、铅、锂、镓等对动物有致畸作用。用虹鳟鱼作试验,证明硫化锌可使之产生致变作用^[0-53]。遗憾的是这些科研成果,特别是有关无机化合物在动物体内产生的致癌作用和致变作用很少有记载。致变作用系指基因的变化。这种作用不仅在一代动物身上有反映,出现新的症状,而且还影响子孙后代^[15]。某些无机化合物,如六价铬化合物,对人有变态反应作用^[16]。由于某些无机物的污染,人们不能利用水体及其沿岸作为休息和运动场地。

水中含铁、锰、铜、锌、氯化物、硫酸盐和氨的浓度高时,水的色、嗅、味性态会发生变化。

一些无机物还影响工业用水的水质。例如热电站的锅炉给水就不宜采用铝、铁、锰、铜含量高的水;而在纺织厂和造纸厂,甚至铁、铜、锰含量低的水也禁止使用^[0-57, 101]。某些无机化合物有剧毒,其最高允许浓度变化范围很大,在土壤和植物内有累积作用,故含有这类化合物的废水不能用来灌溉农田^[0-57]。

许多无机化合物的浓度即使很低,对鱼类及其饵料也有危害^[0-71]。

大部分水生物对有毒物质的敏感性都高于人类和温血动物。不同种类的水生物对无机化合物危害作用的耐受性也不相同。例如镉对剑水蚤属的半致死浓度 (ЛК₅₀) ① 为3.8毫克/升, 而对水蚤亚目则为0.055毫克/升^[17]。此外, 鲑鱼卵对铜和锌的敏感性高于成年鲑鱼^[18]。

聚积在鱼体组织内的有害无机化合物, 通过食用对人有致毒危险。例如汞在微生物、鱼及其饵料体内可累积到很高浓度^[9-55]。对小黑鲈和中弓幼鱼进行6个月的试验表明, 水中镉浓度为0.0005~0.85毫克/升时, 累积在鱼体组织内的镉浓度可达到水中镉含量的2~210倍^[19]。生活在含镉水体内的中弓鱼, 其新生幼鱼组织内的镉含量为1毫克/公斤②, 长大后则增加到30毫克/公斤^{②[20]}。累积在牡蛎组织内的镉、铜、锌的含量较水体内高3~4倍。鱼类即使短期(一星期)生活在含镉的鱼缸内, 也可发现机体内聚积镉: 肝脏内为4.91~6.71毫克/公斤体重, 肾脏内为2.26~4.13毫克/公斤体重^[21]。在水体中生活的牡蛎, 其组织内还可累积铅、汞、镉、锌、铜和钴等^[22]。

在大城市和工业中心, 有害无机化合物以各种化合物的形式进入水体。这些化合物对人体、温血动物、水生植物区系和动物区系以及废水处理设施内的微生物区系均能产生共同作用, 即所谓的联合作用。这种作用可能有以下几种情况: ① 协同作用, 即某些毒物的作用效率大于其简单总合作用; ② 拮抗作用, 即某些毒物的作用小于其简单总合作用; ③ 加成作用, 即简单总合作用^[9-57]。某些物质, 特别是许多有害物质在联合作用时, 常常出现协同作用^[9-55]; 但有时也不出现这种现象。例如水中的镉和锌与氰化物作用时毒性增大, 而砷与硒作用时毒性则减小^[12]。《保护地表水规范》中规定, 一些同一极限毒性指标的有害物质在联合作用时, 每一种有害物质浓度比例之和不应大于1。但实际上, 规范中所列举的公式并非总是正确的。用鳊鱼在含钙量为200毫克/升的硬水中进行十二个半月的试验, 当铜、镉、锌的浓度比例为1:2:10的混合物发生联合作用时, 对鱼可产生总合作用; 但每一组分对鳊鱼的致死浓度则为它原来的40%^[23]。在对虹鳟鱼进行

① 原文误为半致死量 (ЛЛ₅₀) ——译者注。

② 原文中的单位是毫克/升, 有误——译者注。

试验时,发现低浓度的硫化锌和硫化铜混合物的毒性同该混合物中每一单个组分的毒性大致相同;而当这种混合物的浓度高时,则出现协同作用^[24]。

尽管许多企业排放废水中的化学物质组分相当多,但根据《保护地表水规范》中引用的公式研究化学物质的联合作用时,主要选用2~4种组分,而且每次都用极限毒性指标相同的组分。

