

盐类矿床水溶开采

● 王清明 编著



化学工业出版社

盐类矿床

水溶开采

王清明 编著

5

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

盐类矿床水溶开采/王清明编著. —北京: 化学工业出版社, 2003. 5

ISBN 7-5025-4375-9

I. 盐… II. 王… III. 水溶法采盐 IV. TS353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 021257 号

盐类矿床水溶开采

王清明 编著

责任编辑: 叶铁林

文字编辑: 张彦 温建斌

责任校对: 陶燕华

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 13¼ 插页 1 字数 357 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4375-9/TD·2

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换



序 言

水溶开采有着悠久的历史，但又是近百年才逐渐引起人们的重视而获得飞跃发展的新型采矿方法。

我国自 20 世纪 60 年代以来，在认真总结长期水溶开采经验的基础上，吸收相关行业的先进技术和装备，积极试验国外先进的水溶开采方法，使我国的水溶开采技术有了长足的发展，有的已达到世界先进水平。目前在易于水溶的盐类矿床中，古代石盐矿床自 20 世纪 70 年代以来，已用水溶开采取代了常规的地下开采；天然碱、无水芒硝和钾盐矿床先后应用水溶开采；盐湖固相矿床亦配合应用水溶开采。各种水溶开采方法在盐类矿床开采中得到了广泛应用。

《盐类矿床水溶开采》一书凝聚了作者长期从事水溶开采实践与研究的成果，汇集了国内外关于水溶开采的机理研究与应用经验。书中注重理论与实践相结合，应用国内外资料互为补充，简明扼要地阐述了国内外水溶开采技术的发展简史和展望；较系统地阐述了盐类矿床水溶开采的基本理论、基本问题和水溶开采矿山建设的基本要求；对水溶开采方法进行了科学分类，并分别进行了阐述；简要介绍了水溶开采的工艺与设备、采集卤与输卤等。这本书可供从事盐类矿床地质勘查、科研、设计、教育、生产与管理者借鉴，有助于促进水溶开采技术的普及与提高，对推动我国盐类矿床开采技术进步具有重要作用。感谢作者为我国发展矿盐水溶开采技术作出的贡献和付出的辛勤劳动！

谭 洽

2002 年 8 月 28 日

（谭洽：中国矿业协会常务理事、中国盐业协会常务副理事长、教授级高级工程师。）

中盐勘察设计院院长胡红江题词

总结盐类矿床水溶
开采经验,促进水
溶开采技术进步!

胡红江
2002.8.8

前 言

我国的盐类矿产资源极为丰富，世界上盐类矿产水溶开采的历史以我国最早，源远流长。但是，水溶开采技术开始引起人们重视，逐步在盐类矿床开采中推广应用，则是在 20 世纪 60 年代以后。近 40 年来，我国的水溶开采技术有了长足进步，有的已达到世界先进水平。广大水溶开采技术工作者为此付出了艰辛的劳动，积累了丰富的实践经验，在有关刊物发表了大量论文。笔者作为其中一员，深感有进一步全面系统总结之必要，遂撰写《盐类矿床水溶开采》一书。

该书从编写提纲，到完成书稿，得到了中国盐业总公司、中国盐业协会和中盐勘察设计院领导的亲切关怀和鼓励，得到了全国井矿盐信息中心和同行们的大力支持和帮助。值得特别提出的是，中南大学彭续承教授和化工部长沙设计研究院原总工、教授级高级工程师王方强同志对编写提纲提出了宝贵意见；中南工学院王昌汉教授、核工业六所王西文教授、中科院盐湖研究所郑喜玉研究员、连云港化工高等专科学校孙镇德教授、青海格尔木盐湖工业集团公司高级工程师王石军和中盐勘察设计院高级工程师陈贵庭、饶杰等同志提供了国内有关宝贵资料，王方强同志还无私提供了自己多年积累的资料卡片，使该书内容更加丰富。在书稿撰写过程中，肖文科、葛信达和续培信同志参加了部分工作，刘丽萍、范晓霞和熊卫红同志给予了很大帮助。完稿后，承蒙全国井矿盐信息中心主任、高级工程师周伯琦同志组织盐矿水溶开采专家谢德明、马宗瑶、聂成勋同志进行了审阅；中南大学教授、原中国有色金属学会特殊采矿专业委员会副主任邹佩麟同志和化工部长沙设计研究院原总工、教授级高级工程师王方强同志对书稿全面审阅，大家提出了很多宝贵意见，使该书内容得以充实、提高。化工出版社叶铁林编审为本

