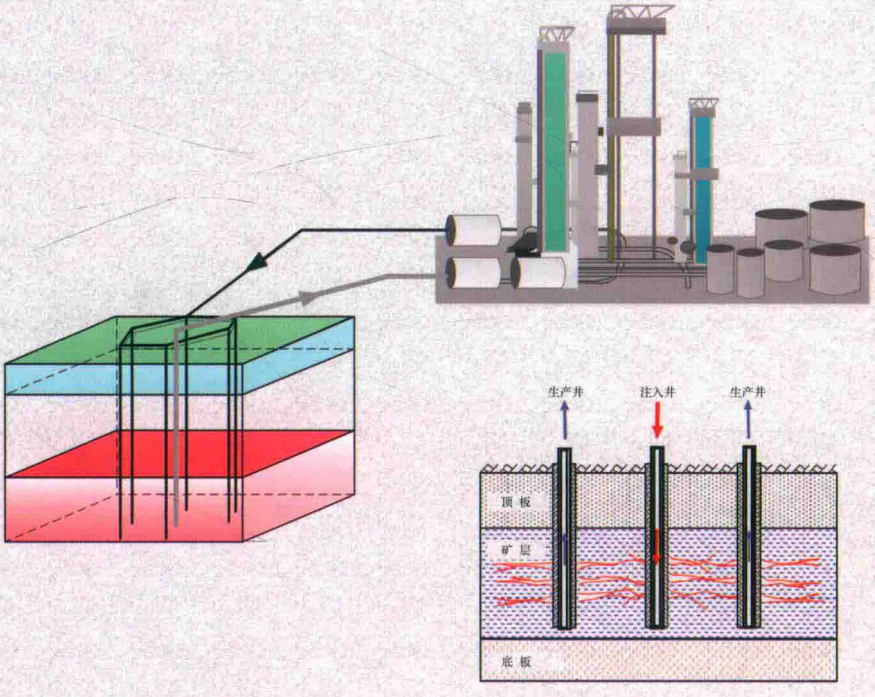
原位改性流体化采矿导论

◎ 赵阳升 梁卫国 冯子军 著



科学出版社

原位改性流体化采矿导论

赵阳升　梁卫国　冯子军　著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共 11 章，系统论述与介绍原位改性流体化采矿这一新兴学科领域的理论、实验、技术与工程的各个方面。本书前 4 章介绍原位改性流体化采矿的概念与架构、演变多孔介质传输物性规律与理论模型、原位改性技术原理等核心内容。后 7 章详细介绍煤层气、盐矿、油页岩、放射性及有色金属矿产、天然气水合物、低变质煤、干热岩地热等广泛的地质资源与能源原位物理、化学改性的机理，相关工艺与工程实例。书中内容囊括作者及其学术团队 30 多年的大量研究成果，也涵盖国内外相关研究的最新进展。

本书可作为地质资源与能源、土木、环境、力学、物理学、化学等工程与科学领域的工程技术人员、研究者、本科生、硕士与博士研究生的重要参考书。

图书在版编目（CIP）数据

原位改性流体化采矿导论/赵阳升，梁卫国，冯子军著. —北京：科学出版社，2019.3

ISBN 978-7-03-060731-7

Ⅰ. ①原… Ⅱ. ①赵… ②梁… ③冯… Ⅲ. ①矿山开采 Ⅳ. ①TD8

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 041455 号

责任编辑：胡 凯 许 蕾 曾佳佳/责任校对：彭 涛

责任印制：张 伟/封面设计：许 瑞

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

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张：24 1/2

字数：490 000

定价：169.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

Introduction to In-situ Modification Mining by Fluidization

Yangsheng Zhao Weiguo Liang Zijun Feng

Science Press
Beijing

前　言

原位改性流体化采矿是指在原位对矿体进行物理、化学性态改造，实施矿物的流体化开采的一种新型采矿方法。

伴随着社会持续高速发展，人类赖以发展的煤炭、石油、天然气、金属、非金属矿产等常规地质资源与能源因大规模开发而日益短缺，或易开发的、优质的资源大幅减少，迫切需要开发新型的、非常规的、深层的资源与能源，如干热岩地热、油页岩、煤层气、深层煤炭资源、深层铜金铀、天然气水合物等资源。而这类资源矿体致密、矿物以固态或热能形式赋存、埋藏深度大、能量密度低，传统的固体矿床井工开采方法与流体矿床钻井抽采方法都难以有效开采，原位改性流体化开采方法就是伴随着这类新型的、非常规的资源开发而提出与发展的。因此，它是与传统井工开采、钻井抽采方法并列的一类地质资源与能源开采的方法。

