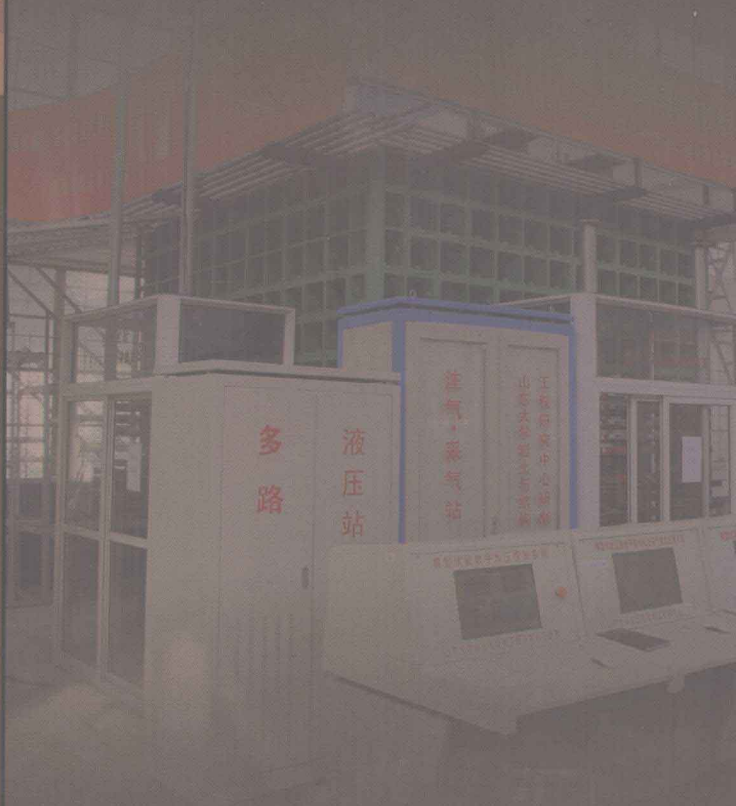


岩石力学与
工程研究著作

丛书

地下工程模型试验新方法、 新技术及工程应用

◎张强勇 李术才 李勇 陈旭光 著



科学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了作者近些年在地下工程地质力学模型试验相似材料、试验装置、加载系统、测试系统研制等方面提出的新方法、新技术以及这些新方法和新技术在大型地下工程模型试验中的应用。内容主要包括新型铁晶砂胶结岩土相似材料以及盐岩地下储气库介质流变相似材料的研制方法;尺寸可调、组装灵活方便的组合式地质力学模型试验台架装置以及可实施三维梯度非均匀加载的结构模型试验装置的研制技术;具有数字化、可视化和智能化功能的高地应力真三维加载地质力学模型试验系统的研制技术;能自动采集模型内部任意部位位移且具有高精度的模型位移数据自动采集系统的研制技术;模型内埋洞室的成腔装置与成腔方法;高效快捷的模型分层压实风干制作与切槽埋设测试传感器方法。本书还包括模型试验的新方法和新技术在大型交通、水电、采矿和能源地下工程地质力学试验中的具体应用以及相应计算与理论分析研究成果。

本书注重方法、技术与工程实践的紧密结合,提出的模型试验新方法和新技术皆得以工程应用并有效指导工程实践。

本书可供从事土木、水电、交通、能源、采矿及国防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和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程模型试验新方法、新技术及工程应用/张强勇等著. —北京:科学出版社,2012

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-034644-5

I. ①地… II. ①张… III. ①地下工程-工程模型-研究 IV. ①TU04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 118267 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:张怡君
责任印制:张 倩 / 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>

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

*

2012年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:345 000

定价:68.00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

副主编：何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长：黄理兴 刘宝莉

编 委：（以姓氏汉语拼音字母顺序排列）

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	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	刘汉龙	刘汉东	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《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，大多以地下洞室（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 m；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岩压显现剧烈，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、CO₂ 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 CO₂ 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。

