

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与  
工程研究著作 丛书

# 深部洞室破坏机理与围岩 稳定分析理论方法及应用

◎张强勇 李术才 张绪涛 焦玉勇 张传健 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
岩石力学与工程研究著作丛书

# 深部洞室破坏机理与围岩稳定 分析理论方法及应用

张强勇 李术才 张绪涛 焦玉勇 张传健 著

国家自然科学基金项目(41172268、51279093)资助  
国家科技重大专项项目(2011ZX05014)资助  
国家重点研发计划项目(2016YFC0401804)资助

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统研究深部洞室分区破裂的产生条件与影响因素,建立了基于应变梯度的分区破裂力学模型和能量损伤破坏准则,发展了分区破裂数值分析方法,阐明分区破裂的力学成因与破坏机制。提出地下洞室初始地应力场反演方法,建立大型地下厂房洞室群施工期围岩力学参数动态反演与分析方法。通过三维地质力学模型试验探索了超深埋碳酸盐岩油藏溶洞的成型垮塌破坏机制,分析不同形态、不同尺寸溶洞的垮塌破坏过程与垮塌影响范围,揭示缝洞型裂缝闭合规律,形成深部岩体洞室破坏机理与围岩稳定分析理论与方法体系。本书注重理论、方法与工程实践的紧密结合,提出的试验方法、建立的理论模型和编制的计算程序皆成功应用于实际工程,并有效指导工程实践。

本书可供土木、水电、能源、矿山、交通等工程领域的科研和工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

深部洞室破坏机理与围岩稳定分析理论方法及应用/张强勇等著. —北京:科学出版社,2017.3

(岩石力学与工程研究著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-052026-5

I. ①深… II. ①张… III. ①岩石破裂-破坏机理-研究 ②围岩稳定-稳定分析 IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 045957 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:张 倩 / 封面设计:熙 望

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:408 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编: 冯夏庭 何满潮

副主编: 康红普 李术才 潘一山 殷跃平 周创兵

秘书长: 黄理兴 刘宝莉

编 委: (按姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰 曹 洪 陈卫忠 陈云敏 陈志龙

邓建辉 杜时贵 杜修力 范秋雁 冯夏庭

高文学 郭熙灵 何昌荣 何满潮 黄宏伟

黄理兴 蒋宇静 焦玉勇 金丰年 景海河

鞠 杨 康红普 李 宁 李 晓 李海波

李建林 李世海 李术才 李夕兵 李小春

李新平 廖红建 刘宝莉 刘大安 刘汉东

刘汉龙 刘泉声 吕爱钟 潘一山 戚承志

任辉启 余诗刚 盛 谦 施 斌 宋胜武

谭卓英 唐春安 汪小刚 王 驹 王 媛

王金安 王明洋 王旭东 王学潮 王义峰

王芝银 邬爱清 谢富仁 谢雄耀 徐卫亚

薛 强 杨 强 杨更社 杨光华 殷跃平

岳中琦 张金良 张强勇 赵 文 赵阳升

郑 宏 郑炳旭 周创兵 朱合华 朱万成

## 《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO<sub>2</sub> 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO<sub>2</sub> 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

## 《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

## 前 言

随着科学技术的发展尤其是经济建设的需要,科技工作者不仅要解决“上天”的问题,更要解决“入地”的问题。目前,我国许多在建和拟建的地下工程不断走向深部,无论是矿产资源开采的地下巷道、交通建设的地下隧洞、还是水电开发的地下洞室等都逐渐向千米或数千米的深部方向发展。随着地下工程开挖深度的增加,深部洞室岩体的破坏机理以及洞室围岩稳定分析理论方法就成为深部地下工程领域关注的重点和难点科学技术问题。在深部地下工程的开挖过程中,由于“三高一扰动”的影响,深部洞室中出现了一系列新的不同于浅埋洞室的特征科学现象,其中,分区破裂就是深部岩体工程开挖时所发生的特有的非线性破坏现象。虽然针对分区破裂现象在现场监测、室内试验、理论研究和数值模拟等方面已取得一些研究成果,但关于分区破裂现象的产生条件和影响因素仍存在较多争议,有关分区破裂的力学成因与破坏机制还没有形成共识。