原位改性流体化采矿的雏形，最早可追溯到 1400 多年前中国和欧洲进行的盐的水溶开采。20 世纪 20 年代，苏联开始煤炭地下气化。60 年代中国、美国开始了铜矿、铀矿的原位溶浸开采。80 年代美国最先进行干热岩地热开采等。80 年代后期，我带领团队系统地开展了原位改性流体化采矿的基础研究，即演变多孔介质固流热化学耦合方面的试验与理论研究，于 2006 年出版的国家自然科学基金学科发展战略研究报告《矿产资源科学与工程》中最早提出了“固体矿物流体化开采”的新型学科方向。2010 年，太原理工大学矿业工程学科申报并获批了“原位改性采矿”教育部重点实验室，2018 年“国家油页岩开采研发中心”落户太原理工大学。从 2000 年起，我们团队广泛深入地进行了盐矿水溶开采、低渗透储层煤层气改性开采、油页岩原位热解开采、干热岩地热开采、天然气水合物开采等领域的科学与工程研究，并于 2005 年、2014 年先后获盐类矿床控制水溶开采、煤层气改性开采两项国家技术发明二等奖。针对深部煤炭资源开采难题，谢和平院士于 2014 年 6 月在中国工程院国际工程科技大会上提出了“煤炭资源流态化开采”的构想，并于 2017 年在《煤炭学报》发表。

由原位改性流体化采矿的发展脉络可见，它正如一轮喷薄欲出的朝阳，将会在地质资源与能源开发的广泛领域日益引发革命性的技术突破。

原位改性流体化采矿所涉及的工程领域众多，看似“风马牛不相及”，实际上它们具有共同的科学——变形、渗流、传热传质、化学耦合作用的演变多孔介质传输。在国内最早关注这一科学问题的是章梦涛先生，在 1989 年章先生就发表文章专门论述“变形与渗流相互影响的岩石力学问题”，1983～1986 年，我在章先生的指导下进行了固液耦合的硕士论文研究，1989～1992 年在孙钧院士指导下进行了固气耦合的博士论文研究。之后，伴随着科学研究的深入与工程领域的拓

展，逐渐深入开展了固流热化学耦合的实验、理论与技术的研究，并于 1994 年、2010 年先后出版了《矿山岩石流体力学》《多孔介质多场耦合作用及其工程响应》两本原位改性流体化采矿基础与应用研究的阶段性成果。近年来深入研究、凝聚而形成了“演变多孔介质传输理论”，初步构建了原位改性流体化采矿的理论体系。

原位改性流体化采矿技术与工程实践不断发展，快速推进着新型的、非常规的地质资源与能源的开发。干热岩地热开发从概念到工业实践，经历 40 余年的发展，逐渐形成了超深钻井与人工储层的水循环换热开采系统，人工储层、天然裂缝与断层储层的工业模式正在多国实际运行，近岩浆囊地热开发已在冰岛实践。30 多年来全世界就一直探寻油页岩的原位开发技术，并已形成了 ICP（壳牌公司的原位转换技术）、MTI（太原理工大学的原位对流加热开采油页岩技术）等几项技术，工业开发指日可待。低渗透储层煤层气开发一直困扰着全世界的科学与技术界，各种原位增透技术、强化解吸技术在持续研发。盐类矿床原位溶浸开采技术在纯硫酸钠、氯化钠矿床广泛使用，而难溶的钙芒硝矿、光卤石矿从井工开采变革为原位改性流体化开采还需时日。砂型铀矿资源的原位溶浸开采经历 60 余年的发展，在我国已有 50%的工业份额，其他类型的铀、镭、钍等放射性矿产资源的原位溶浸开发还待深入研发，其工业实践的那天将会为人类提供大量的洁净能源。优质的便于井工开采的铜、银、金等贵金属资源日益短缺，原位溶浸开采将为人类提供新的可开发的贵金属资源与产品，但地面湿法冶金的实践表明，贵金属资源的原位溶浸开采还会经历漫长历程。天然气水合物的开发是国际能源开发角逐的热点，缺乏封闭空间的深海原位开采的连续实施与可能诱发的水合物大面积释放，一直困扰着世界科学与技术界。