书的问世做了大量工作：提供参考资料，审查编写提纲，认真审稿、改稿，使本书增色不少。在此一并致以衷心的感谢。

笔者希望该书的出版对促进盐类矿床水溶开采技术进步和盐类矿山建设有所裨益。因限于水平和撰写能力，难免不妥和挂漏之处，还望读者指正，以臻完善。

编著者

2003年春节于长沙

目 录

1 绪论	1
1.1 水溶开采的特点和优点	2
1.2 中国盐类矿床水溶开采简史	4
1.2.1 现代盐湖矿床水溶开采简史	4
1.2.2 古代盐类矿床水溶开采简史	7
1.3 欧美国家水溶开采发展的历史	14
1.4 中国水溶开采技术的发展	18
1.4.1 原有注水溶盐-提捞采卤技术提高阶段	19
1.4.2 水溶开采技术试验应用起步阶段	19
1.4.3 水溶开采技术全面发展阶段	21
2 盐类矿床工业类型	25
2.1 石盐矿床工业类型	26
2.1.1 碳酸盐岩系型石盐矿床——硬石膏-石盐矿床	27
2.1.2 碎屑岩系型石盐矿床	28
2.1.3 次生及变形石盐矿床	32
2.1.4 盐湖型石盐矿床	33
2.2 钾盐矿床工业类型	35
2.2.1 碎屑岩系型钾盐矿床——云南勐野井钾盐矿床	36
2.2.2 盐湖型钾盐矿床	37
2.3 硫酸钠矿床工业类型	39
2.3.1 碎屑岩系型硫酸钠矿床	41
2.3.2 盐湖型硫酸钠矿床	42
2.4 碳酸钠矿床工业类型	45
2.4.1 碎屑岩系型碳酸钠矿床	45
2.4.2 盐湖型碳酸钠矿床	47
3 盐类矿床的工业特性	48
3.1 盐类矿石与围岩的工业性质	48

3.2	盐类矿床的工业特性	57
3.3	矿床经济地理条件和开采技术条件	60
3.3.1	矿床经济地理条件	60
3.3.2	矿床开采技术条件	61
4	水溶开采概述	62
4.1	水溶开采的基本原理	62
4.1.1	盐类矿物溶解机理	62
4.1.2	溶解度	65
4.1.3	溶解速度与溶解速率	74
4.1.4	水溶开采的动力学原理	80
4.1.5	侧溶底角	85
4.2	水溶开采矿山建设的基本要求	86
4.3	水溶开采的几个基本问题	90
4.3.1	开采单位	90
4.3.2	开采步骤与两级矿量	91
4.3.3	开采顺序	94
4.3.4	矿山建设规模与服务年限	95
4.3.5	矿石采收率与开采损失率	98
4.3.6	钻井水溶开采的溶解作用与溶洞形状	105
4.3.7	水溶开采矿山采空区的稳定性与盐矿水溶开采溶洞的利用	112
4.3.8	盐类矿产资源的合理开发利用与保护	134
4.4	水溶开采的开拓方法	137
4.4.1	水溶开采的开拓方法分类	137
4.4.2	水溶开采的开拓方法选择	140
4.5	水溶开采方法	141
4.5.1	水溶开采方法的名称	141
4.5.2	水溶开采方法分类	142
4.5.3	水溶开采方法选择	146
5	钻井水溶法的矿床开拓——钻井工程	149
5.1	钻前准备阶段	149
5.2	钻井阶段	153
5.2.1	钻机类型及选择	153
5.2.2	钻井及钻井地质工作	156

