

梁卫国 著

盐类矿床控制 水溶开采理论及应用



科学出版社

www.sciencep.com

盐类矿床控制 水溶开采理论及应用

梁卫国 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了作者多年来采用实验研究、理论分析、数值模拟和现场试验的方法,在盐类矿床成因、盐岩物理力学特性、盐岩高温力学特性、盐类矿床水压致裂-溶解理论、盐类矿床水溶开采多场耦合理论、群井致裂控制水溶开采技术、盐类矿床内油气储存及储库建造等多方面取得的主要研究结果。

全书共分八章,第一章至第三章介绍了盐类矿床的成因、盐岩的物理力学特性、开采理论与技术现状;第四章给出了盐类矿床水压致裂-溶解耦合理论及技术;第五章给出了盐矿水溶开采的固-流-热-传质耦合理论;第六章介绍了盐类矿床控制水溶开采的物理模拟实验;第七章介绍了盐类矿床群井致裂控制水溶开采方法及其现场应用;第八章对盐类矿床内油气储存及储库建造的相关问题进行了研究。

本书可作为盐类矿床开采专业的本科生、研究生参考教材,也可作为从事盐岩内油气储库建造、核废料处置及岩石力学等专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

盐类矿床控制水溶开采理论及应用/梁卫国著. —北京:科学出版社,2007
ISBN 978-7-03-018665-2

I. 盐… II. 梁… III. 盐类矿床-水溶法采盐-研究
IV. TS353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 026832 号

责任编辑:王志欣 孙 芳 吴伶俐 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 3 月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—2 000 字数:210 700

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

我很高兴地阅读了太原理工大学梁卫国博士的著作《盐类矿床控制水溶开采理论及应用》，它确实是一本盐矿水溶开采领域的好书。2002年，我曾主持过他们的科研项目鉴定工作，与会专家对该项目给予很高的评价，该项成果2005年获国家技术发明二等奖。该书在该项目的基础上，又增加了大量有关盐类矿床物理力学特性、水溶开采的耦合作用理论等新内容，遂成为一部系统的、新的盐矿开采理论、方法与工程实施的学术专著。

盐类矿床是氯化钠、硫酸钠、碳酸钠等无机盐矿的统称，是人类生活和无机盐工业的必需品，在我国分布较广，盐矿的开采与利用在国民经济中占有重要地位。

为了解决我国几十年来沿用国外的单井油垫建槽、双井连通水溶开采方法存在的开采效率低、回采率低、开采成本高的技术难题，太原理工大学盐矿开采课题组对盐岩物理特性、溶解特性、热学特性、流变特性、盐矿控制水压致裂实验与理论、盐矿水溶开采的多场耦合作用理论及数值模拟等进行了系统的基础研究工作，该书对此作了详细的介绍。作者在理论与实验研究的基础上发明的“盐类矿床群井致裂控制水溶开采方法”已在工业实践中得到推广应用，使开采效率和回采率大幅度提高，成本大幅度下降，取得了非常好的效果。这些技术方案、施工工艺及实施效果在书中均作了系统的介绍。

由于盐岩矿床流变性强、十分致密，并具有损伤再结晶等优越特性，国际上常把已采矿区作为油气储存和核废料处置的首选场所，这些内容在该书中也得到了反映。

该书是一部不多得的采矿专著，它的出版对盐矿水溶开采、原位溶浸采矿科学与岩石力学的发展有很大的推动作用，我深信它将受到广大采矿及岩石力学工作者的欢迎。

中国工程院院士
中南大学教授



2007年1月

前 言

盐类矿床是氯化钠、硫酸钠、碳酸钠等盐类物质在地质作用过程中、在适宜的地质环境和干旱的气候条件下,水盐体系天然蒸发、浓缩而形成的化学沉积矿床,是重要的化工原料来源。在地质上,盐类矿床具有分布广、规模大、类型多、构造和水文条件简单、缺乏断裂构造、埋藏深度大、盖层隔水性能好等优良条件;在物理力学特性方面,盐类矿床与其他岩层相比具有含水少或不含水、孔隙度低、渗透率小、导热性强、塑性大、结构致密等特殊性质。由于这些特殊的地质条件及物理力学特性,盐类矿床及其采后溶腔还被公认为是石油、天然气储存和放射性废物进行地质处置的理想场所。

由于盐类矿物具有易溶于水的特性,因此对盐类矿床的开采常采用水溶开采的方法。水溶开采过程是一个涉及矿物溶解、固体变形、化学流体运移、传质传热等多场相互作用的固-流-热-传质耦合问题。现有的溶解传质理论并不完备,不能完全解释这一复杂的耦合过程,因而在一定程度上也制约了水溶开采技术的发展。因此,开展以多场耦合理论为基础的盐类矿床控制水溶开采及其应用的研究,不仅丰富了盐类矿床水溶开采理论,进一步促进水溶开采技术的发展,而且也奠定了在盐类矿床内油气储库建造的理论及应用基础,具有十分重要的理论意义和应用价值。