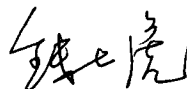
近几年来，国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点（重大）与人才项目等，对上述科学与工程技术的攻克陆续给予了有力资助，并针对重大工程在设计 and 施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研，吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下，这些课题已经取得了很多很好的研究成果，并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结，并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》，值得钦佩、支持与鼓励。

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，来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与重大。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

随着我国国民经济的快速发展,许多在建和即将新建的地下工程不断走向深部,无论是矿产开采的地下巷道、还是水电开发的地下洞室、能源储备的地下储库以及交通建设的地下隧道等都逐渐向深部方向发展。随着开挖深度的不断增加,受“三高一扰动”(即高地应力、高渗透压、高地温及开挖扰动)的影响,往往带来很多难以预测的问题,如岩爆、大变形、强流变、突水、顶板大面积来压和采空区失稳等一系列灾害性事故频频发生。为了避免和减少突发性地质灾害对生命财产造成的重大损害,必须对深部地下洞室工程岩体的非线性变形特征和破坏机理进行深入研究,以此采取有效的加固处理措施。由于地下工程岩体结构和地质赋存环境的复杂性,传统的理论解析方法难以处理深部岩体复杂的非线性问题。同时,鉴于数值分析方法在处理岩体破坏问题时自身具有的局限性,迄今为止,数值方法在模拟深部岩体强度破坏方面仍难以取得突破性的进展。反观地质力学模型试验,以其形象、直观、真实的特性成为研究地下工程非线性变形与强度破坏特性的重要手段。地质力学模型是真实物理实体的再现,在满足相似原理的条件下,能够真实反映地质构造和工程结构的空間关系,能够较准确地模拟地下洞室的施工过程和揭示岩体介质的变形破坏特性。要使地质力学模型试验达到这些目标,必须具备满足相似条件的模型材料和可靠的地质力学模型试验装置与加载和测试分析系统。为此,本书依托第一作者主持承担完成的国家973课题(2009CB724607)、国家自然科学基金面上项目(40772173、41172268)、山东省自然科学基金项目(Y2007F52)、交通部西部交通建设科技项目的主要研究成果,系统阐述了近些年来在地下工程模型试验相似材料、试验装置、加载系统、测试系统研制等方面取得的新方法、新技术以及这些新方法和新技术在实际地下工程模型试验中的应用。提出的模型试验新方法和新技术先后获得10余项国家发明专利,并在国内外学术期刊上公开发表,同时也在大型水电、交通、采矿和能源地下工程地质力学试验中得到成功应用。模型试验研究成果解决了工程设计和施工中的许多关键性技术难题,产生了显著的经济效益与社会效益。

本书共分9章。第1章介绍了地质力学模型试验目前国内外的研究现状;第2章阐述了地质力学模型试验的相似条件;第3章介绍了力学参数变化范围广、性能稳定、价格低廉且无毒无害的铁晶砂胶结新型岩土相似材料以及具有显著流变特性的盐岩地下储气库介质流变相似材料的研制方法;第4章介绍了尺寸可调、组装灵活方便的组合式地质力学模型试验台架装置以及可实施非均匀加载的

三维梯度非均匀加载结构模型试验装置的研制方法。采用数控技术研制了具有数字化、可视化和智能化的高地应力真三维加载地质力学模型试验系统；第5章介绍了模型内埋洞室的成腔装置以及成腔工艺和方法，提出了高效快捷的模型分层压实风干制作与切槽埋设测试传感器的方法。采用数控技术研制了能自动采集模型内部任意部位位移且具有高精度的模型位移数据自动采集系统；第6章开展了前述模型试验新方法和新技术在沪蓉西高速公路八字岭分岔隧洞围岩稳定与支护三维地质力学模型试验中的应用及分析研究；第7章开展了前述模型试验新方法和新技术在淮南矿区丁集煤矿深部巷道围岩分区破裂与锚固三维地质力学模型试验中的应用及分析研究；第8章开展了前述模型试验新方法和新技术在双江口水电站大型地下厂房洞室群围岩稳定与支护三维地质力学模型试验中的应用及分析研究；第9章开展了前述模型试验新方法和新技术在江苏金坛深部层状盐岩地下储气库运营稳定三维地质力学模型试验中的应用及分析研究。

