

“十三五”国家重点图书出版规划项目

能源地下结构与工程丛书

层状盐岩溶腔储库原位溶浸建造 理论与技术

梁卫国 等 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

“十三五”国家重点图书出版规划项目
能源地下结构与工程丛书

层状盐岩溶腔储库原位溶浸 建造理论与技术

Theory and Technology of in Situ Solution Construction of
Underground Salt Cavity in Bedded Salt Deposit

梁卫国 等 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以层状盐岩水平型溶腔油气储库建造技术与稳定运营作为研究目标,通过试验研究、理论分析及数值模拟等方法,对层状盐岩与夹层的力学特性、溶解特性、盐岩强度理论以及储库在建造和运营期间的稳定性进行系统研究。与已出版的相关书籍相比,本书突破了以往的研究内容,不局限于层状盐岩在单物理场的破坏,而更多关注了层状盐岩及夹层在多场耦合作用下的溶解特性与破坏机理,并且发展了层状盐岩破坏强度理论,建立了适用范围更广的破坏准则,同时系统地阐述了层状盐岩溶腔破坏的影响因素,为保证层状盐岩溶腔稳定性给出了更可靠的理论依据。

本书适用于盐类矿床开采与地下盐岩溶腔油气储库建造工程领域的研究生及工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状盐岩溶腔储库原位溶浸建造理论与技术 / 梁卫国等著. —上海: 同济大学出版社, 2019. 12
(能源地下结构与工程丛书)
ISBN 978-7-5608-8781-4

I. ①层… II. ①梁… III. ①层状油气藏—岩盐开采—地下储气库—研究 IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 225567 号

层状盐岩溶腔储库原位溶浸建造理论与技术

梁卫国 等 著

责任编辑 胡晗欣 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排 版 南京文脉图文设计制作有限公司

印 刷 大丰科星印刷有限责任公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 11.5

字 数 287 000

版 次 2019 年 12 月第 1 版 2019 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8781-4

定 价 68.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

盐类矿床是在适宜的地质与气候条件下,含氯化物、硫酸盐、碳酸盐等不同来源的盐类物质的水盐体系通过蒸发、浓缩、结晶、沉积甚至变形等长期的自然地质作用,形成的天然卤水或固体化学沉积矿床。由于含有人类日常生活的必需品(氯化钠),盐类矿床的开采利用历史悠久;而其他盐类矿物(硫酸钠、氯化钾、碳酸钠等)又是重要的化工原料,因此早被广泛开发与利用。由于地下盐类矿床特殊地质条件及其孔隙率低、蠕变性强、能够损伤自愈合等优良的物理力学特性,自 20 世纪七八十年代以来,盐类矿床开采后形成的巨型溶腔还是石油、天然气地下储存与废物处置的理想场所,并在国际上也有广泛应用。

我国自 2000 年以来,随“西气东输”工程在长江三角洲建立地下储气库的需要,开始在江苏金坛为代表的地下层状盐岩溶腔中建造储气库;与此同时,针对我国盐岩矿床地质特征及其储库建造方式,如何快速溶解建造大型地下溶腔储库等技术问题也开始被重视并研究。太原理工大学原位改性采矿理论与技术创新团队,于 2000 年始先后在多个国家青年基金、面上基金、国家杰出青年基金,中国石油天然气股份有限公司西气东输管道公司,以及中国石化集团江苏石油勘探局等项目资助下,针对我国盐岩矿床含夹层、呈层状的特殊地质条件特性,完成了一系列关于盐类矿床溶解特性、力学特性、蠕变特性、大型溶腔溶解流场特征、夹层溶解与力学特性、大型溶腔储库稳定性等内容研究;并于 2005 年发明了“盐岩矿床水平嗣室型油气储库及其建造方法”并获专利(CN100392209C),2015 年又发明了“一种水平盐岩溶腔储库的建造方法”并获专利(CN104675433B)。20 年来,课题组围绕层状盐岩矿床地下大型溶腔储库建造理论与技术持续不断进行研究,取得了一定的阶段性研究成果。

