

地下水 除铁除锰

(第二版)

李圭白 刘超 著



中国建筑工业出版社

地下水除铁除锰

(第二版)

李圭白 刘超 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国建筑工业出版社

地下水除铁除锰

(第二版)

李圭白 刘超 著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32印张: 16¹/₈ 字数: 454千字

1989年2月第二版 1989年2月第二次印刷

印数: 7,581—12,730册 定价: 13.15元

ISBN7-112-00427-6/X·11

(5543)

前 言

我国许多城镇和工矿企业都以地下水为水源，特别是东北、华北、西北地区，以地下水为水源的为数甚多。但地下水中常含有过量的铁和锰，须经处理才能满足生活饮用水和工业用水的要求。所以地下水除铁除锰是地下水资源开发利用中的重要课题之一，从而促进了我国地下水除铁除锰技术的发展。1977年出版的《地下水除铁》（第一版），总结了我国五十年代到七十年代初期的经验，特别是以天然锰砂接触氧化除铁为重点，吸取国外有关先进技术，系统地阐述了地下水的除铁原理、一般规律、使用条件、影响因素、工艺系统、设备构造、计算方法、技术参数以及试验、设计、运行管理等方面的问题。此外，还对其他的地下水除铁方法，以及除铁水厂废水的回收利用等问题作了简要论述。

自第一版出版以来，最近十年里我国地下水除铁除锰技术有了很大发展，特别是试验成功了接触氧化除锰工艺。这样，经过建国以来近四十年的研究和实践，找到了适合在我国推广应用的地下水除铁除锰工艺，即接触氧化和自然氧化除铁工艺和接触氧化除锰工艺。这种工艺以空气中的氧作为氧化剂，不需要向水中投加任何药剂，系统组成比较简单，设备体积较小，处理效率高，处理水质好，运行稳定可靠，维护管理简便，建筑设备和运行费用较低，特别适合我国的国情。所以在我国得到大量推广和应用，终于形成具有我国特点的地下水除铁除锰技术。

我们将这十年里国内外取得的成果和经验，特别是笔者主持研究成功的接触氧化除锰工艺，补充到书中，更名《地下水除铁除锰》，作为《地下水除铁》一书的第二版。第二版与第一版比较，书中大部分内容都得到补充和更新。得到补充和更新的内容

主要有:

1. 第一版以二氧化锰和活性滤膜两种催化作用为出发点, 对天然锰砂接触氧化除铁机理进行了阐述, 并根据实验建立了接触氧化除铁速率的经验关系式; 第二版重点阐述了最新研究成果——铁质活性滤膜接触氧化除铁机理, 并以扩散为控制因素, 建立了接触氧化除铁速率的数学模式, 从而使内容得到深化和更新。

2. 对于自然氧化除铁过程, 第一版只重点论述了二价铁的氧化问题; 第二版重点补充了除铁过程中生成的三价铁氢氧化物胶体的凝聚, 及水中溶解性硅酸对三价铁氢氧化物凝聚过程影响的机理等问题。

3. 补充论述了地下水中锰的基本化学性质, 系统阐述了接触氧化除锰的原理、催化剂的形态、除锰速率以及水中铁对接触氧化除锰效果的影响等问题。增加了“接触氧化除锰设备的试验和设计”一章, 系统阐述了接触氧化除锰的工艺系统、试验研究、设计计算、运行特点等。

4. 系统地阐述了新的地下水除铁除锰工艺——地层除铁除锰的原理及有关技术; 介绍了其他地下水除锰方法。

5. 在“含铁含锰地下水的曝气”一章里, 补充了叶轮表面曝气装置, 介绍了它的构造、计算方法等问题; 此外, 对于其他曝气装置, 也都补充了一些技术资料, 使其内容更加充实。

6. 滤池是地下水除铁除锰工艺中最主要的构筑物。在“地下水除铁除锰滤池”一章里, 主要补充了笔者近年来的一些研究成果, 如新的滤层反冲洗水力学计算公式、关于滤层的高效反冲洗问题、滤层的层间混杂问题、滤料粒径和反冲洗强度的选择问题、滤池配水系统的动态设计原理、减速过滤池组的水量和水位调节问题等, 使滤池的工艺理论和计算方法更加丰富和完善。