本书以盐类矿床控制水溶开采理论及应用作为研究课题,通过实验研究、理论分析、数值模拟及现场试验的方法,对围绕该课题的盐类矿床成因、盐岩物理力学特性、高温力学特性、盐类矿床水压致裂-溶解理论、盐类矿床水溶开采多场耦合理论、群井致裂控制水溶开采技术及盐类矿床内油气储存及储库建造进行了较系统的研究。具体内容如下:

第一章,绪论。对盐类矿床概况、盐类矿床的开发应用、盐类矿床开采技术、水溶开采理论及水压致裂理论技术的现状进行了综合分析研究,进而提出亟待研究解决的问题。

第二章,盐类矿床成因及盐岩物理力学特性。盐类矿床的成因有“盆地隔断沉积”理论、“环状沉积”理论、“片断沉积”及“循环沉积”理论。盐岩的物理特性,主要表现为其孔隙率及渗透性低。在对岩盐及钙芒硝盐岩溶解渗透实验研究的基础上,进行了盐岩的蠕变特性研究。

第三章,盐岩高温及损伤再结晶力学特性。在盐岩基本力学特性实验的基础

上,进行了在 240℃ 范围内盐岩高温力学特性以及损伤盐岩高温再结晶力学特性的实验研究。研究发现:盐岩力学特性具有明显的温度效应特征,随着温度的升高,盐岩的强度与温度成对数关系增强,塑性变形量也在相应增大;高温再结晶可以使已损伤的盐岩晶间摩擦系数得以恢复。

第四章,盐类矿床水压致裂-溶解耦合理论及技术。盐类矿床水力压裂,是一个岩体断裂、溶液渗流、裂纹起裂扩展、盐岩溶解扩散等多因素综合作用的固-流-溶解-扩散耦合作用过程。本书在耦合理论分析的基础上,建立了盐类矿床水压致裂-溶解理论,提出了盐类矿床的水压致裂连通技术。数值模拟结果表明,在水压致裂过程中,盐岩水力裂缝呈薄饼状张开,其裂缝宽度与距离、时间的关系为: $w = (0.0034 + 0.0006t)e^{(0.0007 + 0.0018t)x}$,数值模拟结果与现场压裂试验结果相吻合。

第五章,盐矿水溶开采固-流-热-传质耦合理论。盐矿水溶开采过程,是一个矿物溶解、固体变形、化学流体运移、传热传质等多场相互作用的固-流-热-传质耦合作用过程,矿物的溶解与溶腔内的流场、溶液浓度场以及温度场密切相关。本书以岩体力学、流体力学、传热传质学等理论为基础,建立了盐矿水溶开采的固-流-热-传质多场耦合理论,并进行了相应的数值模拟。数值模拟结果清楚地表明了多场之间的相互作用关系。

第六章,盐矿控制水溶开采模拟实验研究。在室内进行了盐矿水溶开采的模拟实验,研究在盐岩水溶开采过程中各个物理量的变化及相互作用规律。室内模拟实验结果表明:在水溶开采过程中,盐岩溶解速度与溶蚀面积成指数关系,而溶解速度,则在一定范围内随流速的增大而增大;水力压裂可以使裂缝沿软弱夹层大面积扩展,并实现群井之间的连通,矿床的溶解特征与数值模拟结果一致。

第七章,群井致裂控制水溶开采技术及应用。群井致裂控制水溶开采技术,是利用盐类矿床水压致裂裂缝大面积扩展及群井间流体流向可调控的特性,对盐类矿床实施高效、低成本的控制溶解开采。在上述理论分析及实验研究的基础上,提出了群井致裂控制水溶开采技术,并进行了现场试验研究。试验结果表明,群井致裂控制水溶开采,是一项理论科学、技术可行、可以实现高回采率、高效率、高效益、低成本的水溶开采方法。

第八章,盐类矿床内油气储存及储库建造。对在盐类矿床采后溶腔内进行石油、天然气储存和核废料地质处置、储库溶腔的建造方法以及储库的稳定性原则,进行了初步的研究分析。

本书凝聚了太原理工大学采矿研究所盐矿开采课题组许多研究者的辛勤劳动,更多地凝结了课题组组长赵阳升教授在此领域创新的学术思想,作者对他们表示衷心的感谢。

本书是在国家自然科学基金(项目编号:50304011,50434050,50174040)、山西

省青年科学基金(项目编号:20041020)和中国博士后科学基金(项目编号:2005037683)的资助下完成的,在此对上述资助单位表示诚挚谢意!