5.3 完井阶段	157
5.3.1 地球物理测井	157
5.3.2 固井	169
5.3.3 盐井完成	191
5.3.4 钻井资料整理及完井交接	194
6 注水溶盐——提捞和抽汲开采法	196
6.1 提捞采卤法	196
6.2 抽汲采卤法（潜卤泵采卤法）	200
7 单井对流水溶开采法	214
7.1 简易对流水溶开采法	214
7.2 油垫对流水溶开采法	234
7.3 气垫对流水溶开采法	257
8 井组连通水溶开采法	270
8.1 对流井溶蚀连通水溶开采法	270
8.1.1 自然溶蚀连通水溶开采法	271
8.1.2 油垫建槽连通水溶开采法	276
8.1.3 气垫建槽连通水溶开采法	280
8.2 水力压裂连通水溶开采法	281
8.2.1 压裂造缝机理	282
8.2.2 压裂井组布置	295
8.2.3 压裂井井身结构	298
8.2.4 压裂工艺与主要压裂设备	300
8.2.5 常用压裂作业方法分类	303
8.2.6 压裂建井阶段	303
8.2.7 分层压裂连通多层同时溶采工艺	314
8.2.8 压裂连通法的优缺点及应用条件	321
8.2.9 压裂连通法开采应用实例——湖南湘潭盐矿一采区	322
8.2.10 分层压裂连通多层同时溶采工艺应用实例——河南 吴城盐碱矿	325
8.3 定向井连通水溶开采法	331
8.3.1 定向斜井连通水溶开采法	332
8.3.2 中小半径水平井连通水溶开采法	333
8.3.3 径向水平井连通水溶开采法	342

9 硇室水溶开采法	348
9.1 矿床开拓	348
9.2 采矿准备	348
9.3 水溶回采	349
9.4 硇室水溶开采主要工艺参数	351
9.5 硇室水溶法的优缺点及应用条件	353
9.6 硇室水溶法开采应用实例——平浪盐矿元永井矿区	353
9.7 硇室水溶法在新津钙芒硝矿床开采中的应用	355
10 井式、沟渠式、井-渠式水溶开采法和矿层表面水溶开采法	362
10.1 井式水溶开采法	363
10.2 沟渠式水溶开采法	368
10.3 井-渠式水溶开采法	373
10.4 矿层表面水溶开采法	379
11 采集卤与输卤	383
11.1 采集卤	383
11.2 输卤	387
11.3 采集卤和输卤管道防盐类结晶	400
11.3.1 古代盐类矿床水溶开采时采集卤和输卤管道防盐类结晶	400
11.3.2 盐湖矿床采、输卤过程防盐类结晶	401
11.4 采卤和输卤自动控制	404
主要参考文献	406

1 绪 论

盐类矿床是盐类物质在地质作用过程中，在适宜的地质条件和干旱的气候条件下，水盐体系天然蒸发、浓缩而形成的天然卤水和化学沉积矿床。其水溶开采利用的对象是盐类矿物。

盐类矿物有一个共性，就是能溶于水。只是不同的盐类矿物溶于水的难易程度不同、溶解度不同及溶解速度不同罢了。

水溶开采就是根据大部分盐类矿物易溶于水的特性，把水作溶剂注入矿床，在矿床赋存地进行物理化学作用，将矿床中的盐类矿物就地溶解，转变成流动状态的溶液——卤水，然后进行采集、输送的一种采矿方法。在采矿学著作中，水溶开采通常被列入“特殊采矿方法”。