本书第1、2章由李术才教授撰写；第3~6、9章由张强勇教授撰写；第7章由陈旭光博士撰写；第8章由李勇博士撰写。全书由张强勇教授统稿。

本书的研究成果和本书的出版得到国家973课题(2009CB724607)、国家自然科学基金面上项目(40772173、41172268)、山东省自然科学基金项目(Y2007F52)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0336)的大力资助，作者在此深表谢意！另外对于参加本书模型试验的研究生刘德军、林波、段抗、张绪涛、曹冠华、许孝滨、蔡兵等也表示感谢！

本书研究成果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、贾超副教授、刘健副教授、王汉鹏副教授、向文副教授、林春金讲师以及中科院武汉岩土力学研究所杨春和研究员、李银平研究员、焦玉勇研究员的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和欠妥之处，敬请读者批评指正。

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 地质力学模型试验的研究现状	2
1.3 本书主要研究内容	4
第 2 章 地质力学模型试验的相似条件	5
2.1 基本概念	5
2.2 模型试验相似三定理	6
2.3 地质力学模型试验的相似条件	7
2.3.1 相似模型的定义	7
2.3.2 地质力学模型的特点	7
2.3.3 模型试验相似条件	8
第 3 章 模型试验新型相似材料的研制方法	15
3.1 引言.....	15
3.2 模型材料研制的基本原则.....	16
3.3 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制方法.....	17
3.3.1 材料选择.....	17
3.3.2 材料试件的制作方法	18
3.3.3 材料物理力学参数试验	19
3.3.4 材料力学特性分析	24
3.3.5 材料的技术特性	31
3.4 储气库介质流变相似材料的研制方法.....	32
3.4.1 工程背景.....	32
3.4.2 材料力学参数试验	33
3.4.3 材料力学变形特征	34

3.4.4	材料蠕变试验及测试结果分析	38
3.4.5	材料技术特性	42
第4章	新型地质力学模型试验装置与加载和稳压控制系统的研制技术	43
4.1	引言	43
4.2	组合式地质力学模型试验台架装置的研制技术	44
4.2.1	装置设计与构造	44
4.2.2	装置技术特性	47
4.3	三维梯度非均匀加载结构模型试验装置的研制技术	48
4.3.1	装置设计与构造	48
4.3.2	装置工作原理	53
4.3.3	装置技术特性	53
4.4	高地应力真三维加载模型试验系统的研制技术	54
4.4.1	系统构造	54
4.4.2	系统技术特性	54
4.5	模型数控液压加载与稳压控制系统的研制技术	55
4.5.1	系统构造	55
4.5.2	系统控制流程	56
4.5.3	系统工作原理	56
4.5.4	系统技术特性	59
4.6	模型数控气压加载与稳压控制系统的研制技术	59
4.6.1	系统构造	59
4.6.2	系统工作原理	61
4.6.3	系统技术特性	63
第5章	大体积地质模型制作新方法 with 模型位移测试新技术	64
5.1	引言	64
5.2	地质模型分层压实风干制作与切槽埋设测试传感器方法	64
5.2.1	材料分层压实试验装置的研制	64
5.2.2	模型制作方法	66
5.2.3	模型制作方法的技术特点	68
5.3	模型内埋洞室的成型方法	68
5.3.1	内埋洞室的成腔装置	68