7. 增添了“地下水除铁除锰水厂设计实例”一章, 其中列举了十个比较完整的设计实例, 这些工程建成投产后, 除铁除锰效果良好, 可供读者参考。

8.在“主要参考文献”中，列出中外文献一百余篇，可供读者检索。

由于作者水平有限，难免有不足之处，请读者批评指正。

李圭白 刘 超

1987年2月

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 水中铁和锰的危害及用水要求	1
第二节 我国地下水除铁技术的发展	4
第三节 我国地下水除锰技术的发展	11
第二章 地下水除铁除锰的化学理论基础	13
第一节 地下水中铁的化学性质	13
一、地下水中铁质的来源	13
二、二价铁在不含碳酸盐的水中的溶解度	14
三、水中其它离子对化学平衡的影响	16
四、地下水中碳酸的平衡	17
五、二价铁在含碳酸盐的水中的溶解度	21
六、三价铁在水中的溶解度	27
七、地下水中铁的氧化还原平衡	29
八、含铁地下水的水质及其变化	31
九、地下水中铁的形态	32
第二节 自然氧化法除铁	38
一、水中二价铁的自然氧化反应速度	38
二、三价铁氢氧化物胶体的凝聚	49
三、溶解性硅酸对除铁过程的影响	52
第三节 接触氧化法除铁	56
一、铁质活性滤膜接触催化作用的发现	56
二、接触滤料的“成熟”过程	58
三、铁质活性滤膜的化学组成及其接触氧化除铁过程	61
四、滤层的接触氧化除铁速率	66
五、影响接触氧化除铁效果的因素	74
第四节 接触氧化法除锰	79

一、地下水中锰的存在形态及其性质	79
二、接触氧化法除锰原理	84
三、滤层的接触氧化除锰速率	89
四、铁、锰共存时的除锰问题	90
第五节 除铁除锰水的稳定性	93
一、除铁除锰水的稳定性问题	93
二、水的稳定性的判别方法	95
三、除铁除锰过程中水的稳定性变化	98
四、除铁除锰水的稳定性处理	100
第三章 含铁含锰地下水的曝气	104
第一节 气体在水中的溶解平衡	104
一、气体在水中的溶解度	104
二、曝气水中的溶解氧的平衡饱和浓度	105
三、曝气水中二氧化碳的理论最大去除率	109
四、曝气水的理论最高 pH 值	111
第二节 气体的传质方程式	112
第三节 气泡式曝气装置	116
一、气泡式曝气装置的溶氧速度	116
二、压缩空气曝气装置	118
三、射流泵曝气装置	123
四、曝气溶氧所需空气量的计算	137
五、跌水曝气装置	141
六、叶轮表面曝气装置	142
第四节 喷淋式曝气装置	152
一、莲蓬头和穿孔管曝气装置	152
二、喷水式曝气装置	166
三、接触式曝气塔	166
四、板条式曝气塔	168
五、机械通风式曝气塔	170
第五节 曝气装置的选择	171
第四章 地下水除铁除锰滤池	173
第一节 地下水除铁除锰滤池的运行方式	173

第二节 除铁除锰滤池的滤料	175
一、对滤池滤料的一般要求	175
二、滤料的粒度特征	177
三、除铁除锰滤料简介	181
第三节 接触氧化滤料层的过滤除铁除锰过程	182
一、接触氧化滤层的过滤除铁基本方程式	182
二、接触氧化滤层中水头损失的增长	183
三、接触氧化滤池的工作周期	190
第四节 滤层的过滤澄清过程	193
一、澄清滤层中铁质悬浮物的浓度分布	193
二、澄清滤层中水头损失的增长	195
三、影响澄清除铁滤池工作的主要因素	195
第五节 提高过滤效果的方法	197
一、减速过滤	197
二、粗滤料过滤	198
三、上向流过滤和双向流过滤	200
四、多层滤料过滤	201
五、辐射流过滤	203
六、高分子化合物助滤	203
七、采用新滤料及改善滤料的表面性质	204
第六节 滤层的反冲洗	205
一、滤层的反冲洗问题	205
二、滤层在反冲洗过程中的水力特征	209
第七节 滤层的高效反冲洗	220
一、滤层反冲洗的最优化理论	220
二、滤层反冲洗的高效区	225
第八节 滤层的水力分级和层间混杂	229
一、对现行理论的评价	229
二、悬浮滤层的比重——滤层水力分级的主要因素	231
三、多层滤料滤层层间的卷入混杂	232
四、多层滤料滤层的层间渗入混杂	236
五、按混杂程度计算多层滤料粒径配比的方法	237
第九节 滤层的粒径和反冲洗强度的选择	242