在撰写本书过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著作者表示由衷的感谢!

非常感谢中南大学古德生院士在百忙之中审阅了本书稿,并为本书欣然作序!最后,感谢在创作本书过程中给予我大力支持和热情帮助的所有朋友和家人!由于作者水平有限,错误及不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2006年11月于太原理工大学清泽园

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 盐类矿床及其开发利用	1
1.2 水溶开采技术的发展	5
1.3 盐类矿床水力压裂	8
1.4 盐类矿床水溶开采理论的发展.....	11
参考文献	13
第二章 盐类矿床成因及盐岩物理力学特性	17
2.1 盐类矿床的形成.....	17
2.2 盐岩的物理特性.....	22
2.3 盐岩蠕变及其本构方程.....	27
2.4 盐岩蠕变实验研究.....	33
参考文献	37
第三章 盐岩高温及损伤再结晶力学特性	39
3.1 引言.....	39
3.2 盐岩常温力学特性实验.....	40
3.3 盐岩高温力学特性实验.....	46
3.4 盐岩损伤再结晶力学特性实验.....	51
参考文献	55
第四章 盐类矿床水压致裂-溶解耦合理论及技术	57
4.1 引言.....	57
4.2 盐类矿床断裂力学理论.....	58
4.3 盐类矿床水压致裂-溶解耦合数学模型	60
4.4 水压致裂-溶解耦合数学模型离散	65
4.5 盐类矿床水压致裂-溶解的数值模拟	68
4.6 盐类矿床水压致裂技术及应用.....	77
参考文献	81
第五章 盐矿水溶开采固-流-热-传质耦合理论	83
5.1 引言.....	83

5.2 盐矿水溶开采机理·····	83
5.3 水溶开采固-流-热-传质耦合数学模型·····	88
5.4 耦合数学模型的泛函及离散·····	95
5.5 数值模拟分析·····	98
参考文献·····	110
第六章 盐矿控制水溶开采模拟实验研究·····	112
6.1 引言·····	112
6.2 双井对流水溶开采模拟实验研究·····	113
6.3 群井致裂控制水溶开采模拟实验研究·····	121
6.4 结果分析与讨论·····	131
参考文献·····	132
第七章 群井致裂控制水溶开采技术及应用·····	133
7.1 引言·····	133
7.2 群井致裂控制水溶开采技术·····	134
7.3 运城盐湖芒硝矿区地质概述·····	137
7.4 矿层控制水压致裂及注浆固井技术·····	140
7.5 群井水压致裂连通工业实施·····	143
7.6 群井控制水溶开采实施·····	149
7.7 控制溶解盐矿溶腔的反演分析·····	152
参考文献·····	156
第八章 盐类矿床内油气储存及储库建造·····	158
8.1 引言·····	158
8.2 盐岩溶腔油气储存·····	159
8.3 盐类矿床核废料地质处置·····	160
8.4 盐岩溶腔二氧化碳地质处置·····	162
8.5 盐岩溶腔油气储库建造·····	163
8.6 盐岩溶腔油气储库稳定性·····	166
参考文献·····	170

第一章 绪 论

1.1 盐类矿床及其开发利用

1.1.1 盐类矿床概况

盐类矿床是氯化物、硫酸盐、碳酸盐等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,因水盐体系天然蒸发、浓缩而形成的天然卤水和化学沉积矿床。关于盐类矿床的成因有多种理论解释^[1],如“盆地隔断沉积”(bar-basin sedimentation)、“环状沉积”(ring sedimentation)、“片断沉积”(fractional sedimentation)及“循环沉积”(cyclic sedimentation)等理论,而且在原始沉积之后,在地质作用过程中,大部分盐类矿床都要经历沉积之后的改变。常见沉积之后的改变机理有力学作用改变、古代溶解作用改变、近代溶解作用改变及化学改变。

与盐类矿床的成因相同,盐类矿床的物质来源也有多种理论解释^[2],具有代表性的理论主要有:奥克谢尼乌斯的“沙洲说”,认为盐类物质主要来源于海水;葛利普的“沙漠说”,认为盐类物质主要来源于陆地;许靖华的“干化深盆说”,认为盐类矿床成因于干旱气候带的干盐湖;科瓦列夫的“裂谷-沟壑说”,则认为盐类沉积是在裂谷、沟壑发展到一定阶段时形成的。经过多年的研究,我国地质学家认为盐类矿床中盐类物质的来源是多方面的,海水、地下深部水和陆源地表水带来的风化盐都是盐类矿床的物质来源之一,不同成盐盆地的地质构造形成的背景不同,各种来源的重要性及其所占的比重也不同。因此,盐类矿床是多途径来源的盐类物质及其水溶液,经历了浓缩、结晶、沉淀和积聚的发展过程,经过长期的地质年代之后,在一定的自然地理条件下形成的。