5.3.2	内埋洞室的成腔方法	72
5.4	模型位移数据自动采集系统的研制技术	72
5.4.1	系统工作原理	72
5.4.2	系统各部分功能	74
5.4.3	系统技术特性	78
第6章	分岔隧洞围岩稳定与支护三维地质力学模型试验与分析研究	79
6.1	引言	79
6.2	工程概况	79
6.3	模拟范围与相似比尺的选取	80
6.4	模型相似材料和试验锚杆的模拟	82
6.4.1	相似材料配比	82
6.4.2	模型锚杆的模拟	83
6.5	分岔隧洞模型的制作	83
6.5.1	模型制作工艺流程	83
6.5.2	测试传感器的埋设	85
6.5.3	模型锚杆的施作	90
6.5.4	制作完成的分岔隧洞三维试验模型	92
6.6	分岔隧洞模型开挖与测试	92
6.6.1	模型加载	92
6.6.2	模型开挖	93
6.6.3	模型测试	96
6.7	模型试验结果分析	99
6.7.1	模型Ⅰ试验结果分析	99
6.7.2	模型Ⅱ试验结果分析	107
6.7.3	分岔隧洞承载安全度的数值计算	130
6.7.4	光纤光栅应变传感器测试结果分析	131
6.7.5	洞周锚杆受力分析	132
6.8	模型试验与数值模拟的对比分析研究	132
6.8.1	计算条件	132
6.8.2	连拱段至大拱段数值计算结果分析	134
6.8.3	小间距段至连拱段数值计算结果分析	137

6.8.4	模型试验、数值计算与现场监测结果的相互对比	145
6.9	研究结论	146
第7章	深部巷道围岩分区破裂与锚固三维地质力学模型试验与分析研究 ...	148
7.1	引言	148
7.2	预留洞室轴向压缩破坏模型试验研究	151
7.2.1	模型制作	151
7.2.2	模型加载	152
7.2.3	试验结果分析	153
7.3	深部巷道围岩分区破裂三维地质力学模型试验研究	155
7.3.1	分区破裂现象的现场观测	155
7.3.2	模型相似材料	166
7.3.3	高压加载结构模型试验系统	168
7.3.4	模型加工制作	169
7.3.5	模型开挖与测试	175
7.3.6	模型试验结果分析	179
7.3.7	分区破裂地质力学模型试验结论	185
7.4	分区破裂机理的理论分析研究	185
7.4.1	围岩应力场分析	186
7.4.2	围岩应变场分析	187
7.4.3	分区破裂过程的能量分析	188
7.4.4	模型分区破裂现象的理论解释	191
7.5	分区破裂岩锚支护三维地质力学模型试验研究	194
7.5.1	引言	194
7.5.2	分区破裂岩锚支护地质力学模型试验	195
7.5.3	锚杆对分区破裂加固作用的理论分析	204
7.6	研究结论	206
第8章	地下厂房洞室群围岩稳定与支护三维地质力学模型试验与分析研究	208
8.1	模型试验的工程背景	208
8.1.1	工程概况	208
8.1.2	厂区地应力测试结果	209

8.1.3 厂区围岩分类和地下洞群设计方案	209
8.2 厂区初始地应力场的反演	210
8.3 带滑动墙的自平衡式三维加载模型试验台架装置的研制	214
8.4 模型相似材料	215
8.4.1 模型相似材料的配比	215
8.4.2 模型锚杆和锚索的模拟	216
8.5 模型加载、制作与开挖测试技术	217
8.5.1 模型加载方案	217
8.5.2 试验模型的制作	217
8.5.3 模型量测技术	221
8.5.4 模型超载与开挖支护	223
8.6 模型试验结果及与数值计算的对比分析	226
8.6.1 数值计算模型与计算结果	226
8.6.2 模型试验与数值计算的对比	231
第9章 深部层状盐岩地下储气库运营稳定三维地质力学模型试验研究	236
9.1 引言	236
9.2 模型试验概况	237
9.3 盐岩储气库介质模型相似材料	240
9.4 储气库三维地质力学模型试验系统	241
9.5 储气库三维试验模型的制作工艺和方法	244
9.6 储气库三维地质力学模型试验测试结果分析	250
9.6.1 储气库单洞模型试验结果分析	250
9.6.2 储气库群模型试验结果分析	256
9.7 模型试验研究结论	261
参考文献	263