为保证地下洞室施工开挖与运行安全,必须对洞室围岩稳定进行计算分析,由于地质赋存环境和岩体力学性质的复杂性,如何准确获得洞区岩体初始地应力场和洞室围岩的力学参数,也成为深部地下洞室围岩稳定分析的基础和前提条件。

众所周知,石油作为重要的战略资源,在促进国家经济发展方面发挥了重要作用,如何高效、安全地开发深部石油资源是石油开采领域需要高度重视的问题。然而在超深埋缝洞型油藏开采过程中,由于采油引起缝内地层压力下降,导致井下时常发生油藏古溶洞垮塌及储油裂缝出油通道闭合的现象,由此严重影响油井的开采量。为了提高石油采收率和保证钻井作业安全,必须深入了解超深埋缝洞型油藏溶洞的垮塌破坏机制以及缝洞型储油裂缝的闭合规律。

基于上述背景,本专著在国家自然科学基金项目(41172268、51279093)、国家科技重大专项项目(2011ZX05014)、国家重点研发计划项目(2016YFC0401804)以及中国电建集团成都勘测设计研究院科技项目的资助下,系统研究了深部洞室分区破裂的产生条件与影响因素,建立了基于应变梯度的分区破裂非线性弹性损伤软化模型和能量损伤破坏准则,发展了分区破裂数值分析方法,阐明了分区破裂的力学成因与破坏机制。提出了地下洞室初始地应力场的多元回归分析与拟合方法,建立了地下洞室围岩力学参数正交设计、效应优化位移反分析法,并对大岗山水电站大型地下厂房洞室群施工期围岩力学参数进行了动态反演和开挖稳定

性分析。通过三维地质力学模型试验探索了塔河油田超深埋碳酸盐岩油藏溶洞的成型垮塌破坏机制,提出了油藏溶洞垮塌判据以及溶洞临界垮塌深度、垮塌顶板厚度和垮塌洞跨的预测公式,揭示了缝内降压速率、降压幅度、裂缝倾角、裂缝长度、裂缝宽度等因素对缝洞型裂缝闭合的影响规律。

本书内容共7章,第1章介绍目前国内外研究现状和本书主要研究成果;第2章介绍不同因素影响下深部洞室分区破裂模型试验研究成果;第3章介绍深部洞室分区破裂理论分析研究成果;第4章介绍深部洞室分区破裂数值分析研究成果;第5章介绍地下洞室初始地应力场反演分析研究成果;第6章介绍大型地下厂房施工期围岩力学参数动态反演与开挖稳定性分析研究成果;第7章介绍超深埋缝洞型油藏溶洞垮塌破坏机制与储油裂缝闭合规律的研究成果。

本书出版得到国家自然科学基金项目、国家科技重大专项项目、国家重点研发计划项目以及中国电建集团成都勘测设计研究院科技项目的大力资助,在此深表谢意!同时,对参与本专著相关内容研究的部分博士研究生王超、陈旭光、杨文东、张宁、赵茉莉、张龙云、刘传成、任明洋、张岳,部分硕士研究生于秀勇、杨佳、段抗、刘德军、许孝滨、曹冠华、蔡兵、张建国的辛勤劳动以及山东科技大学王刚教授、中国电建集团成都勘测设计研究院黄彦昆教高、邵敬东教高、魏映瑜教高、王建洪教高、贺如平教高、曾纪全高工以及中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院刘中春教高的大力指导和帮助,在此表示衷心感谢!

本书的完成也得到山东大学朱维申教授、陈卫忠教授、李树忱教授、张庆松教授、张乐文教授、向文副教授以及长江勘测规划设计研究有限责任公司杨启贵教高、中国科学院武汉岩土力学研究所李银平研究员的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

在撰写本书的过程中,参阅了国内外相关专业领域的大量文献资料,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,敬请各位同仁批评指正!