如上所述，原位改性流体化采矿方法有着广泛的工业应用前景，其深刻的科学规律、理论模型、针对具体工业的技术原理和工艺与设备系统的研发，任重而道远，有些需要几代人的研究尚可见成效，但为人类永续发展，其研究再艰难我们也必须不舍不弃。30 年前，我们提出原位改性流体化采矿的构想时，在别人眼中几近空想。20 年前，我们团队开始从事干热岩地热开采、油页岩原位开采研究时，国内难觅知音，在共识性评价体系的当时常受冷落。所幸团队的这种坚守，今天柳暗花明，越来越受到社会各界的广泛关注与支持。本书凝聚了团队成员深入科学与工程研究的大量心血，主要有：段康廉、靳钟铭、胡耀青、杨栋、冯增朝、常宗旭、万志军、张渊、曲方、吕兆兴、康志勤、赵建忠、石定贤、徐素国、邵保平、赵金昌、刘正和、孟巧荣、毛瑞彪等，对他们的付出表示衷心的感谢。本书引用了国内外许多学者发表的论著、观点与图表，对此表示衷心的感谢。

赵阳升

2018 年 12 月 23 日

目　录

前言
第 1 章　引论 ……1
1.1　矿产资源与能源……1
1.2　原位改性流体化采矿……4
第 2 章　演变多孔介质传输物性规律 ……9
2.1　演变多孔介质分类和演变机理 ……9
2.2　THMC 耦合作用在线试验机 ……13
2.2.1　固体传压岩体高温高压三轴在线试验机研制 ……14
2.2.2　气体传压高温高压三轴 THMC 耦合作用试验台研制 ……18
2.2.3　液体传压高温真三轴试验机研制 ……19
2.2.4　高温三轴-CT 在线微型三轴试验机研制……19
2.3　多孔介质渗流物性方程……21
2.3.1　Darcy 定律 ……21
2.3.2　单一裂缝渗流定律 ……23
2.3.3　应力与孔隙压作用下的渗流特征 ……24
2.3.4　三维应力下裂缝渗透系数的实验 ……25
2.3.5　渗透率与岩石细观结构相关规律 ……27
2.3.6　吸附性气体的渗流规律 ……29
2.4　有效应力规律……30
2.5　热力（TM）耦合作用特性 ……31
2.6　THMC 耦合作用的矿岩特性 ……37
2.6.1　THM 耦合作用的岩石渗透特性……37
2.6.2　气煤热解的 THMC 耦合作用规律 ……39
2.6.3　褐煤热解的 THMC 耦合作用规律 ……40
2.6.4　油页岩热解的 THMC 耦合作用规律 ……42
2.6.5　钙芒硝盐岩溶解渗透力学特性 ……43
第 3 章　矿层原位改性的技术原理 ……46
3.1　矿层改性逾渗理论……46
3.1.1　逾渗现象 ……47
3.1.2　孔隙裂隙双重介质逾渗研究方法 ……49