研究发现^[2],盐类矿床的沉积时代自显生宙以来,几乎每个纪,甚至遍及每个世都有,它被认为是一种特殊地质建造类型,是地球发展历史记录中的一个重要组成部分。在我国,经过谭锡畴、李春昱、李悦言、袁见齐等盐矿领域专家、学者多年的研究发现,我国的盐类资源十分丰富,从震旦纪到第四纪,几乎每个世都有盐类沉积出现,其中主要的成矿时代是寒武纪、中奥陶世、中下三叠世、中侏罗世、老第三纪和第四纪。在区域划分上,有位于东部的亚洲板块边缘裂陷盆地系沉积、滇南的板块碰撞裂谷盆地系沉积以及西北的陆内断陷盆地系沉积,地区分布极为广泛,遍及全国 19 个省(区)(图 1-1)。矿床类型繁多,除石盐、芒硝、天然碱、石膏外,还有钾盐、硼酸盐及其他一些稀有矿物矿床。

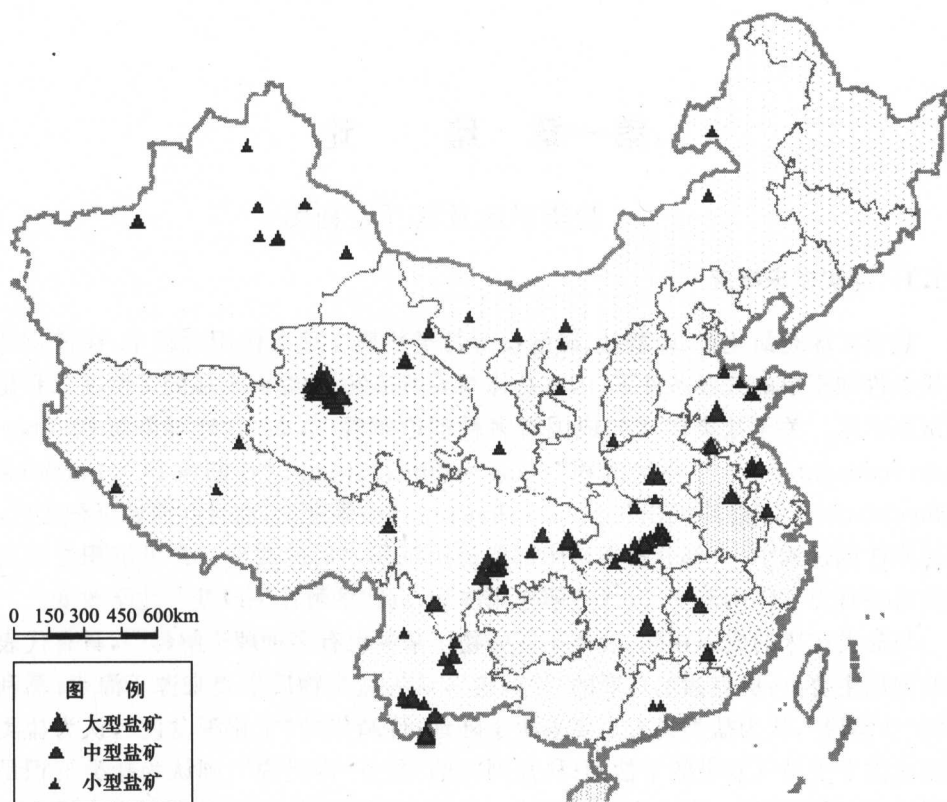


图 1-1 我国盐类矿产资源分布示意图(资料来源:中国矿业网)

1.1.2 盐类矿床的开发利用

盐类矿床,种类繁多,它们与人类生活和社会文明历来息息相关^[3,4]。食盐(NaCl)是人类生活的必需品,是人体内的必需物质,没有盐分人类将无法生存;无水芒硝(Na_2SO_4)(俗称“元明粉”)是化学工业和轻工业的主要或辅助原料,可用于硫化染料、有机药品、造纸、皮革、纺织等领域;石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)是制造硫酸、水泥、纸张等的重要原料,同时也是制药工业和模型制造业的上好原料;天然碱(Na_2CO_3)的用途更为广泛,日常生活中的油垢清洗、纺织化工等行业都有所用;钾盐可以生产钾肥、镁盐可以提炼镁、硼酸盐可以提炼硼、锂盐可以提炼锂,这些稀有元素在制造工业领域中有着极其重要的、不可替代的作用。由此可见,盐类矿床是十分重要的化工原料,在人类的日常生活和社会生活中占有十分重要的地位,它已被人类开发利用了几千年。