本书围绕层状盐岩矿床中,建造地下大型盐岩溶腔储库的基础理论与技术,除绪论外,分 6 章内容进行介绍说明。第 2 章为层状盐岩溶解特性,主要通过试验研究层状盐岩中常见易溶与难溶两类盐岩,在不同浓度、温度以及溶液运动状态下的静、动溶解特性;第 3 章为层状盐岩力学特性,通过试验研究盐岩与常见石膏、钙芒硝夹层在不同条件下的强度、变形及长期蠕变特性;第 4 章为溶浸作用下层状盐岩细观结构演化,借助实验室特有的显微 CT 试验设备,对石膏与钙芒硝夹层在不同溶浸条件下,内部细观结构演化特征进行分析,借此分析层状盐岩储库在溶解建造中的损伤与弱化失稳机理;第 5 章为三剪能量屈服准则与层状盐岩界面稳定性,以夹层界面为主要研究对象,进行不同边界与运行条件

下界面的稳定性特征分析;第6章为层状盐岩大型溶腔建造工艺与技术,以发明专利技术为主,介绍大型水平储库建造工艺技术,并进行了水平溶腔储库建造过程中 THMC 多场耦合数值模拟;第7章为层状盐岩大型溶腔应用及其稳定性分析,重点介绍作为储气库运行过程中,不同工况条件下储气库整体稳定性与失稳临界条件。

本书是课题组多年来一起努力攻关的成果结晶,凝聚了徐素国、高红波、于艳梅、杨晓琴、郝铁生、张传达、于伟东、孟涛、曹孟涛、李宁、杨玉良等多名博士、硕士研究生的辛勤工作与汗水,也饱含着学科方向创始人赵阳升教授的原位改性采矿理论与技术的思想精髓。希望本书的出版对我国层状盐岩矿床高效安全溶浸开采与地下大型溶腔油气储库建造提供一定的理论与技术指导。

在著作撰写过程中,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诚挚的谢意!

本书是在国家自然科学基金(50304011, 50874078, 51225404)以及三晋学者支持计划的资助下完成的,在此对上述资助单位表示真诚的感谢!

最后,感谢在著作完成过程中给予了支持和帮助的所有朋友和家人!

由于作者水平有限,疏漏及不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

梁同

2019年12月于太原理工大学清泽园

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 盐类矿床水溶开采及溶腔应用	1
1.1.1 盐类矿床	1
1.1.2 盐类矿床水溶开采	2
1.1.3 盐岩溶腔应用	3
1.2 层状盐岩矿床特征及其成因	4
1.3 盐岩溶腔原位溶浸建造理论与技术	6
第 2 章 层状盐岩溶解特性	9
2.1 引言	9
2.2 盐岩溶解机理	9
2.3 易溶盐岩溶解特性	11
2.3.1 NaCl 盐岩溶解特性	11
2.3.2 无水芒硝(Na_2SO_4)盐岩动态溶解特性	25
2.4 难溶盐岩溶解特性	29
2.5 本章小结	32
第 3 章 层状盐岩物理力学特性	33
3.1 引言	33
3.2 层状盐岩常规力学特性	34
3.2.1 纯盐岩、夹层以及层状盐岩单轴压缩力学特性	34
3.2.2 夹层赋存特征对层状盐岩单轴压缩力学特性影响因素分析	36
3.2.3 纯盐岩、夹层以及层状盐岩三轴压缩力学特性对比分析	44
3.2.4 钙芒硝盐岩剪切力学特性	46
3.2.5 循环载荷作用下盐岩力学特性	47

3.3	盐岩及夹层在特殊条件下的力学特性	50
3.3.1	损伤盐岩高温再结晶剪切特性	50
3.3.2	盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性	53
3.3.3	高温盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性	55
3.4	盐岩蠕变特性	57
3.4.1	盐岩蠕变特性概述	57
3.4.2	溶浸-应力耦合作用下钙芒硝盐岩蠕变特性	58
3.5	本章小结	68
第4章	溶浸作用下层状盐岩细观结构演化	69
4.1	引言	69
4.2	细观结构演化影响因素	70
4.3	盐溶液作用下石膏岩的细观结构	71
4.3.1	试验设备	71
4.3.2	天然状态下石膏岩细观结构	72
4.3.3	盐溶液作用下石膏岩细观结构	72
4.3.4	不同浓度盐溶液中石膏晶体几何特征分析	73
4.3.5	盐溶液中石膏溶蚀机理分析	74
4.4	不同温度溶浸液作用下钙芒硝裂纹细观演化规律	76
4.4.1	常温溶浸液作用下钙芒硝裂纹细观演化规律	76
4.4.2	35℃溶浸液作用下钙芒硝裂纹细观演化规律	76
4.4.3	65℃溶浸液作用下钙芒硝裂纹细观演化规律	77
4.4.4	95℃溶浸液作用下钙芒硝裂纹细观演化规律	77
4.5	不同温度溶浸液作用下钙芒硝细观孔隙演化规律	78
4.6	不同浓度盐溶液作用下钙芒硝细观结构演化规律	79
4.6.1	淡水溶液中钙芒硝细观结构演化过程	79
4.6.2	半饱和盐溶液中钙芒硝细观结构演化过程	80
4.6.3	饱和盐溶液中钙芒硝细观结构演化过程	81
4.7	溶浸弱化后钙芒硝在不同载荷下的细观结构演化	81
4.7.1	钙芒硝的裂纹演化规律	83
4.7.2	钙芒硝的裂纹数量	85
4.7.3	钙芒硝的孔隙结构	87
4.7.4	钙芒硝的细观结构演化机理	90