这种特殊采矿方法与常规的“地下开采”和“露天开采”方法有很大差异，它集采、选、冶于一体，运用“化学工艺学方法”，直接从矿石中提取有益组分，而且提取的产品不是矿石，而是化学溶液，故有的学者把它列入“化学采矿法”。因为溶解有用成分的物理化学过程是在地下进行的，有的学者又称之为“地下浸析”。由于这种采矿工艺是在地质学、水文地质学、地球化学、化学工艺学和采矿学等学科的基础上形成的，又有的学者把它列入“地球工艺采矿法”。美国工程师协会把这种特殊采矿方法称为“溶解采矿法”。我国有的学者认为，因为注入的是溶液，采出的仍是不同质的溶液，故名之为“液相开采”。有的学者把溶解和浸出有用成分的特殊采矿方法统称为“溶浸采矿”。

尽管各国学者对这一采矿方法的命名尚不完全一致，但在漫长的生产实践中，经过长期的研究试验，水溶开采已发展成为一门独立的应用科学。在氯化物（如石盐、钾石盐）、硫酸盐（如无水芒硝、芒硝、钙芒硝）、碳酸盐（如天然碱）等盐类矿床开采中得到

广泛运用，取得了良好的技术经济效果。

1.1 水溶开采的特点和优点

(1) 水溶开采方法的特点

水溶开采方法有两个突出的特点。

① 水溶开采方法突破了常规开采方法“先采矿石后加工”的程序，把采、选、冶融为一体，在盐类矿床所在地进行物理化学的加工过程，溶解开采矿石中的有益组分，把泥沙等杂质留在原地。

② 直接作用于矿体的“开采工具”是最廉价的溶剂——水或淡卤，有的矿床加助溶剂（如 NaOH 等），经过物理化学作用，把固相盐类矿物转变为流动状态的溶液——卤水，然后进行提取。

(2) 水溶开采方法的优点

水溶开采方法已广泛应用于盐类矿床开采。将应用最广的钻井水溶法与常规的开采方法相比，有许多优点，主要表现在以下四个方面。

① 简化生产工序，加快矿山建设，降低基建费用和生产成本。

用地下开采方法至少需要 10~11 道主要工序才能采出矿石；而水溶采矿只需 2~3 道工序就能采出卤水。

水溶开采时，钻井替代了地下开采的井巷，大大缩短了开拓和采准时间。例如开采埋深 800~1000 m 的矿床，进行地下开采时，仅开凿竖井就需要 3~5 年；若用钻井开拓，根据钻机型号和开动的钻机数量多少，多则 1~1.5 年，少则几个月就能完成，大大加快了矿山建设速度。

水溶开采不开凿井巷，省去了地下开采所需的凿岩爆破、破碎、装载、落矿、运输、提升、通风、排水、井下供电等大型设备和井口构筑物，其所需设备主要是为数不多的水泵和变配电设备。加之开拓工程量少，基建时间短。因此，矿山基本建设费用大幅度降低，卤水生产成本亦大大降低。例如湖北应城盐矿水溶开采与原来的地下开采相比，其矿山基建投资不到地下开采基建投资的四分之一，卤水生产成本降低 80%~90%。

② 增大开采深度，扩大可采储量，在一定条件下可提高矿石采收率。

由于安全因素和技术经济因素的制约，常规开采方法开采盐类矿床的深度受到限制。例如，德国和加拿大钾盐矿床开采的最大深度不超过 1100 m，原苏联钾盐矿床开采深度以 800 m 为限，我国石盐矿床开采深度不超过 500 m。而水溶开采的开采深度已达 3000 m 左右。

盐类矿床的埋藏深度各不相同，从数十米、数百米到 2000～3000 m 以上。我国湖北潜江盐矿埋藏最深，王深 2 井井深达 5100 m，尚未揭穿含盐岩系。水溶开采的深度增大后，其可采储量相应扩大。例如，加拿大萨斯喀彻温钾盐矿床可供常规开采的钾盐储量约 50 亿吨，仅占总储量的 6.8%；而可供水溶开采的钾盐储量增加到 686 亿吨，占总储量的 93.2%。荷兰在 1972 年前已成功用地用溶解开采法回收埋深 2400 m 的光卤石矿，使光卤石的可采储量大大增加。