在利用水溶开采技术对盐类矿床进行开采的同时,研究发现,盐类矿床具有许

多特殊地质条件和物理力学性质^[5]。特殊地质条件表现为:首先是盐类矿床分布广、规模大、类型多;其次是构造和水文条件简单、地层完整、产状平缓、缺乏断裂构造、埋藏深度大、盖层隔水性能好、地壳稳定性好、无破坏性地震。在物理力学特性方面,盐类矿床与其他岩层相比具有含水少或不含水、孔隙度低、渗透率小、导热性强、塑性大、结构致密等优良特性。由于这些特殊的地质条件及物理力学特性,在欧洲、美洲一些国家,盐类矿床及其采后溶腔正作为油气地下储库或核废料地质处置库而被广泛应用^[6~8]。

地下储库由于具有容量大、成本低、安全性好的优点,已经成为世界上诸多国家主要的油气储备方式^[9]。在世界天然气储气总容量中,地下储库约占 90%。据统计,截至 1988 年,全美国 27 个州拥有的地下储库已达 393 个,占全世界储库总量的 80%,总容量达到 2320 亿 m^3 ,且到目前为止还在继续建造。在 20 世纪末,西欧各国已经把地下储气库建设作为天然气发展计划的一个重要组成部分,欧洲输气管道沿线的许多大城市为解决天然气季节性高峰需求问题,都建造了容积大小不等的各种地下储气库,并制定了相应的发展规划。自 1915 年加拿大建成世界上第一个地下储气库以来,到 20 世纪末,全世界共建成地下储气库约 500 多个,地下储气库的总容量已经达到 4600 亿 m^3 ,其中约 40% 的储气库建造于采后盐岩溶腔,美国在 20 世纪末期计划建造的 30 多个油气储库中,近 50% 选择在盐岩空穴中。

我国于 20 世纪 70 年代初期,曾经提出利用采后盐岩空间来储存“三废”,80 年代在四川自贡地区曾经进行过盐岩地下溶腔储存天然气试验和储存有害废液的研究^[10]。但是由于种种原因,这方面的工作进展缓慢。目前,为解决 2010 年起拟由俄罗斯萨哈林引进每平 100 亿 m^3 天然气的储运问题,根据东北地区天然气地下储气库建设规划的设想,在大庆建设一座规模为 13 亿 m^3 的天然气地下储气库,用于调峰、事故应急和战略储备^[11]。但是由于没有废弃的油气藏可用,储气库的地址只能选在仍然运行的喇嘛甸气顶油田。可喜的是,为配合“西气东输”工程的下游工程,从 2002 年开始,在江苏金坛岩盐矿区部署规划盐岩溶腔地下储气库,截至 2004 年底已经初步完成对老腔储气库的评价工作,并准备注入气体,新的储气库腔体正在建造中,这将是我国的首批盐岩矿床地下储气库^[12]。

石油是现代经济的命脉,石油供应的安全问题已经成为世界各国在考虑经济安全和国防安全时最先关注的问题之一。自 20 世纪 70 年代震撼全球的第一次石油危机以来,世界各国都充分认识到石油资源的重要性,并且普遍建立了自己国家的石油战略储备制度。据资料^[13]显示,作为世界第一、第二大石油消费国的美国和日本,以及欧盟各个成员国,都以法律的形式规定其石油储备量为各自 60~90d 的净进口量或消费量,以应付紧急事态和突发事件,满足在非常时期国家对石油的需求。美国于 1975 年底正式建立石油战略储备制度时,计划目标最初为 7.5 亿

桶,相当于美国 90d 的净进口量。到 1998 年底,实际储备量为 5.611 亿桶,相当于该国 60d 的净进口量。这些石油全部储存在美国路易斯安那州和得克萨斯州墨西哥沿岸地区的地下溶洞中。这些溶洞总的储备空间为 6.8 亿桶。作为第三大石油消费国的我国,在进口原油日益增长的情况下,20 世纪末期石油储备能力只能满足 18d 的生产需求,与其他国家相比差距甚远。因此,从国家长远发展和国家安全的角度考虑,我国建立石油战略储备势在必行。据报道^[13],我国专家已经提出了石油战略储备的初步构想:建立国家的战略储备和企业的商业储备,到 2010 年达到 40d 需求量。在短期内建造如此巨大的储备库,在盐岩矿床中溶解建腔是一种不错的选择。