4.8	本章小结	91
第5章	三剪能量屈服准则与层状盐岩界面稳定性	92
5.1	引言	92
5.2	常用盐岩强度准则	93
5.3	非线性三剪能量屈服准则	96
5.3.1	线性三剪能量屈服准则概述	96
5.3.2	非线性的三剪能量屈服准则	99
5.3.3	非线性三剪能量屈服准则与盐岩真三轴试验结果对比验证	101
5.3.4	非线性三剪能量屈服准则与盐岩其他常用准则对比	103
5.4	水平型盐岩溶腔薄夹层界面稳定性	104
5.4.1	水平型溶腔围岩应力分布特征	104
5.4.2	水平溶腔顶部薄夹层滑移失稳条件	106
5.4.3	水平溶腔顶部薄夹层滑移失稳影响因素分析	109
5.4.4	水平溶腔内薄夹层界面滑移失稳影响因素分析	111
5.5	水平型盐岩溶腔顶部厚夹层界面稳定性	115
5.5.1	水平溶腔顶部厚夹层界面失稳条件	115
5.5.2	水平溶腔顶部厚夹层界面破坏数值计算	116
5.5.3	水平溶腔顶部厚夹层界面破坏影响因素分析	120
5.6	本章小结	125
第6章	层状盐岩大型溶腔建造工艺与技术	126
6.1	引言	126
6.2	大型溶腔建造技术方法	128
6.3	层状盐岩大型溶腔建造方法	129
6.3.1	单井对流法	130
6.3.2	井组连通法	131
6.3.3	定向对接井连通溶解建腔	131
6.3.4	单井水平后退式溶浸开采方法	132
6.4	THC耦合作用下盐岩水平溶腔流体运移数值模拟研究	133
6.4.1	数值模型的建立	133
6.4.2	数值模拟结果及分析	134
6.5	盐岩水平溶腔边界扩展规律研究	142

6.5.1	数值模型及条件的确定	142
6.5.2	数值模拟结果分析	142
6.6	本章小结	145
第7章	层状盐岩大型溶腔应用及其稳定性分析	147
7.1	引言	147
7.2	夹层对水平单腔盐岩储库稳定性的影响分析	148
7.2.1	水平盐岩溶腔初步建腔方案及计算结果分析	149
7.2.2	水平盐岩溶腔稳定性影响因素研究	152
7.2.3	极限运营气压的确定及长期流变分析	156
7.3	含夹层水平溶腔储库矿柱稳定性分析	159
7.3.1	计算模型	159
7.3.2	同步气压计算方案结果分析	160
7.3.3	不同步气压计算方案结果分析	162
7.3.4	矿柱稳定性的长期流变分析	164
7.4	本章小结	166
参考文献	167

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Dissolution mining and application of salt rock caverns	1
1.2 Characteristics and petrogenesis of bedded salt rock	4
1.3 Theory and technology of in-situ leaching construction of salt rock caverns	6
Chapter 2 Dissolution characteristics of bedded salt rock	9
2.1 Introduction	9
2.2 Dissolution mechanism of rock salt	9
2.3 Dissolution characteristics of soluble salt rock	11
2.4 Dissolution characteristics of insoluble salt rock	29
2.5 Summary	32
Chapter 3 Physical and mechanical properties of bedded salt rock	33
3.1 Introduction	33
3.2 Conventional mechanical properties of bedded salt rock	34
3.3 Mechanical properties of salt rock and interlayer under special conditions	50
3.4 Creep properties of salt rock	57
3.5 Summary	68
Chapter 4 Microstructure evolution of bedded salt rock under leaching	69
4.1 Introduction	69
4.2 Influencing factors of microstructure evolution	70
4.3 Microstructure of gypsum under the effect of salt solution	71
4.4 Microstructure evolution of glauberite under different temperature solution	76
4.5 Microstructure pore evolution of glauberite under different temperature solution	78