③ 改善劳动条件，提高劳动生产率。

地下开采劳动强度大，生产和安全条件较差，特别是粉尘危害身体健康。而且随着开采深度的增加，地温、地压随之增加，劳动条件更加恶化。而水溶开采作业全部在地面进行，劳动强度轻，生产和安全条件大为改善。

由于水溶开采生产工序大大简化，采矿原料和产品输送全部实现了“管道化”，有利于实现生产的自动控制，劳动生产率亦显著提高。例如，美国凯恩格里克钾盐矿，用房柱法开采时，全员劳动生产率为 87.4 t/(人·月)；1972 年改用钻井水溶开采时，全员劳动生产率达 350 t/(人·月)，约为房柱法开采的 4 倍。我国湖北应城盐矿改用钻井水溶开采后，其劳动生产率比原用的房柱法开采提高 5 倍。德国施塔德盐厂年生产能力 37 万吨，厂、矿之间距离 7 km，矿山有 5 口井，使用 3 口井，用油垫对流法开采，采卤和输卤实现自动化，仅 1 名工程师和 2 名工人进行管理。

④ 减轻环境污染。

地下开采时，弃土、弃渣和尾矿堆积需要占用大量土地资源。含泥沙等杂质较高的盐类矿石运到地面后，有的还要溶解再制，易发生卤水流失。特别是大量残渣中的盐类物质被雨水淋滤后，形成卤水，四处流失，严重污染地表水和地下水，造成土壤盐渍化，破坏生态环境，影响农业生产。水溶开采时，将盐类矿物就地溶解成卤水后采出，矿渣留在原地，对环境污染大大减轻。我国要用占世界 7% 的耕地，养活占世界 22% 的人口，减轻环境污染，保护生态环境就有着更加重要的意义。

同时，我们也应清醒地认识到，水溶开采作为一门尚在发展的应用科学，其基本理论和开采方法尚不够完善；矿石采收率一般较低；尚有少数矿山诱发地质灾害，出现地面沉降和冒卤，导致破坏地面设施，污染生态环境，影响农业生产。因此，水溶开采尚需不断发展和完善。

1.2 中国盐类矿床水溶开采简史

概括地说，我国水溶开采始于石盐矿床；而石盐矿床的开发利用，又始于盐湖卤水和石盐矿石自然溶解后而出露地表的天然卤水。嗣后，随着科学技术的进步和经济发展，逐步开发地下卤水和石盐矿床。全面采用水溶开采，是盐类矿床水溶开采技术发展的最新阶段。

由于现代盐湖矿床和古代盐类矿床的水溶开采方法有一定差异，其发展阶段亦存在差异，故分别予以阐述。

1.2.1 现代盐湖矿床水溶开采简史

现代盐湖矿床大多是固液相并存的盐类矿床。根据史料分析，我国是世界上最早开发利用盐湖卤水（包括石盐自然溶解形成的卤水）晒制食盐的国家。在经过长期的生产实践后，才逐步认识到石盐的溶解与富集规律，并用于制盐生产，进而利用石盐易溶于水的特性进行水溶开采。

(1) 我国对盐湖卤水的早期开发利用

史实资料说明，我国盐矿开发利用的历史肇始于湖盐，以河东盐

池，亦称解池（即含山西运城盐湖）最古，而且是首先开发利用盐湖卤水（包括石盐自然溶解形成的卤水）。这自有文字以来就有记载。

文字是记录语言的符号，语言早于文字。因此“卤”名也应当早于“卤”字。至于“卤”作为自然盐的发现和最早利用，应早于商，并上溯至夏，甚至夏以前的洪荒时代。

史料记载：“解池产盐，必资南风。相传虞、舜所歌‘南风’，‘熏风阜财’，意即南风之时，可以阜财，即指此池。盖指解池晒盐而言。”● 礼记乐府曲名有“昔昔盐”、“黄帝”，可见民间相传“黄帝”时代人们就已经食用“鹽”了。