随着生产的发展、社会的进步,各种各样的有毒有害废物,包括放射性核废料的总量将日渐增加,由此引出了严峻的废物处置问题,尤其是对那些高毒、高放射性废物的处置。进行太空处置代价太高,公海处置有悖环境保护,最为理想的处置方法是进行地质处置,这也是目前好多国家普遍采用的唯一方法,但一般都是采用临时性的地质浅埋^[14]。长期稳定的一次性的地质处置,要求处置场所的岩体必须具有满足核废料与外界生物圈数千年,甚至上万年安全隔离的条件特性。研究发现^[15~19],盐岩是极为理想的岩体,它具有诸多优势,如开挖容易、流变性大、易于进行致密封隔、本质上不渗透以及数百万年长期稳定等。国家研究委员会(National Research Council)于 1957 年曾经建议高放射性废物的地质处置场所应该在地下 500~1000m 的稳定岩层结构中,并提出理想的场所为盐岩溶腔或盐岩母体^[6]。目前,德国已经将一个废弃的盐岩溶腔作为核废料处置库来使用,美国在建的废物隔离试验场(Waste Isolation Pilot Plant, WIPP),位于新墨西哥州地下 658m 的盐岩矿层中,该处置库从 20 世纪 70 年代起就开始筹建,预期到 2010 年完工,在建造的过程中同时进行各项试验研究,建成之后它将是目前世界上最深的废物地下处置库。

另外,随着经济的快速发展,二氧化碳气体的排放量增多,从而导致全球的温室效应逐步加剧。为保持经济发展与环境保护之间的平衡协调,治理工业二氧化碳势在必行。自 1997 年京都议定书签订以来,发达国家都在积极寻找二氧化碳的减排和处置措施。在开发洁净能源的同时,除深海处置之外,地质处置已经被公认为是解决二氧化碳问题的有效途径。盐岩溶腔由于其具有储存气体不会泄漏的天然地质物理条件,也被视为是进行二氧化碳地质处置的理想选择^[20~22]。

由此可见,加强盐类矿床的综合开发利用,在对盐岩矿床进行水溶开采的过程中,应用科学的开采技术、方法,制定科学的生产技术参数,在对盐类矿床进行高回采率、低成本控制开采的同时,科学合理地控制盐岩溶腔的发展,有目的、有计划地进行盐岩溶腔的建造,对我国目前或即将面临的油气储库建造和核废料地质处置问题的解决大有裨益。

1.2 水溶开采技术的发展

由于盐类矿物具有易溶于水的特性,因此对盐类矿床的开采常采用水溶开采的技术方法。水溶开采技术是根据盐类矿物具有的易溶于水的特点,把水作为溶剂注入矿床,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进行原位溶解,使固体盐矿物转变为流动状态的盐溶液——卤水,然后对其进行采集、运输的一种采矿方法,它是一种特殊的采矿方法。与地下采矿和露天采矿相比,水溶采矿在工艺上有很大差异,它集采、选、冶于一体,运用“化学工艺方法”,直接从矿石中提取液态的有益组分,因此水溶采矿也被称为化学采矿法。与“坑道开采”和“露天开采”相比,水溶开采具有“施工易、工序简、投资少、效益高”的优点^[23]。

我国水溶采矿有着悠久的历史,公元前 250 年,李冰为蜀守的时代,第一口由人工穿凿的盐井对地下天然卤水的开采,就开创了盐类矿床钻井水溶开采的历史,据说这种技术约在 12 世纪前才传到西方各国,为世界文明做出了贡献(资料来源:中国矿业网)。公元 1835 年,四川自贡开凿盐井已经深达 1001.4m,创造了世界盐矿开发史上的新记录。

但是,由于科学技术水平落后,直到进入 20 世纪以来(我国是 20 世纪 60 年代),水溶采矿才逐渐引起人们的重视,并获得了飞速发展,这从水溶采矿的诸多工艺方法上即可见一斑^[24]。王清明曾经对盐矿水溶开采技术做了详细的分类,根据开拓方法的不同^[25],水溶开采可以分为五大类:井式水溶开采、渠式水溶开采、井渠组合式水溶开采、硐室水溶开采以及钻井水溶开采,前三种方法适用于盐湖固相矿床的水溶开采,后两种方法适用于对古代盐类矿床的水溶开采,其中硐室水溶开采仅适用于矿石品味低、水不溶残渣膨胀系数较大的盐类矿床(如低品位石盐矿床、钙芒硝矿床等),对于在地下一定深度的高品位盐类矿床,则通常采用钻井水溶开采的方法。

根据不同的开采工艺技术,钻井水溶开采又可以分为如下多种:从水溶开采的井组数目上来区分有单井对流法、双井对流法;从控制向上溶解工艺上来区分有自然对流法、油垫控制对流法、气垫控制对流法;从井组连通工艺上来区分有自然溶蚀连通法、水力压裂连通法、定向对接连通法以及组合连通法等;从开采水平上来区分有单水平开采法、多水平开采法。在生产实际中,往往是多种工艺混合使用,以满足不同开采条件的需求。下面从井组数目的区分上对水溶开采的发展做一介绍。