4.6	Microstructure evolution of glauberite under different concentrations of salt solution	79
4.7	Microstructure evolution of glauberite under different loads after solution weakening	81
4.8	Summary	91
Chapter 5 Tri-shear energy yield criterion and stability of bedded salt rock interfaces		
		92
5.1	Introduction	92
5.2	Commonly used salt rock strength criteria	93
5.3	Nonlinear tri-shear energy yield criterion	96
5.4	Stability of thin interlayers in horizontal salt rock cavern	104
5.5	Stability of thin interlayers above horizontal salt rock cavern	115
5.6	Summary	125
Chapter 6 Construction process and technology of large-scale cavern in bedded salt rock		
		126
6.1	Introduction	126
6.2	Construction technology of large cavern	128
6.3	Construction method of large cavern in bedded salt rock	129
6.4	Numerical simulation of fluid migration in horizontal salt rock cavern under THC coupling	133
6.5	The boundary expansion law of horizontal salt rock cavern	142
6.6	Summary	145
Chapter 7 Application and stability analysis of large-scale cavern in bedded salt rock		
		147
7.1	Introduction	147
7.2	Analysis of interlayer effect on the stability of a single horizontal salt rock cavern	148
7.3	Stability analysis of pillars in horizontal salt rock cavern with interlayers	159
7.4	Summary	166
Reference		167

第1章 绪论

1.1 盐类矿床水溶开采及溶腔应用

1.1.1 盐类矿床

盐类矿床是在适宜的地质与气候条件下,含氯化物、硫酸盐、碳酸盐等不同来源的盐类物质的水盐体系通过蒸发、浓缩、结晶、沉积甚至变形等长期的自然地质作用,形成的天然卤水或固体化学沉积矿床。地表盐湖、地下含高浓度卤水岩层及地下固体盐岩矿都属盐类矿床。表 1-1 为常见盐类矿物与化学成分。

表 1-1 常见盐类矿物与化学成分

类别	矿物与成分
碳酸盐	石灰岩(CaCO_3),白云岩 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$,纯碱(Na_2CO_3),小苏打(NaHCO_3),等等
硫酸盐	石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),硬石膏(CaSO_4),芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$),无水芒硝(Na_2SO_4),钙芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$),泻利盐($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$),杂卤石 $[\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$,等等
卤化物	盐岩(NaCl),钾盐(KCl),光卤石($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),等等
硝酸盐	硝酸钠(NaNO_3),硝酸钾(KNO_3),硝酸钙 $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$,等等
硼酸盐	硼砂 $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$,等等

我国盐湖资源十分丰富,具有代表性的青藏高原柴达木盆地察尔汗盐湖,盐类沉积始于晚更新世晚期,距今约 25 000 多年,盐滩成盐结束时期距今也有 6 000 多年。关于盐湖资源的开发与利用,以中国地质科学院郑绵平院士为代表的科学家们进行了深入系统的研究,并建立了包括盐湖地质学、盐湖化学、盐湖工程学、盐湖生物学及盐湖环境学在内的盐湖学研究体系,成为矿床地质学与湖泊学之外的新分支学科。

地下高浓度卤水以四川自流井最为闻名,其高浓度卤水自中生代地层出。早在 20 世纪初,当时的国立北洋工学院(现天津大学)采冶系谭锡畴先生即对其成因进行过研究,概其成因有二:①盐质或盐水在气候干燥区域,与含之之地层同时沉积于浅水之中,该区域白垩纪与三叠纪地层均为含有此种盐质或盐水之沉积物;②地面之水流向地下,溶解地层盐质或与所含盐水混合,而成地下盐水,并于白垩纪及深部三叠纪灰岩中聚集赋存。