3.1.3　二维孔隙裂隙介质连通概率分析 …… 53
3.1.4　三维孔隙裂隙介质连通概率分析 …… 55
3.2　矿层压裂改性、卸压破裂改性原理 …… 59
3.2.1　矿层压裂改性原理 …… 59
3.2.2　矿层卸压破裂改性原理 …… 61
3.3　热破裂增透改性原理 …… 62
3.3.1　花岗岩与长石细砂岩的主要成分和显微 CT 细观结构 …… 62
3.3.2　细砂岩热破裂与渗透率随温度变化特征 …… 64
3.3.3　花岗岩热破裂与渗透率随温度变化规律 …… 66
3.4　矿层溶解增透改性原理 …… 67
3.5　矿层热解改性原理 …… 70
3.5.1　油页岩热解改性原理 …… 70
3.5.2　煤热解增透改性原理 …… 74
3.6　煤炭地下气化、盐矿水溶开采原理 …… 81
3.6.1　煤炭地下气化原理 …… 81
3.6.2　盐矿水溶开采原理 …… 83
3.7　矿层改造开采井网建造方法 …… 84
3.7.1　压裂连通理论与技术 …… 84
3.7.2　定向井连通建造开采井网技术 …… 93
第 4 章　演变多孔介质传输理论 …… 96
4.1　裂隙介质固流热耦合数学模型与求解 …… 96
4.1.1　物理基础 …… 96
4.1.2　裂隙介质固流热耦合数学模型 …… 97
4.1.3　求解策略与计算程序设计 …… 101
4.2　残留骨架热解开采的固流热化学耦合数学模型 …… 102
4.2.1　气液两相混合物渗流方程 …… 103
4.2.2　热量传输方程 …… 104
4.2.3　岩体变形方程 …… 105
4.2.4　残留骨架的热解改性采矿的固流热化学耦合数学模型 …… 105
4.3　残留骨架溶浸开采的固流热化学耦合数学模型 …… 106
4.3.1　溶解传输的颗粒模型 …… 106
4.3.2　残留骨架溶浸开采的 THMC 耦合数学模型 …… 109
4.4　无残留骨架溶浸开采的 THMC 耦合数学模型 …… 110
4.5　无残留骨架气化开采的扩散-流动-传热耦合数学模型 …… 113

第 5 章　煤层气原位改性开采 ……115
5.1　低渗透煤层原位改性强化煤层气抽采的技术原理 ……115
5.2　煤层的水力压裂技术 ……116
5.3　低渗透储层 CO_2 压裂改性强化抽采煤层气 ……118
5.4　低渗透储层水力割缝改性强化抽采煤层气 ……122
5.4.1　水力割缝抽采煤层气的数值分析 ……123
5.4.2　水力割缝成套装备的研制 ……126
5.4.3　水力割缝强化本煤层煤层气抽采的工业应用 ……127
5.5　低渗透煤层注热改性强化煤层气开采 ……129
5.5.1　温度作用下煤层气吸附-解吸特性的实验研究 ……129
5.5.2　低渗透煤层注热改性开采煤层气的技术与工艺 ……132
5.5.3　注热开采煤层气的技术经济分析 ……135
第 6 章　盐类矿床原位溶浸开采与油气储库建造 ……137
6.1　单井对流溶浸改性开采技术 ……138
6.2　双井对接连通溶浸改性开采技术 ……141
6.3　单井水平后退式溶浸开采技术 ……142
6.3.1　正循环溶浸时注水量的影响分析 ……144
6.3.2　溶浸过程中腔体形状、流场、浓度场及温度场变化 ……148
6.4　易溶硫酸钠矿床群井致裂控制水溶开采技术与工程 ……150
6.4.1　群井致裂技术 ……151
6.4.2　运城盐湖深层硫酸钠矿床 ……153
6.4.3　矿层控制水压致裂 ……155
6.4.4　S 井网群井致裂控制水溶开采工业实施 ……157
6.4.5　易溶盐矿群井控制水溶开采实施技术 ……160
6.5　难溶钙芒硝矿床压力溶浸控制水溶开采技术与工程 ……161
6.5.1　四川彭山同庆南风公司钙芒硝矿床地质特征 ……161
6.5.2　工业试验技术方案 ……164
6.5.3　群井致裂与溶采试验 ……165
6.5.4　钙芒硝矿原位水溶开采小规模工业应用 ……167
6.6　盐岩溶腔油气储库建造技术及理论基础 ……167
第 7 章　油页岩原位热解改性开采 ……172
7.1　油页岩热解机理 ……174
7.2　油页岩地下原位传导加热开采技术 ……177
7.3　油页岩原位注蒸汽开采技术研究 ……183
7.3.1　MTI 技术 ……183