一、单层滤料滤层的粒径和反冲洗强度的选择	242
二、多层滤料滤层的粒径和反冲洗强度的选择	246
第十节 滤池的配水系统	248
一、配水系统的静态设计原理	248
二、配水系统的动态设计原理	250
三、穿孔管配水系统	255
四、穿孔板配水系统	268
五、格栅式配水系统	270
六、滤头式配水系统	271
第十一节 反冲洗废水的排除装置	273
第十二节 反冲洗水的供给	274
第十三节 压力式滤池	276
一、压力式滤池的型式和构造	276
二、大型压力滤池组的运行特点	281
第十四节 重力式滤池	287
第十五节 无阀滤池	290
一、无阀滤池的型式和构造	290
二、接触氧化无阀滤池的设计特点	295
三、重力式无阀滤池的反冲洗计算	297
四、压力式无阀滤池的反冲洗计算	305
五、几种利用虹吸原理反冲洗的滤池	314
第十六节 虹吸式滤池	315
第十七节 移动冲洗罩滤池	317
第十八节 减速过滤池组水量和水位的自然调节	319
第五章 接触氧化除铁设备的设计、试验和运行	331
第一节 接触氧化除铁工艺系统	331
一、接触氧化除铁工艺系统	331
二、以单级滤池为主体的接触氧化除铁工艺系统	332
三、由两级处理构筑物组成的接触氧化除铁工艺系统	336
第二节 接触氧化除铁设备的工艺设计	337
一、接触氧化除铁设备工艺设计的内容	337
二、含铁地下水的水质资料	338

三、除铁设备的设计容量	339
四、其他处理过程对接触氧化除铁效果的影响	343
五、接触氧化除铁设备工艺参数的选择	345
六、接触氧化除铁设备的布置	345
第三节 接触氧化除铁试验	347
一、除铁试验的准备	347
二、接触氧化除铁试验	352
三、反冲洗试验	356
第四节 接触氧化除铁设备的安装、调整和运行管理	357
一、接触氧化滤池的安装和调整	357
二、曝气装置的安装和调整	360
三、接触氧化除铁设备的运行管理	361
第五节 人造锈砂接触氧化除铁工艺试验	365
一、人造锈砂接触氧化除铁试验	365
二、人造锈砂接触氧化除铁的生产试验	368
第六章 自然氧化除铁设备的试验与设计	370
第一节 自然氧化除铁工艺要求与除铁试验方法	370
一、地下水中二价铁的氧化反应时间	370
二、自然氧化除铁试验	378
第二节 自然氧化除铁设备的设计	381
一、自然氧化除铁工艺系统	381
二、自然氧化除铁设备工艺参数的选择	383
第七章 接触氧化除锰设备的试验和设计	387
第一节 接触氧化除锰工艺系统	387
一、接触氧化除锰工艺系统	387
二、单级过滤除铁除锰工艺系统	391
三、两级过滤除铁除锰工艺系统	392
第二节 接触氧化除锰试验	395
一、接触氧化除锰试验	395
二、接触氧化除锰试验举例	397
第三节 接触氧化除锰设备的设计和运行特点	406
一、接触氧化除锰设备的设计特点	406
二、接触氧化除锰设备的运行特点	410

第八章 地下水的其他除铁除锰方法	414
第一节 地层处理法	414
一、概论	414
二、关于地层的堵塞问题	418
三、地层除铁除锰的抽灌比	421
四、地层的成熟期	424
五、回灌对水井工作的影响	428
六、回灌水水质的影响	429
七、回灌周期	431
八、曝气充氧方法和气水分离	432
九、回灌方式	433
十、地层除锰及除硫化氢的效果	434
十一、地层除铁除锰的机理	435
第二节 铁细菌处理法	437
第三节 农村简易除铁方法	442
第四节 氯氧化法	445
第五节 高锰酸钾氧化法	449
第六节 锰离子交换法	451
第七节 臭氧氧化法	452
第八节 离子交换法	453
第九节 混凝法	454
第十节 稳定处理法	456
一、聚合磷酸盐处理法	456
二、硅酸钠处理法	458
第九章 地下水除铁除锰水厂废水的回收和利用	461
第一节 除铁滤池反冲洗废水的回收	461
一、静水自然沉淀回收反冲洗废水	461
二、用聚丙烯酰胺混凝沉淀回收除铁滤池反冲洗废水的试验	462
第二节 铁泥的综合利用	466
第十章 地下水除铁除锰水厂设计实例	469
实例1 空压机曝气压力式过滤除铁工艺设计	470
实例2 莲蓬头曝气重力式过滤除铁工艺设计	474
实例3 跌水曝气重力式过滤除铁工艺设计	481