本书重点关注在地下固体盐类矿床中进行溶解建腔的相关问题,因此对流态的地表盐湖与地下高浓度卤水资源不进行详述。对固体盐类矿床按物质来源划分,可分为海相沉积盐类矿床与陆相沉积盐类矿床。由于海水成分相对单一,而大陆水携带的盐类物质成分与来源比较复杂,因此在漫长的地质年代中,陆相沉积盐类矿床种类与成分均较海相沉积盐类矿床的成分复杂且多变。无论何种成因,由于食盐(NaCl)是人类日常生活的必需品,对盐类矿床的开采利用历史悠久;而其他盐类矿物(硫酸钠、氯化钾、碳酸钠等)又是重要的化工原料,因此早已被广泛开发与利用。近年来,由于地下盐类矿床的特殊地质条件及其孔隙率低、蠕变性强、能够损伤后自愈合等优良的物理力学特性,其开采后形成的巨型溶腔成为了石油、天然气地下储存与废物处置的理想场所,并在国际上已有广泛应用。因此,对盐类矿床控制开采理论与技术、采后溶腔形状检测以及不同功用腔体稳定性分析等问题的研究,越来越受到科学家与工程技术人员的关注。

1.1.2 盐类矿床水溶开采

关于盐类矿床水溶开采技术,原国家轻工业局盐业勘察队王清明发表过多篇文章进行介绍分析,但内容主要是关于水溶开采技术方法的介绍,而关于水溶开采的机理分析则主要基于静态环境下浓度梯度驱动的 Fick 扩散原理。水溶开采的实质是清水通过注入管进入溶腔,非饱和盐溶液在溶腔内边运动边溶解,流体在运移(对流)的同时发生溶质扩散,并且存在着卤水溶液与溶腔固体热量的交换及不同盐类物质溶解吸放热的传递,与此同时溶腔大小与边界也在不断演化。因此,水溶开采的机理是溶液运移(对流)、矿物溶解、固液传热、溶质扩散、腔体变形等多因素作用的固-流-热-传质(THMC)多场耦合作用,而对该复杂作用的机理研究需要进行大量深入细致的试验工作。根据试验研究对水溶采矿机理的深入揭示与认识,发明了一系列新的水溶开采技术,将在本书中进行详细介绍。

众所周知,由于盐类矿床具有易溶于水的特性,其开采方法主要为水溶开采,包括地面钻井地下水溶开采、坑道开挖地下溶浸与地面堆浸相结合的开采方法。对易溶盐矿床,如氯化钠或硫酸钠矿床,一般采用地面钻井地下水溶开采方法;而对钙芒硝难溶盐矿床,在埋深较浅条件下,多采用坑道开挖、地下爆破、洞室溶浸与地面堆浸相结合的溶浸开采方法。

地面钻井地下水溶开采方法,早在 1 000 多年前我国四川就有应用。利用盐类矿物易溶于水的原理,通过地面钻井至地下盐岩矿床,注入淡水溶解盐岩,用压力驱动法采出盐水(俗称卤水),再在地面通过蒸发结晶回收盐类物质。

早期的水溶开采方法主要采用单井对流法,即单一一口井中布设同心管串,内管注水、同心管串环隙出卤(此为正循环),或同心管串环隙注水、内管出卤(此为反循环)。根据流体动力学与传质理论,正、反循环法在溶腔内所形成的流场与溶液浓度分布有很大差别。正循环一般应用于溶解建腔初期,有利于底部盐岩的快速溶解;而反循环一般应用于溶解中后期,有利于底部高浓度盐溶液的高效采出。但是,由于重力作用,在溶腔内盐溶

液浓度分布呈“顶部低、底部高”的特征,而盐岩的溶解速率或溶解速度与溶液浓度呈反比关系,即浓度越低溶解越快。为控制溶腔内盐岩顶部向上的溶解速度,扩展溶腔水平侧向空间,通常在溶腔内注入比卤水质量轻的分隔剂——轻质油品或气体,称为单井油垫法或气垫法。

20世纪90年代,随着石油工程定向钻井技术的成熟,该技术逐渐应用于盐类矿床开采领域,即定向对接连通双井对流法。在矿床井田内,先钻一口垂直井(目标井)至盐类矿床,然后在数十米至数百米之外,再钻一口造斜+水平井进入矿层,并在其中水平穿行至目标井底,实现双井连通、对流水溶开采。与单井对流法相比,定向对接连通双井对流法初期造腔时间更短,由于盐岩矿床内水平段盐岩溶解面积更大,生产能力大为提升,该技术被广泛应用并逐渐取代传统单井对流法。但在薄层盐类矿床开采中,由于盐层厚度严重影响盐岩溶腔的向上扩展,单井与双井对流法都受到了严重制约。