7.3.2　大块油页岩水蒸气热解试验研究 ……186
7.3.3　油页岩原位注蒸汽开采的数值模拟 ……191
7.4　大尺度油页岩试样水蒸气热解中试研究 ……197
7.4.1　试验系统 ……197
7.4.2　试验方案及试验过程描述 ……198
7.4.3　热解过程中温度场分布及变化特征 ……199
7.4.4　热解过程孔隙压力变化特征 ……201
7.4.5　油页岩热解过程热破裂声发射检测与破裂特征 ……203
7.4.6　油页岩热解过程中变形特征 ……204
7.4.7　油页岩热解过程热能利用和余热分析 ……205
7.4.8　蒸汽热解开采区油页岩特征及回采率分析 ……207
7.4.9　原位注水蒸气热解开采的产物分析 ……209
7.5　新疆博格达山油页岩原位注蒸汽开采的示范工程方案 ……210
7.5.1　设计方案 ……211
7.5.2　锅炉主要设计性能参数 ……211
7.5.3　开发矿层条件及井网布置 ……212
7.5.4　低温余热发电系统 ……213
7.5.5　主要技术经济指标 ……214
7.6　油页岩原位气体加热技术 ……216
7.6.1　雪弗龙公司（Chevron）的 CRUSH 技术 ……216
7.6.2　美国页岩油公司（AMOS）的 EGL 技术 ……216
7.6.3　美国地球探测公司（Petroprobe）的空气加热技术 ……217
7.6.4　西山能源公司（MWE）的 IVE 技术 ……218
7.7　油页岩原位辐射和燃烧加热干馏技术 ……219
7.7.1　辐射加热技术 ……219
7.7.2　燃烧干馏技术 ……220
第 8 章　放射性及有色金属矿产原位改性开采 ……222
8.1　铀矿原位改性开采 ……222
8.1.1　铀矿的资源特征 ……222
8.1.2　铀矿原位改性溶浸开采中的化学反应 ……223
8.1.3　铀矿原位改性溶浸开采工艺 ……223
8.2　铜的原位改性开采 ……226
8.2.1　铜矿的资源特征 ……226
8.2.2　铜矿原位改性开采中的化学过程 ……227
8.2.3　铜矿原位改性流体化开采工艺 ……230

8.3　金矿的原位改性流体化开采……233
8.3.1　中国金矿的资源特征……233
8.3.2　金矿溶解化学反应……234
8.3.3　金矿钻孔地浸法……234
第 9 章　天然气水合物原位改性开采……237
9.1　概述……237
9.1.1　天然气水合物……237
9.1.2　全球资源分布……238
9.1.3　中国的天然气水合物藏分布及特征……240
9.2　开采方法……241
9.2.1　天然气水合物储藏方式及开采方法……242
9.2.2　天然气开采研究现状……244
9.3　多孔介质水合物的结构特征 CT 实验研究……246
9.3.1　多孔介质水合物结构 CT 实验……246
9.3.2　多孔介质水合物结构特征……248
9.4　多孔介质水合物分解过程多孔骨架的变形特征……250
9.4.1　粒径 1.18～2.8mm 多孔介质水合物的分解……250
9.4.2　粒径 2.8～4.75mm 多孔介质水合物的分解……251
9.4.3　粒径 0.85～1.18 mm 多孔介质水合物的分解……252
9.4.4　水合物分解引起的变形……252
9.5　多孔介质水合物原位分解温度场分布实验……254
9.5.1　材料与实验仪器……255
9.5.2　甲烷水合物的形成……256
9.5.3　水合物减压分解过程中的温度变化……256
第 10 章　低变质煤原位注热脱水提质改性开采……262
10.1　褐煤原位注蒸汽开采油气与提质改性技术……263
10.2　褐煤热解孔隙结构演变规律……266
10.2.1　孔隙率的热解演变特征……266
10.2.2　孔隙比表面积随热解温度的变化规律……267
10.2.3　褐煤热解渗透率演变规律……268
10.2.4　三轴应力下褐煤变形特性随温度变化规律……269
10.3　褐煤高温蒸汽热解实验研究……272
10.3.1　高温蒸汽热解产气量分析……272
10.3.2　热解产气组分随温度的变化分析……274
10.3.3　高温蒸汽热解产气热值分析……276