# 目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                | 1  |
| 1.1 引言 .....                | 1  |
| 1.2 国内外研究现状分析 .....         | 3  |
| 1.3 本书主要研究内容及成果 .....       | 12 |
| 第2章 深部洞室分区破裂模型试验 .....      | 14 |
| 2.1 引言 .....                | 14 |
| 2.2 模型相似材料 .....            | 14 |
| 2.3 模型试验系统研制 .....          | 17 |
| 2.4 分区破裂地质力学模型试验过程与方法 ..... | 21 |
| 2.4.1 模型试验方案 .....          | 21 |
| 2.4.2 模型制作方法 .....          | 23 |
| 2.4.3 模型量测方法 .....          | 25 |
| 2.4.4 模型加载与开挖方法 .....       | 27 |
| 2.5 分区破裂的产生条件 .....         | 29 |
| 2.5.1 模型洞周破裂现象的对比分析 .....   | 29 |
| 2.5.2 模型洞周位移和应变变化规律 .....   | 36 |
| 2.5.3 深部洞室分区破裂的产生条件 .....   | 39 |
| 2.6 分区破裂的影响因素 .....         | 41 |
| 2.6.1 洞形和地质构造分布的影响 .....    | 41 |
| 2.6.2 分区破裂影响因素分析 .....      | 52 |
| 2.7 模型试验与现场观测结果对比 .....     | 52 |
| 2.8 本章小结 .....              | 53 |
| 第3章 深部洞室分区破裂的理论分析 .....     | 55 |
| 3.1 引言 .....                | 55 |
| 3.2 应变局部化与分区破裂现象 .....      | 55 |
| 3.3 应变梯度弹性损伤本构关系 .....      | 57 |
| 3.3.1 应变梯度和高阶应力的引入 .....    | 57 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 3.3.2 应变梯度弹性损伤本构关系推导 .....        | 60         |
| 3.4 基于应变梯度的分区破裂非线性弹性损伤软化模型 .....  | 64         |
| 3.4.1 岩石材料非线性损伤演化规律 .....         | 64         |
| 3.4.2 分区破裂非线性弹性损伤软化模型 .....       | 68         |
| 3.4.3 深部巷道分区破裂位移平衡方程推导 .....      | 71         |
| 3.5 深部圆形巷道位移和应力求解与模型试验对比分析 .....  | 74         |
| 3.5.1 圆形巷道位移和应力求解方法 .....         | 74         |
| 3.5.2 理论计算与模型试验结果的对比分析 .....      | 78         |
| 3.6 本章小结 .....                    | 80         |
| <b>第4章 深部洞室分区破裂数值模拟方法</b> .....   | <b>82</b>  |
| 4.1 引言 .....                      | 82         |
| 4.2 分区破裂能量损伤破坏准则 .....            | 82         |
| 4.2.1 岩石破坏与能量耗散 .....             | 82         |
| 4.2.2 基于应变梯度的单元破坏准则 .....         | 83         |
| 4.3 分区破裂数值模拟分析方法 .....            | 86         |
| 4.3.1 本构方程的矩阵形式 .....             | 86         |
| 4.3.2 高阶六面体单元的构建 .....            | 88         |
| 4.3.3 分区破裂单元破坏的判定方法 .....         | 98         |
| 4.4 依托 ABAQUS 平台的分区破裂计算程序开发 ..... | 99         |
| 4.5 分区破裂数值模拟结果及分析 .....           | 104        |
| 4.5.1 圆形巷道分区破裂数值模拟 .....          | 104        |
| 4.5.2 含软弱夹层洞室分区破裂数值模拟 .....       | 108        |
| 4.5.3 非圆形洞室分区破裂数值模拟 .....         | 112        |