实例 4	射流泵曝气无阀滤池过滤除铁工艺设计	486
实例 5	曝气塔曝气一级过滤除铁除锰工艺设计	491
实例 6	曝气一级过滤分质处理工艺设计	495
实例 7	表面曝气双级滤池过滤除铁除锰工艺设计	500
实例 8	表面曝气两级过滤除铁除锰工艺设计	505
实例 9	两级曝气两级过滤除铁除锰工艺设计	508
实例 10	曝气反应沉淀过滤除铁除锰工艺设计	513
附录		516
附录 1	常用化学元素的原子量	516
附录 2	常用化合物或离子的分子量和当量	517
附录 3	水的离子积常数和碳酸的离解常数	519
附录 4	氧在纯水中的溶解度 (气压760mmHg)	519
附录 5	水的粘度	520
附录 6	筛目表	521
主要参考文献		522

第一章 概 论

第一节 水中铁和锰的危害及用水要求

地下水是一种十分宝贵的资源。从人们的日常生活到发展工业、农业以至国防建设都需要用地下水。我国许多城镇和工矿企业都以地下水为水源。与地面水相比，用地下水作生活饮用水水源有许多优点，如地下水一般水质较好，处理简单，水处理厂的造价低；地下水不易受污染，比较安全可靠、卫生等。尤其在村镇供水中采用地下水对人民的卫生保健有重大意义。地下水的水温比较稳定，在夏季水温相对较低，常被用做工业生产的冷却水，可提高生产效率。但是，我国不少地区的地下水中含有过量的铁和锰，不符合工业生产和人民生活的要求。

铁和锰都是人体必须的微量元素。水中含有微量的铁和锰，一般认为对人体无害。但有人报导，在锰矿地区，人体长期摄入过量的锰，可致慢性中毒。有的地区，水中含有过量锰，可能是诱发某些地方病的病因之一。

地下水中的铁常以二价铁的形式存在，由于二价铁在水中的溶解度较大，所以刚从含水层中抽出来的含铁地下水仍然清澈透明，但一经与空气接触，水中的二价铁便被空气中的氧气氧化，生成难溶于水的三价铁的氢氧化物而由水中析出。因此，地下水中的铁虽然对人的健康并无影响，但也不能超过一定的含量。如水中的含铁量大于 0.3mg/L （以Fe计）[●]时水便变浑，超过 1mg/L 时，水具有铁腥味。特别是水中含有过量的铁，在洗涤的衣物上能生成锈色斑点，在光洁的卫生用具上，以至与水接触的

● 本书中所述含铁量和含锰量，皆以铁(Fe)或锰(Mn)的 mg/L 表示，以下不再注明。

墙壁和地板上，都能着上黄褐色锈斑，给生活应用带来许多不便。

地下水中的锰也常以二价锰的形式存在。二价锰被水中溶解氧氧化的速度非常缓慢，所以一般并不使水迅速变浑，但它产生沉淀后，能使水的色度增大，其着色能力比铁高数倍，对衣物和卫生器皿的污染能力很强。当锰的含量超过 0.3mg/L 时，能使水产生异味。

在锅炉用水中，铁和锰是生成水垢和罐泥的成分之一。

在冷却用水中，铁能附着于加热管壁上，降低管壁的传热系数，当水中含铁量高时，甚至能堵塞冷却水管。

在油田的油层注水中，铁和锰能堵塞地层孔隙，减少注水量，降低注水效果。

在纺织工业中，水中的铁和锰能固着于纤维上，在纺织品上产生锈色斑点。染色时，铁和锰能与染料结合，使色调不鲜艳。铁和锰还对漂白剂的分解有催化作用，使漂白作业发生困难。

在造纸工业中，水中铁和锰能选择性地吸附于纤维素之间，使纸浆颜色变黄，并使漂白和染色效果降低。

在酿造用水中，铁和锰有异味，并能与某些有机物（如水杨酸、丹宁等）生成带色的化合物，使产品色和味的质量降低。

在食品工业中，水中过量的铁和锰能影响产品的色泽。

在电解用水中，铁和锰能在阴极生成霜，并增大隔膜的电阻，降低电解效率。

在给水处理工程中，含有过量铁和锰的地下水能在管道中产生沉积，特别是当水中含有溶解氧时，含铁含锰地下水为铁锰细菌的大量繁殖提供了条件，从而，常造成管道堵塞。此外，铁锰细菌和硫酸盐还原菌共生，能加速金属管道的腐蚀。