1.2.1 单井对流水溶开采

单井对流法水溶开采起源于我国早期的单井提捞法。盐井钻成后,暴露出盐

岩矿层,向井内注入淡水溶解盐岩,之后将卤水用提桶提捞出地表,提捞法由此而得名。目前,也有一些老井采用潜卤泵代替提桶的办法,称为抽汲法,比提捞法要省时省力。提捞抽汲法的主要缺点是,裸眼较长,井壁易垮落,不能连续进行生产。随着盐井制作质量的提高,保证了淡水和卤水能够在较高的压力下循环而不会漏失,于是在原来盐井结构的基础上下入技术套管,甚至增加了中心管,将其下入到盐矿层的下部。淡水自中心管注入,直达盐矿层下部,溶解盐岩后变成卤水,经管外环隙返回地表,这种方法称为正循环;反之,淡水从环形套管注入,卤水从中心管返回,则称为反循环。一般而言,在开采初期,为了加速建槽,扩大底部的溶解面积,采用正循环法,并增加油垫,控制盐岩向上溶解;开采的中、后期,则采用反循环法(图 1-2),可以提高高浓度卤水的抽汲效率(高浓度卤水位于腔体下部)。

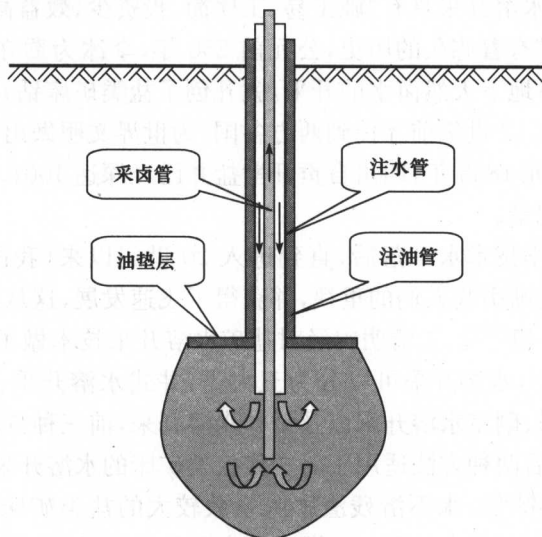


图 1-2 单井水溶开采法示意图

单井对流法采盐卤可以连续进行生产,产卤量也有所增加。但该方法存在单盐井开采盐岩数量少、回采率低、事故多的缺点。其原因主要在于内在的盐类矿物的溶解规律(特性):盐岩被溶解以后,溶腔内的盐溶液在垂向上按相对密度进行分布,浓度高、相对密度大的盐溶液分布在下部;浓度低、相对密度小的淡溶液则分布在上部。淡溶液溶解盐岩快,因此上部溶腔大;相反,浓溶液溶解盐岩慢,因此下部溶腔小。这样一来,若不加控制,溶腔发展到一定程度以后,就会成为一个上口大、下口小的倒圆锥体。由于上溶速度是侧溶速度的 2 倍之多,对厚度薄的盐岩矿床,溶腔顶板会过早暴露,极易产生顶板垮落、套管及中心管变形事故,甚至使盐井废弃。

为了提高单盐井产量,提高盐矿资源的回采率,减少井下事故,必须控制溶腔

内溶液的上溶速度,并加速侧溶,防止顶板过早暴露。于是,采用加入一种既不能溶解盐岩,又比淡水轻的物质,使盐岩溶腔内循环的淡水与溶腔顶部的加垫隔开,从而控制上溶、加速侧溶,使底部溶腔早期扩大,然后逐渐往上开采盐岩。这种物质可以选用液体的石油、气体的空气或天然气等。加石油作为垫的叫做油垫对流法,简称油垫法。加气体作为垫的叫做气垫对流法,简称气垫法。油垫建槽水溶开采方法,1947年起源于苏联,我国于1978年首次试验成功。

油(气)垫法在一定程度上达到了控制上溶、加速侧溶的目的,减少了顶板事故,提高了回采率。但是它也存在一些缺点:气垫法水溶开采对管道和设备的腐蚀严重,同时矿层开采深度受空压机能力的限制,一般该方法适用于埋深浅、致密性较好的高品位矿床的开采;油垫法水溶开采则油污染严重,盐溶液质量受损,且油量消耗大,成本高。油(气)垫控制水溶开采的方法仅适用于高品位、厚度较大的盐类矿床的开采。