综上所述，我国盐湖远在五六千年前就已开发利用，而且是首先开发利用盐湖卤水晒盐，自然溶盐形成的卤水亦不自觉地予以开发利用。

（2）盐湖固相矿床水溶开采的最早认识与实践

如果说人们最早开发的是自然界形成的盐湖卤水，在经过长期的生产实践后，约于 1400 多年前的南北朝时期，已逐渐认识了石盐的自然溶解与富集规律，并加以利用。

《水经注》记载：“盐池在安邑西南，……今池水东西七十里，南北十七里。紫色澄渟，浑而不流。水出石盐，自然印成，朝取夕复，终无减损。”“惟山水暴至，雨湔横淹奔洑，则盐池用耗，故公私共竭水径，防其淫滥。”● 山西运城文化馆内有一块唐贞元时代的碑文，证实唐初（公元 618 年）已采用治畦（即今之盐田）浇灌卤水日晒制盐（与清朝碑石所刻制盐图景相似），卤水取自盐湖中央之黑河●。为防止地表水侵入，在盐湖周围筑坝围堤。《梦溪笔谈》亦记述：“解州盐泽，方百二十里。久雨，四山之水悉注其中，未尝溢；大旱未尝涸。……唯中间有一泉，乃是甘泉，得此水然后可以聚。又其北有尧梢水（即今山西夏县白沙河），亦谓之巫咸河。

● 曾仰丰：《中国盐政史》。

● 南北朝时期，北魏郦道元（公元 466～527 年）：《水经注》。

● 据史料和运城盐湖水文地质条件分析，“黑河”系盐湖底部之承压水越流补给盐湖，溶解盐层所形成的盐溶洞。

大卤之水，不得甘泉和之，不能盐。唯巫咸水入，则盐不复结，故人谓之‘无咸河’，为盐泽之患，筑大堤以防之，甚于备寇盗。”^①这些史料说明，至少在1400多年前南北朝时期郦道元著《水经注》时，人们已经认识并利用石盐的自然溶解与结晶规律，并用于制盐生产。可以认为，这是盐湖固相矿床水溶开采的最早认识与实践。

(3) 水溶开采之肇端

唐朝可能是解池产盐最盛时期。此后盐源暂竭，雨旱时侵，生产能力远不如过去。清乾隆二十二年（公元1757年），大水淹没了运城盐湖，“黑河”淤积。此后，晒盐用原料卤水取自人工挖成的漳沱（即大口井）。漳沱一般深4~5丈，其上部面积最大达10亩，向下逐渐缩小。漳沱底部一般都有地下水源（即盐湖承压水）。人工挖掘漳沱，利用承压水溶解地下石盐矿层，生成卤水，再取卤晒盐。可以说，这是世界盐湖固相矿床水溶开采之肇端。

(4) 凿井法水溶开采和井组连通法水溶开采的最早实例

由于开挖漳沱需要大量劳力，且因为周边未加固，井壁容易坍塌报废。清光绪六七年间（公元1880~1881年）开创凿井法。首次在运城盐湖东南部土质比较坚硬的地区凿井。井边采用四角方木支架进行加固，后改用六角形支架加固，以防井壁坍塌。

“卤井分活卤井和过水卤井两种”。所谓“活卤井”，在井底有地下水源溶解盐层，可以直接从该井采取卤水，为凿井法水溶开采。“过水卤井”往往在井底缺乏地下水源或地下水源不足，不能直接从该井采取卤水。“过水卤井”一般以2个（或多个）井构成一组，井间距离（或中心井与周围各井间之距离）约数十米。由于盐湖固相矿床孔隙度较大，从其中一井注入淡水，溶解地下盐层，生成卤水后，可从另一井用水车将卤水提至地面晒盐；或从中心井灌注淡水，溶解盐层，生成卤水后，自周边群井中提取卤水至地面晒盐。可以认为，这是世界盐湖固相矿床采用凿井法水溶开采和井

●（北宋）沈括（公元1031~1095年），《梦溪笔谈》，“甘泉”即淡水。自北魏至北宋末的六百余年，解池面积约缩小到1/10。