| 4.5.4 最大主应力对洞室破裂方式的影响 .....       | 119        |
| 4.5.5 洞室形状对分区破裂的影响分析 .....        | 121        |
| 4.6 深部洞室分区破裂的形成机理 .....           | 123        |
| 4.7 本章小结 .....                    | 125        |
| <b>第5章 地下洞室初始地应力场的反演方法</b> .....  | <b>126</b> |
| 5.1 引言 .....                      | 126        |
| 5.2 初始地应力的影响因素 .....              | 127        |
| 5.3 初始地应力回归分析与拟合方法 .....          | 129        |
| 5.4 双江口水电站地下厂房厂区初始地应力场的反演 .....   | 131        |
| 5.4.1 数值计算模型 .....                | 131        |
| 5.4.2 岩体计算参数 .....                | 132        |
| 5.4.3 地下厂房厂区初始地应力实测结果分析 .....     | 133        |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 5.4.4 | 地下厂房厂区初始地应力的回归分析            | 134 |
| 5.4.5 | 地下厂房厂区初始地应力函数               | 136 |
| 5.5   | 大岗山水电站地下厂房厂区初始地应力场的反演       | 138 |
| 5.5.1 | 工程概况                        | 138 |
| 5.5.2 | 初始地应力实测结果                   | 139 |
| 5.5.3 | 地应力反演计算条件                   | 142 |
| 5.5.4 | 实测地应力的转换                    | 143 |
| 5.5.5 | 地下厂房厂区初始地应力回归分析             | 144 |
| 5.5.6 | 地下厂房厂区初始地应力函数               | 147 |
| 5.6   | 本章小结                        | 149 |
| 第6章   | 大型地下厂房施工期围岩力学参数动态反演与开挖稳定性分析 | 151 |
| 6.1   | 正交设计效应优化位移反分析法              | 151 |
| 6.1.1 | 正交试验设计                      | 151 |
| 6.1.2 | 反演目标函数                      | 153 |
| 6.1.3 | 效应优化分析                      | 153 |
| 6.1.4 | 力学参数反演流程与计算步骤               | 155 |
| 6.2   | 大岗山地下厂房围岩力学参数动态反演分析         | 157 |
| 6.2.1 | 数值计算模型                      | 157 |
| 6.2.2 | 地下厂房第七层开挖围岩力学参数的动态反演与分析     | 159 |
| 6.2.3 | 地下厂房第八层开挖围岩力学参数的动态反演与分析     | 169 |
| 6.2.4 | 地下厂房第九层开挖围岩力学参数的动态反演与分析     | 180 |
| 6.2.5 | 洞室锚杆与锚索受力分析                 | 189 |
| 6.3   | 本章小结                        | 196 |
| 第7章   | 超深埋缝洞型油藏溶洞垮塌破坏机制与储油裂缝闭合规律研究 | 198 |
| 7.1   | 引言                          | 198 |
| 7.2   | 塔河油田超埋深碳酸盐岩力学试验             | 198 |
| 7.2.1 | 现场取样与标准试件制备                 | 199 |
| 7.2.2 | 碳酸盐岩力学参数测试                  | 204 |
| 7.2.3 | 碳酸盐岩微细观破裂机制                 | 208 |
| 7.3   | 超深埋碳酸盐岩溶洞垮塌破坏三维地质力学模型试验     | 210 |
| 7.3.1 | 超高压智能数控真三维加载模型试验系统的研制       | 211 |
| 7.3.2 | 模型试验设计方案                    | 218 |
| 7.3.3 | 模型相似材料研制                    | 219 |
| 7.3.4 | 模型加载方法与测试仪器布置               | 224 |
| 7.3.5 | 模型制作与测试方法                   | 226 |