1.2.2 双井对流水溶开采

单井对流法开采盐岩,当井距较小时,会发生两口盐井之间的溶蚀连通,即变为双井对流,也就是一口盐井注水,另一口盐井出卤。这种采卤方式简单,并且具有产卤量大、回采率高、事故少、好管理的优点。所以,目前较多采用该方法进行盐矿开采。

根据双井连通的不同方法,双井对流法可以分为:自然溶蚀连通、水力压裂连通、定向对接连通以及组合连通等。其中的自然溶蚀连通法,由于连通时期及连通部位不确定,同时溶采范围较小,产卤量低,回采率也低,故现在已经很少采用。

水力压裂连通,源于水力压裂技术的发展及其在地应力测量以及石油工业中的广泛应用。该技术于1955年起源于美国,于1968年在我国试验成功。其连通方式为:根据矿层的地质情况,在一定的井田范围内布设两口竖井至盐岩矿层,由其中一口井注入高压淡水,对地层进行压裂,破裂面在地层中沿一定弱面近水平方向扩展,直至目标井底部两井连通,形成溶解运移的水溶开采通道。该技术方法的优点是,连通成本较低,连通之后采卤量大,回采率较高。其不足之处在于:压裂连通需要一定的条件,即裂纹沿一定弱面(层面)扩展比较容易,若所选压裂部位没有天然弱面,还需要人为制造起裂裂缝,以确保裂缝沿预定平面扩展。

定向对接连通技术,于20世纪60年代初起源于苏联,自1991年起在我国开始使用。在矿区范围内先钻一口竖井达盐矿层,在距离竖井一定距离处再钻一口定向斜井与目标井进行对接连通,之后即可往一口井中注水,用另一口井出卤,进行生产(图1-3)。该方法的优点在于,对接连通率高,受矿层层面展布的影响较小。但其缺点是:钻井费用大、回采率低、生产成本低。另外,压裂连通是沿着一定的近水平层面展开,初始溶腔范围广,易于侧向溶解的展开,从而能控制盐岩的上

溶;定向对接连通,沿盐层中形成一条孔状通道,初始溶腔范围窄,不利于侧溶的展开。

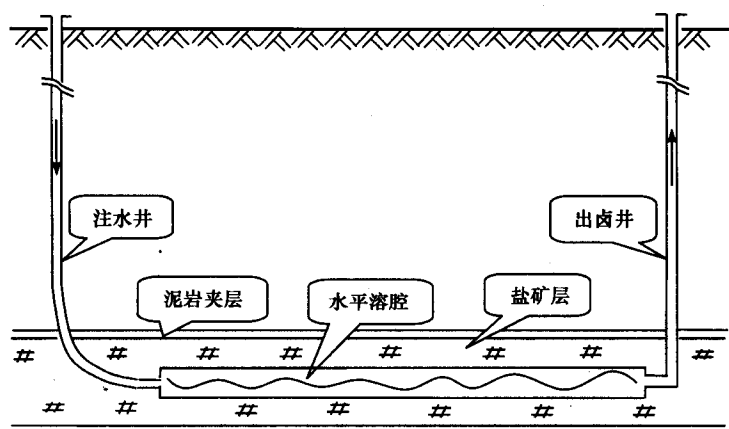


图 1-3 双井定向对接连通水溶开采法

由上述分析可见,现行的水溶开采方法均不同程度地存在着诸如溶采范围小、回采率低、开采成本高的弱点和不足。

尽管该技术具有施工易、成本低、回采率高等的优点,水力压裂水溶开采被现场广泛采用(在厚度达数十米以上的盐岩矿床中、准备油气储库建造例外),但是,由于水力压裂连通水溶开采理论的不足以及双井水力压裂连通的局限,该技术的发展受到严重的制约。为此,迫切需要在进一步完善水溶采矿理论的基础上,进行科学的盐类矿床控制水溶开采,为高效率、低成本回采盐类矿物,以及提高盐岩采后溶腔的应用,提供前提和保证。

1.3 盐类矿床水力压裂

1.3.1 岩体水力压裂理论与技术^[26,27]

水力压裂,又称水压致裂或水力劈裂,其实质都是在地面通过钻孔向地下被压目的岩层注入一定量的高压流体,在钻孔底部的一定范围内诱发人工裂缝,将目的岩层沿垂直于最小主应力的方向压裂。该技术最初应用于对地应力的测量,通过观测记录分析水力压裂时间曲线,获得目标层位原岩地应力的大小和方向。20 世纪 40 年代将该技术引入石油天然气工业,将其用于低渗透性难采储集层的激化,以提高石油天然气的采收率和产量。之后,该技术又被用于对于干热岩体的地热开发。盐类矿床水力压裂连通水溶开采^[23],1955 年起源于美国,1968 年首次在我国应城盐矿进行了浅井(34m)近距离(15~30m)试验并获得成功,1970 年全国井矿