10.3.4　褐煤高温蒸汽热解残留固体基本性质分析……277
10.4　褐煤煤层高温蒸汽压裂-热解数值模拟……281
10.4.1　褐煤煤层高温蒸汽压裂-热解 THMC 耦合数学模型……281
10.4.2　温度场分布规律……281
10.4.3　渗流场动态变化规律……284
10.5　褐煤原位注水蒸气脱水提质改性的工业方案分析……286
10.5.1　工艺设计基本参数……286
10.5.2　方案设计计算……287
10.5.3　生产能力核定与效益分析……288
10.5.4　与井工开采比较分析……290
第 11 章　干热岩地热开采……291
11.1　干热岩地热资源……291
11.1.1　世界干热岩地热资源……292
11.1.2　中国干热岩地热资源及优先开发选区……292
11.2　干热岩地热开发基础研究新进展……293
11.2.1　高温高压下钻孔围岩变形规律……294
11.2.2　高温高压下破岩方式研究……299
11.2.3　干热岩地热开发人工热储建造基础研究……304
11.3　干热岩地热开采系统与增强型地热系统（EGS）……309
11.3.1　水平井分段压裂人工热储 HDR 地热开采系统……310
11.3.2　人工储留层建造……316
11.4　断层模式（FM）干热岩地热开发技术……321
11.4.1　干热岩地热开发技术争论……321
11.4.2　西藏羊八井干热岩地热资源……323
11.4.3　羊八井地热田现今构造地应力场特征……325
11.4.4　断层模式羊八井深部干热岩地热开采技术方案……327
11.5　干热岩地热开发工程的国际新进展……331
11.5.1　法国 EGS 地热开发……331
11.5.2　美国沙漠峰干热岩地热开发……333
11.5.3　冰岛近岩浆层地热开发……334
参考文献……336
索引……373

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction

1.1 Mineral resources and energy

1.2 In-situ modification mining by fluidization

Chapter 2 Constitute law of transport in evolving porous media

2.1 Classification and evolution mechanism of evolving porous media

2.2 THMC coupling online-testing machine

2.3 Constitute law of seepage in porous media

2.4 Effective stress law

2.5 Thermo-mechanical (TM) coupling properties

2.6 Evolution of ore mass properties coupled by THMC effect

Chapter 3 Technical principles of in-situ modification to ore-stratum

3.1 Percolation theory of modification to ore-stratum

3.2 Principle of modification to ore-stratum by stress-releasing and hyrofracturing

3.3 Principle of modification to ore-stratum by thermal cracking

3.4 Principle of modification to ore-stratum by dissolution

3.5 Principle of modification to ore-stratum by pyrolysis

3.6 Underground coal gasification and salt-ore dissolution mining

3.7 Method of constructing borehole net for modification mining

Chapter 4 Theory of transport in evolving porous media

4.1 THM coupled mathematical model of fracture medium and solution method

4.2 THMC coupled mathematical model of residual skeleton induced by pyrolysis mining

4.3 THMC coupled mathematical model of residual skeleton induced by leaching mining

4.4 THMC coupled mathematical model of non-residual skeleton induced by leaching mining

4.5 Flow-heat and mass transfer coupled mathematical model of non-residual skeleton induced by gasification mining

Chapter 5 In-situ modification mining of coalbed methane

5.1 Technical principle of in-situ modification to enhancing coalbed methane recovery in low permeability reservoir

5.2 Hydraulic fracturing technology in coalbed

5.3 Enhancing coalbed methane recovery in low permeability reservoir by CO_2-driven hydrofracturing

5.4 Enhancing coalbed methane recovery in low permeability reservoir by hydraulic slotting

5.5 Enhancing coalbed methane recovery in low permeability reservoir by heating injection

Chapter 6 In-situ leaching mining of salt-ore deposit and construction of oil & gas storage cavern