---

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 7.3.6 | 模型试验结果分析·····                  | 229 |
| 7.3.7 | 模型试验研究结论·····                  | 234 |
| 7.4   | 缝洞型油藏溶洞垮塌破坏的数值模拟·····          | 234 |
| 7.4.1 | 数值分析模型与计算条件·····               | 234 |
| 7.4.2 | 溶洞垮塌破坏判据·····                  | 235 |
| 7.4.3 | 溶洞临界垮塌深度的二分深度折减法·····          | 236 |
| 7.4.4 | 不同洞形溶洞的垮塌破坏特征与垮塌影响范围·····      | 237 |
| 7.4.5 | 不同洞形溶洞临界垮塌深度的预测公式·····         | 243 |
| 7.4.6 | 不同洞形溶洞临界垮塌顶板厚度与临界垮塌洞跨预测公式····· | 250 |
| 7.4.7 | 不同洞形溶洞垮塌多因素敏感性分析·····          | 253 |
| 7.4.8 | 不同洞形溶洞稳定性分析比较·····             | 257 |
| 7.5   | 缝洞型裂缝闭合规律的数值模拟分析·····          | 259 |
| 7.5.1 | 缝内降压速率对裂缝闭合规律的影响·····          | 259 |
| 7.5.2 | 裂缝倾角对裂缝闭合规律的影响分析·····          | 268 |
| 7.5.3 | 裂缝长度对裂缝闭合规律的影响分析·····          | 277 |
| 7.5.4 | 裂缝宽度对裂缝闭合规律的影响分析·····          | 284 |
| 7.5.5 | 地层降压幅度对裂缝闭合规律的影响分析·····        | 291 |
| 7.6   | 本章小结·····                      | 296 |
| 参考文献  | ·····                          | 299 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着浅部资源的日益减少以及人类地下生活空间的逐渐拓展,国内外许多地下工程已进入深部,无论是矿产资源开采的地下巷道、交通建设的地下隧洞还是水电开发的地下洞室皆已进入千米深度。据不完全统计,国外开采超千米深的金属矿山有百余座,其中以南非为最多,南非绝大多数金矿的开采深度在 1000m 以上,最大开采深度达到了 3700m,另外,俄罗斯、加拿大、美国、澳大利亚的一些有色金属矿山的开采深度也超过了 1000m。我国淮南矿区丁集煤矿、新汶孙村矿、沈阳采屯矿、开滦赵各庄矿、徐州张小楼矿、北票冠山矿、北京门头沟矿等也已达到了千米以上的开采深度。在交通建设方面,连接法国和意大利的勃朗峰公路隧道的最大埋深为 2480m,我国西康铁路秦岭隧道的最大埋深为 1600m,秦岭终南山特长公路隧道的最大埋深为 1640m;在水电资源开发方面,法国谢拉水电站引水隧洞的最大埋深为 2619m,我国雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞的最大埋深达到了 2525m。此外,核废料深层地质处置、油气能源储存工程以及核心防护工程如北美防空司令部的深度也已接近或超过千米<sup>[1]</sup>。

高地应力、高地温、高渗透压以及开挖扰动影响会导致深部洞室的力学响应完全不同于浅部洞室,随着地下洞室开挖深度的不断增加,深部洞室围岩出现分区破裂非线性破坏现象<sup>[2]</sup>。钱七虎院士<sup>[3]</sup>首次给出了分区破裂现象的定义:在深部岩体中开挖洞室或巷道时,其两侧和工作面前的围岩中会产生交替的破裂区和非破裂区,这种现象被称为分区破裂现象(zonal disintegration)。深部洞室分区破裂现象与浅部洞室破坏现象相比明显不同,浅部洞室开挖后,从洞壁向围岩内部依次是破裂区、塑性区、弹性区和原岩区;而深部洞室开挖后,围岩内出现破裂区和非破裂区多次间隔交替的分区破裂现象。深部洞室分区破裂的特殊性激起了国内外研究者的极大兴趣,分区破裂现象已经成为当今深部岩体工程领域研究的热点和难点科学问题。国内外许多学者针对分区破裂这一特殊现象提出了很多理论解释,但是到目前为止,还没有一种理论解释能够得到大家的普遍认可。关于分区破裂的产生条件、影响因素以及形成机理也没有完全揭示清楚,还需要进行更深入的研究。

初始地应力场是地下洞室围岩稳定分析的重要参数,初始地应力是否可靠将

直接影响到地下洞室的设计与施工安全。工程现场实测地应力是提供岩体初始地应力最直接、最有效的方法,但由于时间、经费等因素的限制,不可能进行大量的测量,而且初始地应力场成因复杂,影响因素众多,测点相对分散,使得现场地应力测量结果具有较大的离散性。因此,必须在现场实测的有限测点初始地应力的基础上,通过反演分析得到适用范围更大的初始地应力场。由此可见,准确获取岩体初始地应力场是进行地下洞室围岩稳定性分析所必须面临的一个重要问题。

