



華夏英才基金學術文庫

李天斌 孟陆波 王兰生 著

高地应力隧道稳定性及 岩爆、大变形灾害防治



科学出版社



华夏英才基金学术文库

高地应力隧道稳定性及岩爆、 大变形灾害防治

李天斌 孟陆波 王兰生 著

国家自然科学基金项目(编号:41230635, 41172079, 40772176)



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对我国西部深埋隧道地形起伏大、地质环境条件复杂、地应力高等特点,结合多个重大工程实践,全面阐述高地应力条件下山岭隧道信息化施工、围岩及支护稳定性评价,以及岩爆、大变形灾害防治的理论与方法。主要内容包括高地应力隧道信息化施工基本理论和方法、隧道地应力场与高地应力评价、隧道施工阶段围岩分级、隧道综合超前地质预报、围岩位移量测及参数反演分析、隧道围岩稳定性分析与评价、隧道支护结构力学行为及安全性,以及岩爆和大变形的发育特征、类型和分级、形成机制与模式、预测预报、处治技术。全书共 16 章。

本书可供隧道与地下工程、地质工程、岩土工程领域的科技人员、工程师和管理者参考使用,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治/李天斌,孟陆波,王兰生著. —北京:科学出版社,2016.1

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-047054-6

I. ①高… II. ①李… ②孟… ③王… III. ①地应力-隧道-稳定性-研究 ②地应力-隧道-岩爆-灾害防治 ③地应力-隧道-变形-灾害防治 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 013461 号

责任编辑:牛宇锋 陈姣姣 / 责任校对:桂伟利

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:39 3/4 插页:16

字数:913 000

定价:258.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

在改革开放的大好形势下,随着我国资源开发和基础设施建设的不断发展,隧道和地下工程建设进入了大发展时代。我国山脉众多,地形地质条件复杂,重大工程中需要建设的深埋长大隧道越来越多,目前长度超过 10km、埋深大于 1000m 的隧道已司空见惯。尤其在西部地区,隧道工程穿越的地质体多经历过强烈的构造改造和浅表生改造,其地质结构复杂,地应力高,隧道建设中发生与高地应力密切相关的岩爆和大变形灾害日益增多。这些地质灾害严重影响工程建设,其机理、预测和防治问题复杂,引起了隧道和地下工程界以及相关学者的高度重视。

几十年来,在岩石隧道和地下工程建设中,新奥法以其理论原则的明晰和技术方法的实用而得到世界各国专家的青睐,被广泛采用。我国隧道与地下工程的设计施工也是在新奥法基础上应用和发展起来的,并在大量工程实践中积累了丰富的经验,发展了相应的理论,取得了新的进展。

同时,工程实践也表明,新奥法仍然存在其局限性,尚难以有效地克服挑战性地质问题所带来的困难。高地应力条件下的硬岩岩爆和软岩大变形就是一大难题。因此,复杂地质条件下的设计理论、施工技术和信息化水平有待大幅度提高,方可达到现代隧道与地下工程科学技术方法体系的新高度。

从 20 世纪 90 年代开始,成都理工大学隧道与地下工程灾害研究团队在王兰生教授的指导下,从二郎山隧道开始从事高地应力隧道及其地质灾害防治方面的研究。21 世纪以来,该团队在李天斌教授的带领下继续在高地应力隧道信息化施工、围岩稳定性评价以及岩爆和大变形灾害防治领域进行了不懈的探索。他们在国家自然科学基金项目、国家重点工程科技攻关项目、四川省杰出青年基金项目、教育部重点科技项目和交通部西部交通建设科技项目等多个相关课题研究的基础上,选择“高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治”这一热点问题作为持续攻关方向,历经十余年,在大量扎实的野外工作和室内研究基础上,系统地总结了高地应力隧道围岩稳定性评价及岩爆、大变形灾害防治的理论和方法,撰写成该专著。

该书全面阐述高地应力条件下山岭隧道信息化施工、围岩与支护稳定性评价以及岩爆、大变形灾害防治的理论与方法,有多方面的新观点、新见解和新成果。例如,将施工地质跟踪调查与测试、围岩动态分级、高地应力量测与判识、超前地质预报等纳入高地应力隧道信息化施工,拓展了隧道信息化施工的范畴;研发了围岩洞壁应力和变形量测的新方法,即改进型门塞式应力恢复测试法和套管式钻孔多点引伸计;深入研究了隧道施工阶段围岩定性与定量分级的指标与方案,建立了围岩快速分级的智能方法,研发了相应的软件系统,同时,修正传统的 BQ 围岩分级方法,建立了高地应力条件下隧道围岩分级的 BQ-hg 法;提出了“以地质分析为核心,综合物探分析,洞内外结合,长短预测结合,物性参数互补”的综合预报原则,建立了较完善的隧道综合超前地质预报的工作体系和综合预报