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

19 世纪是桥的世纪, 20 世纪是高层建筑的世纪, 21 世纪是人类开发利用地下空间的世纪, 随着我国国民经济的快速发展, 许多在建和即将新建的大型地下工程不断走向深部。无论是矿产开采的地下巷道、还是水电开发的地下洞室以及交通建设的地下隧道等都逐渐向逾千米或数千米的深部方向发展。

在深部资源开采方面, 近年来, 随着国家对资源需求的日益增加, 资源开采强度不断加大, 浅部资源逐渐减少, 矿山开采不断向深部发展^[1,2]。根据目前资源开采状况, 我国煤矿开采深度以每年 8~12m 的速度增加, 近年, 已有一批煤矿进入深部开采, 如淮南丁集煤矿、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、北京门头沟矿等皆已开采延伸到了地下近 1000m 的深度。据不完全统计, 国外开采超千米深的金属矿山有 80 余座, 其中最多为南非, 南非绝大多数金矿的开采深度在 1000m 以下。另外, 俄罗斯、加拿大、美国、澳大利亚的一些有色金属矿山采深亦超过 1000m。

在交通建设方面, 目前世界上埋深最深的隧道是连接法、意的勃朗峰公路隧道, 全长 11.6km, 最大埋深 2480m; 目前已建成的西康铁路秦岭隧道全长 18.46km, 最大埋深 1600m; 秦岭终南山特长公路隧道穿越秦岭山脉的终南山, 隧道全长 18.004km, 最大埋深为 1640m。

在水电资源开发方面^[3,4], 埋深最大的法国谢拉水电站引水隧洞最大埋深 2619m; 我国在建中的雅砻江锦屏二级水电站四条深埋引水隧洞平均长度 16.67km, 最大埋深达到了 2525m; 规划中的南水北调西线工程有多条长 50~130km 的深部引水隧洞, 最大埋深达 1100m。

此外, 核废料的深层地质处理深度已达数百米乃至上千米; 油气能源储存工程已深达一千多米; 核心防护工程如北美防空司令部深达 700m 等。

随着地下工程开挖深度的不断增加, 深部地下洞室围岩的地质赋存环境将变得越来越复杂, 在高地应力、高渗透压、高地温及开挖扰动条件下(简称“三高—扰动”), 洞室围岩将出现显著的非线性变形破坏。如分区破裂现象就是深部岩体工程开挖时所发生的特有的破坏现象之一, 该现象的表现特征就是在深部岩体中开挖洞室或者巷道时, 在其两侧和工作面前的围岩中会产生破裂区和未破裂区

逐次交替的分区破裂现象^[5~14]，其中破裂区是裂缝相对密集的区域，非破裂区是裂缝相对稀疏的区域，破裂区形状大致和巷道轮廓相似。

为保障深部地下工程的施工开挖与运营安全，亟须对深部地下洞室围岩稳定与支护控制进行深入研究。由于地下工程自身岩体结构和地质赋存环境的复杂性，传统的理论解析方法难以处理地下洞室这些复杂的非线性变形破坏问题。同时，鉴于数值分析方法在处理岩体破坏问题时自身具有的局限性，迄今为止，数值方法在模拟地下工程的强度破坏方面仍难以取得突破性的进展。反观地质力学模型试验，以其形象、直观、真实的特性成为研究地下工程非线性变形与强度破坏的重要手段。因此，近几十年来，地质力学模型试验在水电、交通、能源和矿山工程等领域的地下工程中发挥了越来越重要的作用。地质力学模型试验是根据一定的相似原理对特定工程地质问题进行缩尺研究的一种物理模拟方法。地质力学模型是真实物理实体的再现，在基本满足相似原理的条件下，能够比较真实地反映地质构造和工程结构的空間关系，能够比较准确地模拟岩土施工过程和把握岩土介质的力学变形特性。地质力学模型试验能较好地模拟复杂工程的施工过程以及荷载的作用方式及时间效应等，能够比较真实地反映工程的受力全过程，从弹性到塑性，一直到破坏。尤其重要的是它可以比较全面真实地模拟复杂的地质构造，发现一些新的力学现象和规律，为建立新的理论和数学模型提供依据。因此，地质力学模型试验不仅可以研究工程的正常受力状态，还可以研究工程的极限荷载及破坏形态，并能对数值计算结果进行验证和补充。正是由于地质力学模型试验技术具有上述独特的优越性，因此被国内外岩土工程界广泛重视和应用^[15~20]。