因此,文献资料已经证实,确立毒物对生物体联合作用的任何一种固定规律性是不可能的。所以,必须对废水和水体中的有害物质在每一种具体情况下的作用特点及危害程度作出规定。

水的物理化学性能——水温、含氧量、硬度以及pH值,对许多无机化合物的毒性均有影响^[10-32]。随着水温增高,水生物的新陈代谢作用也加快,故吸收的毒物也增多^[25]。

各种有害物质在不同硬度的水中(软水的碳酸钙含量为20毫克/升,硬水为260毫克/升),对鱼类的平均致死浓度(ЛКср)(毫克/升)列表如下(鱼类在水中持续96小时):

化合物	鱼 类	平均致死浓度		化合物	鱼 类	平均致死浓度	
		软 水	硬 水			软 水	硬 水
氯化镉	鲇鱼 ^[26, 27]	0.63	73.5	氯化铅	鲇鱼	5.58	482.0
硫酸铜	鲇鱼	0.022	1.76	硫酸铍	淡水鱼 ^[28]	0.19	20.3
硫酸锡	鲇鱼	0.78	33.4	锌	虹鳟鱼 ^[29]	0.4	7.2

据资料^[30]记载,硝酸铅对Тетрахимена Пириформис 原生动物的毒性在软水中比在硬水中高出6倍。当水的总硬度增高(碳酸钙含量由12增加到504毫克/升)、pH值由6.6提高到8.0以及锌浓度为7毫克/升时,淡水鲑的平均存活时间可延长2倍^[31]。

由此可见,在硬度低的水体中,虽然也有金属致毒作用小的情况,但一般说来,它的致毒作用还是较大。因此,自来水经软化硬度降低后,会使金属在水中的毒性增高。

某些无机化合物对废水处理设施中的微生物有致死作用,进而停

止或延缓废水的生物处理作用及消化池中沉淀物的发酵作用^[32]。有毒金属在水体中不但不会自行净化，相反还会使植物区系和动物区系致死，并抑制水体的自净作用。对此，可以采用废水稀释、水底沉积以及由植物区系和动物区系部分吸收等处理方法降低水体中有毒金属的浓度。降低水流速度可增加物质的沉淀量。假定净水含有害物也可促使水体底部沉淀物中的有害物质增多。

某些无机化合物的浓度即使不高，对土壤和植物也有危害。这些有害物质可以在土壤和植物内累积至很高浓度，故不能使用含有这类有害物质的废水灌溉农田。

目前，苏联许多生产企业都采用了废水处理的现代方法，废物可返回生产系统使用^[31]。今后，还需进一步降低工业用水量和水体中废水排放量，建立无废水的生产方法，降低生产工艺中有害物质的用量，将水法生产改为无水法生产，以及最大限度地回收利用有害废物^[31]。以上所述均为苏联国家建委对各企业设计人员的要求^[33]。如果废水中所含贵重生产废物可在本企业或其它企业回收利用，则禁止将此类废水排入水体^[10-19]。

废水处理设施的基建及操作都要耗用大量材料。在许多情况下，废水的净化效率不高，而且送入处理设施中的有害物质浓度变化范围也很大。因此必须在生产工艺上采用各种方法降低废水的污染程度^[31]。

目前，化工、炼油、金属加工和食品等工业废水中的贵重废物已能够得到合理利用^[30-39, 41]。

在1975年世界卫生组织专家会议的报告中已明确指出，必须在工艺上采取措施降低水体的污染程度；在生产上采用循环供水系统和循环供水封闭系统^[39]。

废 水 处 理

废水的处理方法取决于废水中有害物质的浓度和特性以及生产工艺的特点。

为了保护废水处理设施和水体不受各种有害无机化合物的毒害，所以将有害无机化合物单独划分为一类进行研究。

如果废水中的主要成分是有机物，那么在公用处理设施和全厂性处理设施中大都采用物理和生物处理方法。生物处理法去除金属的效率不稳定，而且对不同有害物质的净化效率也不一样，一般为 0 ~ 90 %^[55]。在这些处理设施中采用生物处理法可明显降低废水中的氨、硝酸盐、氯化物及其它化合物的含量。文献^[0-25]指出，鉴于化工、机器制造、冶金、纸浆和造纸以及炼油等企业的废水中有害物质的成分和浓度的特性，不能采用生物处理法处理废水。