众所周知,数值分析方法对岩体力学参数十分敏感,由于岩体尺度效应的影响,无论是室内试验还是原位试验确定的岩体力学参数都与实际岩体参数存在一定的差异,因此用力学试验参数作为计算输入参数进行数值分析,所得结果往往与工程实际情况存在较大的误差。为克服岩体力学参数取值不准的缺陷,岩体力学参数反演就成为解决该问题的重要途径。大量研究表明,利用现场监测位移反演岩体力学参数是一个比较好的途径,通过地下洞室开挖监测位移来反演围岩力学参数,并据此对洞室围岩稳定性进行分析评价,这对确保地下工程施工和运行安全、规避地下工程重大事故风险具有重要的作用。

石油是国家经济发展的重要命脉。通过调查发现我国海相碳酸盐岩油气资源主要分布在新疆塔里木盆地和华北地区,其中缝洞型油藏占探明碳酸盐岩油藏储量的  $2/3$ ,是今后石油增储的主要领域。缝洞型油藏的主要储集空间以古岩溶作用形成的溶洞洞穴和构造作用产生的次生裂缝为主,其中溶洞洞穴是最主要的储油空间,次生裂缝既是储油空间,也是主要的联通渗流通道。在碳酸盐岩油藏开采过程中,随着缝内地层压力下降,井下时常发生油藏溶洞垮塌和储油裂缝出油通道闭合的现象,这严重影响了油井开采量,为了提高石油采收率,并保证钻井作业安全,需要深入研究超深埋碳酸盐岩油藏溶洞的垮塌破坏机制,并探索高角度储油裂缝在复杂地层环境和采油状态下的闭合规律。

基于上述背景,本书系统研究了深部岩体洞室的破坏机理以及围岩稳定性分析理论与方法,主要研究内容如下:

(1) 开展了不同洞形和高地应力分布状态下深部洞室分区破裂三维地质力学模型试验,探讨了分区破裂的产生条件与影响因素,建立了基于应变梯度的分区破裂力学模型和分区破裂能量损伤破坏准则,提出了分区破裂数值分析方法,揭示了分区破裂的产生条件与破坏机理。

(2) 考虑地质构造运动和地形环境的影响,建立了岩体初始地应力多元回归分析与拟合方法,有效反演获得了大岗山水电站地下厂房和双江口水电站地下厂房厂区的初始地应力场。

(3) 考虑施工期围岩力学参数的变化,建立了岩体力学参数正交设计效应优化位移反分析方法,动态反演得到大岗山水电站地下厂房洞室围岩力学参数,并

根据动态反演力学参数对地下厂房施工开挖围岩稳定性进行了数值计算分析,获得洞群围岩位移场、应力场和塑性区的变化规律,提出了对工程设计和施工具有指导意义的建议和计算结论。

(4) 针对超深埋缝洞型油藏开采遭遇溶洞垮塌与储油裂缝闭合的现象,以塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开采为研究背景,通过三维地质力学模型试验探索了超深埋油藏溶洞的成型垮塌破坏机制,提出了溶洞垮塌判据以及溶洞临界垮塌深度、垮塌顶板厚度和垮塌洞跨的预测公式。通过大量工况的数值计算分析,阐明了不同形态、不同尺寸溶洞的垮塌破坏过程以及溶洞垮塌深度、垮塌顶板厚度和垮塌洞跨的变化规律,揭示了缝内降压速率、降压幅度、裂缝倾角、裂缝长度以及裂缝宽度等因素变化对缝洞型裂缝闭合的影响规律,提出了提高缝洞型油藏采收率的研究建议。