水中的铁和锰沉积在离子交换剂和离子交换树脂膜上，能降低这些水处理设备的效能。

水中铁和锰的危害还有很多，就不一一列举了。

为了避免水中铁和锰给生产和生活带来危害，对水中的铁锰

浓度有一定的限制。表 1-1 即为部分生产和生活用水的允许含铁量和含锰量。

我国含铁含锰地下水分布甚广。含铁含锰地下水比较集中的地区是松花江流域和长江中、下游地区。此外，黄河流域、珠江流域等部分地区也有含铁含锰地下水。同时含铁含锰地下水多分布在这些水系的干、支流的河漫滩地区，其水质因水的形成条件不同而有很大差异。

生活饮用水和工业生产用水允许的含铁量和含锰量 表 1-1

序号	名 称	含 铁 量 Fe(mg/L)	含 锰 量 Mn(mg/L)	铁锰总量 Fe + Mn(mg/L)
1	生活饮用水	0.3	0.1	
2	酿造用水	0.1	0.1	0.1
3	食品工业用水	0.2	0.2	0.2~0.3
4	罐头工业用水	0.2	0.2	0.2
5	汽水工业用水	0.2	0.2	0.2
6	制冰用水	0.03~0.2	0.2	0.2
7	制糖工业用水	0.1		
8	面包工业用水	0.2	0.2	0.2
9	洗衣行业用水	0.2	0.2	0.2
10	棉毛织品工业用水	0.25	0.25	0.25
11	纤维制品漂白用水	0.05~0.1	0.05	0.1
12	染色工业用水	0.05		
13	人造丝浆料工业用水	0.05	0.03	0.05
14	人造丝生产用水	0.00	0.00	0.00
15	塑料工业用水(透明)	0.02	0.02	0.02
16	感光胶片制造用水	0.05	0.03	0.05
17	制革工业用水	0.2	0.2	0.2
18	硫酸盐法纸浆用水	0.2	0.1	0.2
19	亚硫酸盐法纸浆用水	0.1	0.05	0.1
20	高级有光纸制造用水	0.1	0.05	0.1
21	电镀工业用水	痕量	痕量	痕量
22	油田油层注水	0.5	0.5	0.5
23	一般锅炉用水	0.3	0.3	0.3
24	一般冷却用水	0.5	0.5	0.5
25	空气调节用水	0.5	0.5	0.5

我国地下水的含铁量，多数在 10mg/L 以下，少数超过 20mg/L ，但一般不超过 30mg/L 。地下水的含锰量，多数在 1.5mg/L 以下，少数超过 3mg/L ，但一般不超过 5mg/L 。

我国含铁含锰地下水的 pH 值，绝大多数介于 $6.0\sim 7.5$ 之间，其中多数低于 7.0 ，少数高于 7.0 。但是，黄河流域的含铁含锰地下水的 pH 值则大都高于 7.0 ，相应的含铁量和含锰量则较低。含铁含锰地下水的 pH 值低于 6.0 的和高于 7.5 的都比较罕见。

浅层含铁含锰地下水的温度，因所在地区不同而呈规律性的变化。松花江流域地下水的温度一般为 $3\sim 10^{\circ}\text{C}$ ；黄河下游地区为 15°C 左右；长江中下游地区为 20°C 左右；珠江中下游地区为 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

我国一些地区的含铁地下水的水质资料，列于表2-9。

第二节 我国地下水除铁技术的发展

解放前，我国经济十分落后，净水厂很少，只有少数几座小型地下水除铁设施。

1949年，中华人民共和国成立了。建国以来，我国国民经济有了巨大发展。为适应工、农业生产和城镇人民生活迅速发展的需要，我国地下水除铁除锰技术也有了很大进展和提高。

建国初期，地下水除铁技术都是从国外引进的，当时采用的都是自然氧化除铁工艺。这种工艺一般由曝气、氧化反应、沉淀和过滤组成。曝气是先使含铁地下水与空气充分接触，让空气中的氧气溶解于水中，同时大量散除地下水中的二氧化碳，以提高水的 pH 值。氧化反应和沉淀是让水在反应沉淀池中停留相当长的时间，使水中的二价铁被溶解氧全部氧化为三价铁，并絮凝沉淀下来。由于地下水中二价铁的氧化反应一般比较缓慢，所以要求水在池中的停留时间较长，从而需要十分庞大的反应沉淀池容积。反应沉淀后，水中还残留许多铁质悬浮物，需经石英砂滤池