模型;通过典型实例的研究,构建了复杂条件下隧道施工阶段围岩稳定性和支护结构力学行为分析与评价的综合集成方法体系;基于岩体浅表生改造理论、卸荷变形破裂理论和软岩力学理论,揭示岩爆和大变形的力学机制,建立了岩爆机制的6种地质力学模式和围岩大变形的7种力学模式,以及岩爆、大变形的分类和分级体系;提出了岩爆和大变形综合集成预测的学术思路,并建立了相应的综合集成方法体系;从爆破方式、预防措施和治理措施三大方面确定了各级岩爆的防治方案和措施,提出了锚-注-顶一体化的各级大变形防治方案及支护参数,等等。上述理论、方法和技术先后在我国公路、铁路和水电部门的30余座隧道工程中得到实践和应用,表明其具有紧密结合重大工程的特点和良好的推广应用前景。

相信该书的付梓问世,将对高地应力隧道围岩稳定性评价及岩爆、大变形灾害防治的科学和技术水平的提高,以及现代隧道和地下工程方法体系的发展,具有深远的学术影响和重要的工程意义。同时,可以预期该书将使广大读者,尤其是青年学者们备受教益。为此,我乐于为序。

中国工程院院士

王思敬

2015年12月于北京

前 言

21 世纪是隧道与地下工程大发展的世纪。我国经过改革开放 30 多年的大发展后,目前正在进一步加强交通基础设施建设,正在规划和建设的城市地铁工程、高速铁路和高速公路网、矿山开发和水电工程,以及正在论证的跨越渤海海峡、琼州海峡、台湾海峡的海底隧道工程等,将使我国的隧道与地下工程在 21 世纪步入世界前列,成为地下工程建设的大国和强国。

众所周知,隧道和地下工程是建设在地壳浅表部地质体(或岩土体)中的构筑物,地质体既是隧道和地下工程建设的环境,又是它们重要的组成部分。然而,与一般建筑材料不同的是,地质体是经历过漫长地质历史演变的岩土体,它不仅经历过成岩建造,而且遭受过构造改造和浅表生改造,因而具有不连续、非均质,以及储有地应力、地下水、地温等复杂特征。在具有地质历史演变特征的岩土体中建设地下工程,围岩的物理和力学行为在很大程度上影响着隧道和地下工程建设的成本和成败。因此,查明隧道和地下工程的岩土工程条件,合理评价围岩稳定性与风险类型和等级,采用适应岩土体力学行为的开挖、支护方法进行设计和施工,是隧道和地下工程建设中必须遵循的基本原则。但是,由于地质体的复杂性以及受勘察和设计理论、技术、方法、手段的限制,目前,隧道工程建设中还不可能在施工前彻底查明工程区岩土体的地质条件,获取符合现场情况的设计参数,正确评价隧道建设风险。因此,隧道工程设计是一种预设计,施工阶段必须采用信息化施工,进一步实时掌握掌子面及其前方的地质信息和围岩的支护信息,尽最大可能正确预测和评价施工地质灾害,为动态设计提供可靠依据。

虽然我国隧道工程建设采用新奥法及其相关的信息化施工已经多年,但是,信息化施工的范畴、内容以及理论与技术方法还不够成熟,主要表现在超前地质预报技术水平较低、围岩动态分级方法可操作性差、监控信息的准确获取与反馈分析以及应用水平落后等方面。尤其是适应我国西部地区高地应力隧道信息化施工以及与其密切相关的岩爆、大变形灾害防治的理论和技術方法存在较多缺陷和不足,至今鲜见与此相关的著作专门系统论述高地应力隧道稳定性与地质灾害防治。而我国西部深埋长大隧道越来越多,长度超过 10km、埋深逾越千米、地应力高达 50MPa 以上的隧道建设所遇到的信息化施工和工程灾害防治问题,已经对传统的理论和技術方法提出了严峻挑战。

从 20 世纪 90 年代末(1998 年)开始,作者及其带领的研究团队便在高地应力隧道信息化施工、围岩稳定性评价以及岩爆和大变形灾害防治领域进行了不懈地探索。在十余年的研究实践中,作者先后承担了国家自然科学基金项目、国家重点工程科技攻关项目、四川省杰出青年基金项目、教育部重点科技项目、交通部西部交通建设科技项目以及重大工程建设项目等 30 余项相关科研课题。在此基础上,作者结合地质灾害防治与地质环境