1.2 地质力学模型试验的研究现状

早在 1936 年，格恩库兹涅佐夫就提出了相似模拟方法。从 20 世纪初，西欧一些国家就开始进行结构模型试验，并逐渐建立了相似理论，以 Fumagalli^[21]为首的专家在意大利结构模型试验所开创了工程地质力学模型试验技术，试验研究范围从弹性到塑性直至最终破坏阶段。随后，葡萄牙、前苏联、法国、德国、英国和日本等国也开展了这方面的研究。1979 年，在意大利 Bergamo 举行的国际岩石力学大会上，Müller、Fumagalli 和 Barton 等国际知名学者发表了各自在岩石物理模拟试验方面的成果^[22~24]；Kulatilake 等^[25]开展了节理岩体在单轴压缩下的物理模型试验研究；Khosrow^[26]开展了在爆破荷载作用下的节理岩体的物理模型试验研究；Liu 和 Feng^[27]通过物理模型试验对三峡大坝坝基的稳定性进行了评估；Li 等^[28]对四川金沙江流域溪洛渡水电站地下洞室群进行了高仿真的三维地质力学模型试验研究；Castro 等^[29]对矿井的分块崩塌开采进行了大型三

维物理模型试验研究; Jong^[30]和 Meguid^[31]分别对复杂条件下的隧道开挖进行了物理模型试验研究。

在国内,清华大学、武汉大学、四川大学、山东大学、河海大学、中国矿业大学、西南交通大学、长江科学院、总参工程兵科研三所等单位,先后对国内许多大型水电、交通、能源和采矿地下工程进行了地质力学模型试验,并取得了大量研究成果。

在模型相似材料的研究方面,韩伯鲤等^[32]以铁粉、重晶石粉、红丹粉为骨料,以松香酒精溶液为胶结剂,氯丁胶为附加剂,研制出 MIB 和 MSB 地质力学模型相似材料;马芳平等^[33]以磁铁矿精矿粉、河砂、石膏或水泥、拌和用水及添加剂为原料,研制出 NIOS 地质力学模型材料,并成功应用于溪洛渡水电站地下洞群三维地质力学模型试验中;张杰等^[34]采用低熔点固体石蜡作为胶结剂,研制了非亲水性的固-液耦合相似材料;李树忱等^[35]用砂和滑石粉作为骨料,石蜡作为胶结剂,研制了 PSTO 固流耦合相似材料;徐文胜等^[36]采用标准砂、水泥、石膏、减水剂和缓凝剂为原料,研制了岩爆相似材料;何显松等^[37]采用重晶石粉、机油和可溶性高分子材料及多种添加剂,并配合温控系统研制出了变温相似材料;张强勇等通过大量材料配比和力学参数试验研制出具有力学参数变化范围广、性能稳定、价格低廉且无毒无害的铁晶砂胶结岩土相似材料^[38]以及盐岩地下储气库介质的流变相似材料^[39,40]。