2000年,由太原理工大学赵阳升教授带领的团队发明了群井致裂控制水溶开采方法,在薄层及难溶盐类矿床溶浸开采中应用,克服了传统单井对流法与双井对接连通对流水溶法的制约。该方法利用了层状盐岩矿床存在层理界面的地质特征,并利用水力压裂裂缝易于沿抗拉强度最低的层理界面扩展的原理,在层状盐岩矿床中进行群井水力压裂连通、科学调控群井注水与采卤,从而实现该类盐矿床的高效回采与地层均匀沉陷控制。

无论采用何种溶浸开采方法,盐类矿物自身的溶解特性与不同形状腔体中盐溶液迁移及流场分布,均是决定矿物溶浸开采效率以及溶腔形状发展演化的关键因素。因此,对层状盐岩中不同盐类矿物(包括夹层内的)在不同溶浸环境条件下的溶解特性、物理力学特性、腔体形状结构演化与其中流场、浓度场分布等进行研究,对深入认识盐类矿物的物理力学特性与盐岩溶腔的控制溶解建造,均具有十分重要的意义与价值。

1.1.3 盐岩溶腔应用

由于盐岩自身致密的物理结构,以及在一定温度、压力下具有极强的流变性特征,溶浸开采后形成的盐岩溶腔通常用来做油气储库或废物处置场所。根据不同用途,对溶腔的基础地质与几何特征均有不同要求。如储气库必须满足一定的储量要求,并且在最大与最小压力之间波动运行时,能够保持储气库的长期稳定与最小容积。要满足这些基本要求,储气库必须在地下一定深度处,一般至少在地下500m以下;同时,储库空间容积必须在一定量以上,如20万 m^3 ;储库建造必须避开地质活动带与地层软弱界面,以防止自然与人为活动造成储库失稳与气体泄漏等。以美国墨西哥湾盐丘中建造的储库为例,垂直纺锤形油气储库高度可达数百米乃至上千米,直径为数十米至百米。而在我国,由于盐类矿床地质成因及后期构造运动影响的不同,常见矿床为层理状特征,盐岩单层厚度较薄、盐层间不同岩性的夹层多,无论盐矿采用水溶开采,还是油气储库建造,均存在巨大的挑战性。因此,非常有必要对层状盐岩矿床的结构特征、溶解特性、溶浸演化细观机理、储库建造方式、层理面特征及其稳定性等内容进行深入细致的研究。

1.2 层状盐岩矿床特征及其成因

盐岩矿床的形成必须具备以下几个条件：

- (1) 盐类物质来源,有海相与陆相之分;
- (2) 封闭的地形条件,如海湾、泻湖、盆地;
- (3) 干旱气候条件,使盆地内盐水的蒸发量大于补给量,据载泥盆纪、二叠纪和第三纪是世界上最主要的干旱成盐时代;
- (4) 地质构造运动,形成隆起和凹陷,沉积的盐类物质被覆盖保存并在挤压力作用下产生变形,如巨厚盐丘的形成。

显然,盐岩矿床多形成于造山作用之后的山前或山间凹地、陆台的内陆凹陷盆地,多产于陆相红色碎屑岩系和海相蒸发碳酸盐相地层中,盐层与石灰岩、白云岩,或盐层与黏土层,构成一套含盐岩系。由于盐岩极强的塑性及高应力作用下的流动性特征,在后期构造应力挤压作用下可产生复杂变形,甚至形成巨厚盐丘构造,如美国墨西哥湾上千米的巨厚盐丘。盐类矿物的沉积顺序为按照溶解度大小依次沉淀,具有明显的沉积韵律和旋回性,从下到上为:碳酸盐岩—石膏或硬石膏—石盐—钾盐—石盐和石膏。

大量地质资料表明,我国盐岩矿床的典型特征为呈层状或似层状,盐岩单层厚度不大,盐岩层间有其他盐类矿物或泥岩夹层。我国江苏金坛、安徽定远、湖南衡阳等地的盐岩矿床均为此特征。