## 1.2 国内外研究现状分析

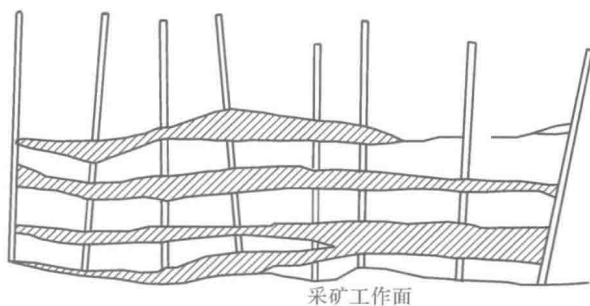
### 1. 深部岩体分区破裂研究现状分析

因为深部洞室分区破裂现象的特殊性,分区破裂现象自首次被发现至今,国内外很多学者对这一难点和热点问题从不同的方面开展了研究,下面从现场监测、室内试验、理论研究和数值模拟等方面对分区破裂研究现状进行分析。

#### 1) 现场监测

20 世纪 70 年代,有南非学者在两千多米深的金矿中首次观测到了破裂区和非破裂区间隔分布的分区破裂现象。随后 Adams 等<sup>[4]</sup>于 1980 年在南非 Witwatersrand 金矿埋深 2000~3000m 的巷道中通过钻孔潜望镜观测到了巷道顶板的间隔破坏现象,如图 1.2.1 所示。钻孔潜望镜观测结果表明:在所观测的钻孔中均有两个以上相对集中的破裂区,这些相对集中的破裂区由 5~150mm 的裂缝组成,破裂区和非破裂区交替出现的范围在 10m 左右。Adams 等在机械开挖和钻爆法开挖的矿井中均发现了分区破裂现象,他们认为分区破裂的产生与开挖方式关系不大,在一定的应力条件下,巷道围岩中就会出现分区破裂现象。

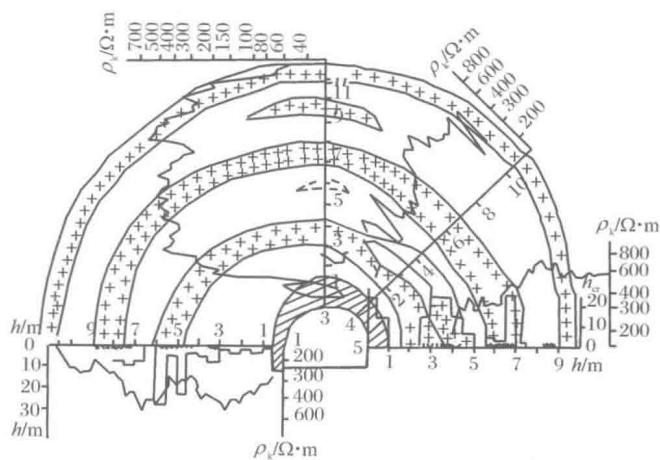
20 世纪 80 年代,俄罗斯学者 Shemyakin 等<sup>[5]</sup>在埋深 957m 的 Oktyabrskil 矿井和埋深 1050m 的 Talmyrskii 矿井中,采用电测法、超声透射法、伽马射线法以及钻孔潜望镜等多种方法观测得到如图 1.2.2 所示的分区破裂现象。



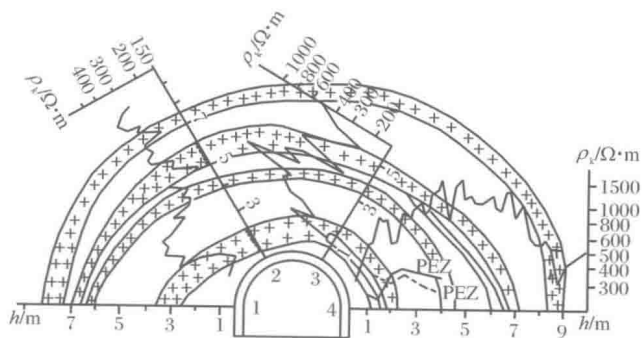
采矿工作面

图 1.2.1 南非 Witwatersrand 金矿巷道顶板间隔破坏现象

▨ 预测裂隙带的展布



(a) 埋深 957m 的 Oktyabrskii 矿井



(b) 埋深 1050m 的 Talmyrskii 矿井

图 1.2.2 俄罗斯深部矿井的分区破裂现象