在模型试验系统的开发研究方面,李仲奎等^[41]研制了离散化多主应力面加载及监控系统,试验系统由高压气囊、反推力板、限位千斤顶、垂直立柱、封闭式钢结构环梁、支撑钢架和空气压缩机组成,试验架尺寸较大,实现了按主应力方向进行加载;陈霞龄等^[42]研制了平面应变模型试验装置,装置由中部固定框架和前后两个井格式约束钢架组成,约束钢架可以沿纵向平移,并能绕其水平中轴旋转,当模型在处于水平位置的约束架上拼装好之后,把约束架转动竖立起来自动形成自重应力场;陈安敏等^[43,44]研制了岩土工程多功能模拟试验装置,装置由承载框架、加载单元、纵控梁、竖向支撑、旋转机构、斜拉杆、减摩板等部分组成,可以进行平面地质力学模型试验、抗剪强度试验、抗弯强度试验,通用性较强;朱维申等^[45]研制了带滑动墙的自平衡三维加载模型试验装置,装置主要由三维钢结构台架装置和液压加载控制系统组成,实现了模型的侧向梯级非均匀加载;孙晓明等^[46]研制了真三轴软岩非线性力学试验系统,试验系统由主机、液压控制系统和数据采集系统三大部分组成,能进行三轴拉压、拉剪等多种组合试验和不同加卸荷过程的模拟,系统最大压力为 450kN,最大拉力为 75kN,试件最大尺寸为 150mm×150mm×150mm;姜耀东等^[47]研制新型真三轴巷道模型试验台,试验台采用 6 个液压枕进行加载,能够较好地实现真三轴巷道模型试验,并且具有整体刚度好、柔性加载、受载均匀、伺服稳定的特点;蒋树屏

等^[48]研制了公路隧道结构与围岩综合试验系统,系统基于“先加载、后挖洞”的原理,采用液压千斤顶在模型试件外部加载以模拟上覆岩土层自重应力,用内置千斤顶模拟开挖体应力响应变化;张强勇等^[49~54]研制了尺寸可调、组装灵活方便的组合式地质力学模型试验台架装置以及可实施三维梯度非均匀加载的结构模型试验装置;采用数控技术研制了具有数字化、可视化和智能化的高地应力真三维加载地质力学模型试验系统(包括数控液压加载与稳压控制系统、数控气压加载与稳压控制系统)以及能自动采集模型内部任意部位位移且具有高精度的模型位移数据自动采集系统。

1.3 本书主要研究内容

本书主要是作者主持承担完成的国家 973 课题(2009CB724607)、国家自然科学基金面上项目(40772173、41172268)、山东省自然科学基金项目(Y2007F52)、交通部西部交通建设科技项目的主要研究成果的体现。内容包括近些年在地下工程地质力学模型试验研究领域取得的新方法、新技术以及这些新方法和新技术在实际地下工程模型试验中的应用。在模型试验材料开发方面,研制了力学参数变化范围广、性能稳定、价格低廉且无毒无害的铁晶砂胶结新型岩土相似材料以及具有显著流变特性的盐岩地下储气库介质流变相似材料;在模型试验装置开发方面,研制了尺寸可调、组装灵活方便的组合式地质力学模型试验台架装置以及可实施非均匀加载的三维梯度非均匀加载结构模型试验装置;在模型试验加载系统开发方面,采用数控技术研制了具有数字化、可视化和智能化的高地应力真三维加载地质力学模型试验系统(包括数控液压加载与稳压控制系统、数控气压加载与稳压控制系统);在模型试验测试系统方面,研制了能自动采集模型内部任意部位位移且具有高精度的模型位移数据自动采集系统;在大体积地质模型的制作方面,研制了模型内埋洞室的成腔装置,提出了高效快捷的模型分层压实风干制作与切槽埋设测试传感器的方法。上述地质力学模型试验的新方法和新技术已获得 10 余项国家发明专利,并在国内外学术期刊上公开发表。同时这些新方法和新技术也在国家大型水电、交通、采矿和能源地下工程的地质力学试验中得到成功应用,模型试验研究成果解决了工程设计和施工中的许多关键性技术问题,产生了显著的经济效益与社会效益。