6.1 Single-well convection leaching mining technology

6.2 Double wells convection leaching mining technology

6.3 Single vertical and one horizontal well retreating leaching mining technology

6.4 Technology and engineering of in-situ leaching mining soluble sodium sulfate deposits by multi-well hydrofracturing

6.5 Technology and engineering of in-situ pressed leaching mining sparingly soluble glauberite deposit

6.6 Theory and technology of constructing oil & gas storage cavern in dissolved rock salt deposit

Chapter 7 Oil shale mining by in situ pyrolyzed modification

7.1 Mechanism of oil shale pyrolysis

7.2 Oil shale mining by in-situ conductive heating

7.3 Oil shale mining by in-situ steam injection to convective heating

7.4 Pilot study of large scale oil shale sample pyrolysis by steam injection

7.5 Demonstration project plan of bogurda mountain oil shale mining by in-situ steam injection in Xinjiang

7.6 Oil shale mining by in-situ gas injection to convective heating

7.7 Oil shale mining by in situ radiation heating and combustion

Chapter 8 Radioactive resources and nonferrous metal minerals in-situ modification mining

8.1 Uranium in-situ modification mining

8.2 Copper in situ modification mining

8.3 Gold in-situ modification mining

Chapter 9 Natural gas hydrate in situ modification mining

9.1 Introduction

9.2 Mining methods

9.3 Structure characteristics of porous medium hydrates observed by CT technology

9.4 Deformation of porous medium hydrate skeleton during decomposition

9.5 Temperature distribution of porous medium hydrates decomposition

Chapter 10 Dehydration, upgrading and mining of low-metamorphic coal by in-situ heating injection

10.1 Technology of dehydration and upgrading of lignite and oil & gas mining from lignite by in situ steam injection

10.2 Evolution of pore structure in pyrolyzed lignite

10.3 Experiments of lignite pyrolysis in high temperature steam

10.4 Numerical simulation of steam-driven fracturing and pyrolysis in lignite coalbed

10.5 Industrial plan to dehydrating, upgrading and mining of lignite by in-situ steam injection

Chapter 11 HDR geothermal energy mining

11.1 Introduction to HDR geothermal resources

11.2 Recent advance on fundamental study of HDR geothermal energy mining

11.3 HDR geothermal system and enhanced geothermal systems (EGS)

11.4 Fault-mode geothermal system (FGS) of mining HDR geothermal energy

11.5 International new progress of HDR geothermal exploitation engineering

References

Index

第1章 引 论

1.1 矿产资源与能源

矿产资源与能源是人类赖以生存与发展的关键要素之一，是现代工业社会的最主要的基础，矿产资源开采为现代工业和高科技产业提供了种类繁多的、品种齐全的金属、非金属、有机与无机材料，其中有量大面广的铁、铝、铜，也有极为珍稀的金、银、镍、钴、钛等贵金属材料。石油、天然气、煤炭和核原料等同时也是主要的能源。随着社会进步和国民经济的发展，人类对矿产资源和能源的需求量和依赖程度越来越大，质量要求越来越高，而中国是一个矿产资源和能源相对贫乏的国家，油气资源短缺，金属矿产资源品位较低，虽然煤炭资源量大，但利用过程中污染严重。伴随着中国经济的高速发展，矿产资源和能源的供需矛盾已凸现出来，资源与能源安全已与国家安全紧密相关，引起了全社会的高度重视。

矿产资源与能源包括：

煤炭资源：褐煤、烟煤、无烟煤等各种变质程度的煤种和油母页岩等。

金属矿产资源：① 放射性矿产，如铀矿、钍矿等；② 铁与钛合金矿产，如铁矿、锰矿、铬矿、钒矿、钛矿等；③ 有色金属矿产，如铜矿、铅锌矿、铝土矿、钨矿、锡矿、锑矿、汞矿等；④ 贵金属矿产，如金矿、铂族金属矿、银矿等；⑤ 稀土矿产，如稀有与分散金属矿产等。