江苏金坛盐岩矿床,赋存于下第三系始新统阜宁组四段矿层,整个含盐层系自下而上由两个横向分布稳定的棕红色及灰~灰黑色夹棕红色泥岩标志层分隔为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ三个矿层。下部Ⅰ号盐岩矿层顶面埋深 910.65~1 216.86 m,厚度稳定,平均厚度 41.75 m;中部Ⅱ号盐岩矿层顶面埋深 838.37~1 143.34 m,平均厚度 64.75 m;上部Ⅲ号盐岩矿层顶面埋深 809.38~1 045.57 m,厚度变化较大,为 6.51~145.17 m,平均厚度 52.67 m。Ⅰ,Ⅱ矿层之间的 ZY1 夹层,岩性为棕红色泥岩,厚度为 0.6~4.91 m,平均厚度 2.88 m;Ⅱ,Ⅲ矿层之间的 ZY2 夹层,岩性一般为灰~灰黑色夹棕红色泥岩,厚度为 0.28~4.8 m,平均厚度 2.47 m。除分隔三个盐岩矿层的两个主要泥岩标志层外,在各个盐岩层内也分布着一些夹层,岩性一般为含盐泥岩。例如,Ⅱ矿层中小的夹层就有 8 层左右,厚度不等,夹层平均厚度 1.1 m。阜宁组四段沉积早期为还原环境和静、动水交替环境下的浅湖相沉积;晚期湖盆闭塞、湖水变浅,成为蒸发岩相。

安徽定远盐岩矿床,赋存于下第三系始新统定远组四段矿层,盐岩层上、下均为灰色、灰黑色泥岩。矿体近东西向展布,分为东、西两个凹陷。西凹陷矿层埋深较浅,盐岩层顶面埋深最浅 268.99 m,盐岩层厚度 36.48~129.99 m,一般为 40~60 m;东凹陷盐岩层顶面埋深 322.27~413.38 m,盐岩层厚度较大,一般为 101.64~185.32 m。盐岩层泥岩夹

层一般为4~12层,最多26层。西凹陷夹层一般为2~16层,最大厚度6.66 m,最小厚度0.06 m,一般厚度0.5 m,夹层总厚度2.2~20.1 m;东凹陷夹层一般为2~26层,最大厚度7.64 m,最小厚度0.05 m,一般厚度0.5 m,夹层总厚度8.14~36.92 m。

湖南衡阳盆地层状硫酸盐氯化物型盐岩矿床,赋存于下第三系霞流市组茶山坳段中,矿床的分布形态受含盐盆地的制约,由盆地边缘向中心依次为硬石膏(石膏)—钙芒硝—石盐,形成不同盐类矿物富集区。硬石膏(石膏)区位于含盐盆地边缘,含盐岩系厚度100~200 m,无钙芒硝、石盐沉积。钙芒硝区位于硬石膏区与石盐区之间的过渡带,含盐岩系厚度为200~400 m,钙芒硝矿一般为1~3层,累计平均厚度52.72 m;伴有硬石膏(石膏)沉积,硬石膏矿一般为0~3层,厚0~25.90 m。石盐区位于盆地中部,含盐岩系厚度为400~800 m,以石盐沉积为主,钙芒硝为次;钙芒硝一般为1~4层,累计厚度6.57~94.29 m,石盐矿体呈层状、似层状产出,矿体内夹石层一般为4~18层,单层厚度0.58~7.18 m,累计厚度94.3~335.0 m,含矿率>80%。含盐岩系自下而上盐类矿物的垂直分带十分明显,在盆地中心的石盐富集区为硬石膏—钙芒硝—石盐—钙芒硝—硬石膏,完整的蒸发沉积韵律揭示了湖水由逐渐浓缩到浓缩,再逐渐淡化的发展过程。

一般认为,盐类矿床是在近海盆地或内陆盐湖的沉积环境中,在干热气候条件下,盆地或盐湖中的盐水蒸发、浓度不断升高并结晶,其中的盐类物质按照不同的饱和浓度先后沉积,之后又经历一定的构造运动、溶解或化学作用而成藏。海水蒸发试验表明,海水中矿物结晶沉积的先后顺序为 $\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4 \rightarrow \text{NaCl} \rightarrow \text{MgCl}_2$, $\text{MgSO}_4 \rightarrow \text{KCl}$, K_2SO_4 。关于盐类矿物沉积理论主要有盆地隔断沉积、环状沉积、片断沉积及循环沉积等,其中,“循环沉积”(cyclic sedimentation)理论对在同一区域内某一类盐岩矿床会在不同时期分别沉积,从而出现地层中交替反复沉积现象进行了很好的解释。如加拿大阿尔伯塔省Elk Point组盐岩矿床中,从下到上共有4层厚度较大的盐岩矿床,依次为下Lotsberg salt、上Lotsberg salt、Cold Lake salt及Prairie Evaporite salt。其中,上Lotsberg salt和Prairie Evaporite salt厚度分别达120~150 m与150~210 m。盐岩层间的泥岩夹层厚度10~60 m不等。这一巨大的盐岩矿床是在泥盆纪中期的不同年代先后沉积而成的,阿尔伯塔盐岩矿床位于落基山脉(the Rocky Mountains)以东,与太平洋仅一山之隔。因此,其形成与海水、早期矮山隔断、后期地质运动等密切相关。而我国的层状盐岩多形成于第三系湖盆沉积,基本未经历大型地质构造运动,因此,其层理特征及其物理力学特性与当时的沉积环境和历史地质运动密切相关。