局部处理法 局部处理法用于回收各单独车间内浓废水中的有害物质。废水中的无机化合物分为可溶性和不溶性两种，它们能够经过还原、氧化、沉淀和吸附转化为单个物质或络合物。因此，可根据废水成分和所含的杂质及各种组分的特点，采用不同的局部处理法^[0-55, 42]。例如混凝法、过滤法、活性炭吸附法^[0-55]、石灰沉淀法、置换沉淀法、电解法、反渗透法、离子交换法和絮凝法等^[0-55, 0-43, 44]。

以前多采用沉淀法、澄清法和砂滤法脱除废水中的金属，但净化效率都不高。只有经滤纸压滤机再次处理废水后，才能将金属浓度降低到 10^{-2} 毫克/升^[0-49]。

目前，西德废水处理技术先进的生产企业均采用现代化的处理方法：如沉淀池内连续沉淀和间断沉淀、置换沉淀、蒸发、浮选、活性炭吸附、电解、离子交换以及反渗透等^[0-49]。这些企业的废水经处理后，虽然有害物质的剩余量不大（约 10^{-1} 毫克/升），但还不能保证完全脱除。据文献报道^[45]，脱除废水中的一些金属可以采用湿法冶金工业采用的方法：如沉淀、浮选、离子交换、吸附、电解、蒸馏、电渗析、结晶和萃取法等。处理废水中无机物的各种方法都有各自的特点。

同物理化学法相比较，混凝、沉淀、酸碱中和等化学方法使用得更为广泛。化学法用于脱除废水中的胶体物、悬浮物、重金属、酸碱中和和处理废水中的有毒物等。中和时使用碱、硫酸和苛性钠溶液、混凝和絮凝时采用硫酸铝、三氯化铁和聚丙烯酰胺^[0-25]。

废水的酸碱中和、脱除有毒物及重金属都是自动进行的^[0-25]。根据废水的特性，可采用连续操作或间断操作的处理设备，酸碱是否中

和则完全用pH计检验。文献^[46]中介绍了自动化学法回收废水中所含金属的设备(“日本电气”公司设计)。采用化学法处理废水中的无机物,其缺点是损失一些贵重金属、酸和碱,而且用此法处理后的废水含盐量过大,不能重复利用。

目前,废水处理技术先进的企业已经采用电化学法,如离子交换法和电解法等处理废水。电化学法占地面积小,不用试剂,操作也较简便^[47],故适用于处理流量大的废水。英国采用最现代的废水深度处理方法,例如反渗透法、活性炭吸附法、高温(350℃)高压(20兆帕)氧化法等,沉淀物压实后烧掉^[48]。日本采用电渗析法,超滤法、磁性过滤法、离子交换法以及活性炭吸附法等^[49]处理废水。

浮选法可用于脱除废水中不溶性及某些可溶性无机化合物(包括金属)。废水处理在浮选室内进行,也就是使废水充满气泡,固体颗粒粘附在气泡上,并与气泡一起浮到水面^[50, 51]。本书介绍了浮选法脱除废水中不溶性及某些可溶性的有害物质,其净化效率可达98%。每一浮选室内废水处理的时间为20~40分钟,处理后生成沉渣的湿度较废水澄清时的沉渣湿度减少到原来的 $1/2 \sim 1/10$ ^[52]。浮选法比沉淀法要优越,如净化速度高4倍,试剂耗量少,清除沉淀物的费用也低^[53]。

苏联在化工、电化学、机器制造、冶金、纺织等工业中采用离子交换法^[54, 55]脱除废水中的金属。采用该法回收废水中的可溶性矿物质时,一般使用沸石过滤器^[56]。离子交换法可以从废水中制得蒸馏水,并能达到任何处理深度。此外,脱除出来的各种组分可以回收利用。废水中含盐量低于2克/升及脱除组分低于1克/升时,采用离子交换法为宜。离子交换装置的废水处理能力应不超过1000~2000米³/天。这种方法可脱除废水中的铬、铜、钴、铅、锌、镉、氰化物及其它组分,制得的无盐水可进一步利用,并能从废水中提取有价值的产品^[54]。由于废水中除去了矿物质,因而70~80%的废水可回收重新作为生产用水^[57]。采用离子交换法处理废水时,废水中各组分的最高浓度与最低浓度之间的变化范围要小于沉淀法及蒸发法^[40, 49]。采用离子交换法处理电镀车间的废水时,一次即可去除废水中的全部金属^[58]。电镀件在电镀后必须进行初次清洗,以减少电镀件所带的污染物,因