非金属矿产资源：是指除能源矿产与金属矿产之外的工业矿物与岩石，如萤石、重金石、菱镁矿、石墨、芒硝、高岭土、石棉等。

石油与天然气资源：如石油、天然气、煤层气和天然气水合物资源，包括陆地与海洋资源。

地热资源：天然热水资源与干热岩地热资源。

煤炭提供世界一次能源的27%，世界发电量的45%，煤炭衍生物生产25 000多种消费品，在世界经济中占有重要地位，我国的煤炭在一次能源消费中，占70%，预计到2050年，仍将占50%。煤炭的开采一直采用露天和井工开采方法。煤炭开采的安全问题尤为突出，事故多，事故居全国各行业的首位，死亡人数多，约占全国工矿企业死亡人数的51%，百万吨死亡率和死亡人数都远高于世界发达国家。煤矿的安全问题涉及瓦斯、火灾、煤尘、水灾、冲击地压、顶板事故、机电事故、安全爆破等多个方面。煤矿重大和特大安全事故的不断发生，已经严重制

约了煤矿开采的健康发展，对国民经济和社会发展造成了恶劣影响。

煤矿开采造成对生态环境的破坏，据统计，全国重点煤矿平均每开采 1 万 t 煤炭要破坏 0.2km^2 的土地，据此推算，全国各类煤矿矿井开采造成的土地沉陷与破坏的面积十分巨大。除此以外，还有大量的矿井矸石山、露天矿坑、露天废石场等。开采导致了地面建筑物与构筑物的破坏、地表与地下水流失、植被破坏、土地沙化、泥石流、酸雨、井下有害气体排放污染大气、矿雾等环境问题。在环保问题日益突出的今天，煤矿开采如何面对环境保护与生态重建的压力，通过自身的开采技术变革，实现煤矿的绿色环保开采是面临的重要课题。

金属矿产资源对国家经济、国防安全影响很大，涉及国防安全的矿产资源有 30 多种，其中金属矿就占 23 种，因此，金属矿开采的技术水平直接影响到国防安全。随着金属矿产资源开发力度的不断加大，金属矿产资源，特别是浅层优质的资源面临逐渐短缺。中国金属矿产资源开采技术和设备水平落后，采矿损失率、贫化率偏高。矿产资源回收率低下，丢弃大量矿柱、低品位矿体以及开采技术难度大的矿体残留。平均总回收率偏低，总回收率只有 30%，共伴生矿产资源综合利用率不到 20%，金属矿产资源综合利用率平均仅为 35%，而国外平均在 50%以上，差距甚大。金属矿床开采向深部发展，采矿条件日趋恶化，随开采深度的不断增加，地质条件恶化，破碎岩体增多，地应力增大，涌水量加大，地温升高，带来了深部地压、提升能力、作业面环境恶化、通风降温和生产成本急剧增加等一系列问题，抑制了生产能力提高和矿产资源的充分回收。由于采矿和选矿排出的废石、尾矿、废水和废气所引起的矿山环境污染和破坏严重，根据国家生态环境部的资料，目前我国金属矿山储存的尾矿总量超过 40 亿 t，并以高速增加，废石场、排土场新增面积每年达到数十万亩。尾矿和废石中的大量有毒有害物质和废水、废气一起通过水和风力作用，大范围污染水资源、地表土壤和大气，使生态环境受到严重破坏。尾矿坝和排土场造成的溃坝、滑坡事故不断发生，严重威胁人民生命财产和企业生产的安全。此外，因矿山开采引起的地表沉陷、山体滑坡和泥石流等问题也日益突出。

世界上已被工业利用的非金属矿产资源有 250 多种，我国是世界上少数几个非金属矿资源较丰富的国家之一，也是世界上非金属矿产品齐全、资源储量较大的国家之一，已探明 88 种。2000 年，我国非金属矿产业总产值高达 4049.79 亿元，占国民经济总产值的 4.7%，从 1992～2000 年，我国非金属矿行业每年出口平均增幅 13.2%，为国家创收大量外汇，在国民经济中占有重要地位。

石油、天然气和煤层气是世界上最主要的能源和优质化工原料，是社会经济发展中最主要的生产力要素之一，石油和天然气的比例占世界能源消费的 62.09%。1963 年中国实现了石油自给，1992 年重新开始进口，2017 年进口已超过 4 亿 t。石油对中国经济有着重大的作用和影响，石油和天然气勘探正向深层、