由上述三个地区典型的层状盐岩地质特征可知,同一时期成藏的层状盐岩,如常见的氯化钠盐岩与石膏盐岩互层,或盐岩与泥岩的互层,主要是由不同盐类物质因不同溶解度而先后沉积所致。如江苏金坛盐岩矿床赋存于下第三系始新统阜宁组,安徽定远盐岩矿床赋存于下第三系始新统定远组,湖南衡阳盐岩矿床赋存于下第三系霞流市组,等等,这些盐岩矿床成藏历史时间短,且多为湖相沉积。以衡阳盆地盐岩矿床为例,其为燕山早期宁镇运动之后,在新华夏系拗陷带基础上发展而成的山间盆地;经检测,盐岩矿床中微量

元素 K^+ , Br^- , I^- , B, Sr, Li 含量甚微,与海相沉积盐岩矿床的微量元素变化特征有明显差异,表明其成因为内陆湖相蒸发沉积。

通过上述地质特征分析,可以清楚地看到,由于我国成矿地质条件为湖相沉积,因而盐岩矿床普遍呈近水平层状分布,总厚度较大,但单层厚度相对较薄,不同盐分或泥岩等夹层相对较多。该特征显然不同于美国墨西哥湾经过剧烈地质构造运动作用之后而形成的巨厚盐丘。

对于此类盐岩矿床,无论对其实施水溶开采,还是进行地下大型储库建造,都必须考虑其夹层难溶特性、层理结构特征以及储库的致密稳定性。太原理工大学自 2000 年以来,一直在该方面进行相关理论与技术研究,先后获得多项国家自然科学基金资助,发明多项专利技术,并在现场实施应用且取得了良好效果。

1.3 盐岩溶腔原位溶浸建造理论与技术

“盐岩溶腔”一词已经说明是在盐岩之中,用溶浸方法进行特殊建造而成的腔体。溶浸法是利用盐类矿物易溶于水或与某些化学溶液反应而发生物理或化学改性的特殊采矿方法,由于其生产成本低、技术简单,在盐岩矿床与金属矿床开采中常被采用。

溶浸采矿是根据某些矿物的物理化学特性,将工作剂注入矿层(堆),通过化学浸出、质量传递、热力和水动力等作用,将地下矿床或地表矿石中某些有用的矿物,从固态转化为液态或气态,然后回收,以达到低成本开采矿床的目的。在金属矿开采过程中,溶浸采矿方法包括地表堆浸法、原地浸出法和细菌化学采矿法等。

溶浸采矿彻底改革了传统的采矿工艺,特别是地下原位溶浸采矿,彻底改变了传统地下坑道开采的工艺流程。不仅集采矿、选矿、冶炼于一体,工艺流程简单化;而且残留废弃物留在地下原位,极大地减少了地表占地与环境污染,是一种极其先进的采矿方法。随着地表及浅部资源的逐渐枯竭,由于受高地应力与地温的影响制约,人类急需探索深部资源的新的开采技术方法,原位溶浸采矿给予我们很大的启示。

原位溶浸采矿的理论基础包含两部分内容:其一,为矿物在水溶液或化学溶液中的溶解反应特性;其二,为以 Fick 扩散定理为基础的动力学原理,该理论基础回答了矿物静态溶浸的基本原理。但在地下大型溶腔溶浸建造过程中,腔体中流体的运移改变着溶液中溶质的传输与分布,进而影响腔体表面固体矿物的溶解;而固体矿物溶解本身又是一个能量交换的过程,加之环境地温的影响,建造过程中存在热量的交换与传递;而腔体中溶液温度的分布进一步影响着其表面矿物的溶解,矿物的溶解反过来再次影响溶质的扩散与对流,如此循环相互作用。显然,这是一个涉及流体运移、矿物溶解、溶质扩散对流、热量交换、固体变形的复杂固-流-热-传质(THMC)多场耦合作用过程,其作用理论也必然是在静态溶浸基本原理基础上的进一步拓展。