保护国家重点实验室代表性成果的总结,从2009年开始萌生对已有科研成果的提炼,期望写出一部具有高地应力隧道建设特色的著作,为西部交通隧道建设尽绵薄之力。2010年初稿完成后,通过征求专家意见,并结合当时正在开展的科研课题的成果,2010~2011年对书稿进行了必要的补充和完善。2012年四川省科技厅组织专家对书稿进行了评审,依据专家意见,作者在近两年时间内进一步对书稿进行了修改和提炼,并对岩爆和大变形机理进一步开展了深入探讨。在迎来2014年金秋之际,《高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治》历经多次修改终于完稿。这本专著记载着作者及其研究团队近十余年从事隧道工程围岩稳定性及其灾害防治领域研究的主要历程和成果,是研究团队集体智慧的结晶。希望本书能够增加读者在山岭隧道建设信息化施工和减灾防灾方面的知识,使读者加深对复杂地质环境中地下工程信息化施工与工程地质灾害防治的理解,以便合理解决高地应力隧道建设中遇到的重大技术难题。

本书由绪论和三篇构成,共16章。绪论主要阐述研究背景和意义、国内外研究现状以及本书的主要成果。第一篇是隧道信息化施工与围岩及支护结构稳定性,共有七章,主要论述高地应力隧道信息化施工的理论和方法;结合重大隧道工程地应力的测试和分析,讨论隧道地应力场分布、高地应力判别以及围岩二次应力研究的技术方法;介绍隧道施工阶段围岩定性和定量分级方案、高地应力隧道围岩分级的BQ-hg法,探讨人工神经网络、模糊逻辑推理、支持向量机等智能判别方法在围岩分级中的应用;探索TSP、地质雷达、瞬变电磁法、Beam法等几种超前物探方法对隧道不良地质的响应特征,建立一套完善的以地质分析为核心的综合预报方法体系;通过典型隧道工程实例,介绍围岩位移量测及参数反演分析的应用,采用块体理论、数值模拟和监控量测等理论和方法,从“综合集成”的理念对围岩稳定性进行评价和预测;通过隧道初期支护结构受力特征监测、隧道施工过程动态数值模拟和荷载结构法计算支护结构受力特征,综合分析隧道初期支护结构的力学行为,评价支护结构安全性,并确定最佳支护参数。第二篇是隧道岩爆灾害及其防治,共有四章,主要结合作者在雅砻江锦屏二级水电站隧洞和二郎山公路隧道等工程中的科研实践,阐述岩爆的基本特征、岩爆烈度分级方法、岩爆形成机理与地质力学模式、岩爆预测理论和方法以及岩爆综合防治技术。第三篇是隧道大变形灾害及其防治,共有四章,通过国内外围岩大变形典型实例的介绍和详细分析,提出大变形的分类和分级体系,阐述大变形形成的力学机理与模式、大变形预测预报方法以及大变形防治的支护技术。

本书汇聚了多个科研项目的成果,感谢国家自然科学基金委员会、教育部、交通运输部、四川省科技厅、四川省交通运输厅以及相关重大工程项目业主等单位的项目支持。项目研究过程中,作者的同事和研究生做出了不同程度的贡献,需要感谢的有徐进教授、李永林教授级高级工程师、姜云教授级高级工程师、牟力教授级高级工程师、石豫川副教授、陈国庆副教授,研究生王睿、孙建国、谢勇谋、肖学沛、郑建国、王湘锋、朱劲、梁志勇、牛文林、江勇顺、段铮、王希宝、李春林、张志龙、赵宇、任洋、丁尧、陈超等。本书撰写和评审过程中,得到刘宝珩院士、黄润秋教授、冯夏庭教授、唐春安教授、李术才教授、唐辉明教授、

何川教授等的关心和支持,本书的出版得到华夏英才基金和国家自然科学基金的资助,在此一并致谢!

需要指出的是,本书的学术观点和成果不一定完全得到同行和专家的认可,有些方面可能不妥,甚至存在疏漏之处,希望读者不吝赐教,及时将意见和建议反馈给作者。近年来,作者正在带领团队进一步开展多场耦合作用下的岩爆、大变形机理与预测研究以及围岩非对称变形破坏与非对称支护技术研究。这些成果将在本书再版中得到体现。

李天斌

2015年10月于成都

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 隧道信息化施工研究现状	4
1.3 围岩与支护结构稳定性研究现状	6
1.4 围岩岩爆防治研究现状	11
1.4.1 岩爆烈度分级	11
1.4.2 岩爆形成机理	12
1.4.3 岩爆预测与预报	13
1.4.4 岩爆防治	16
1.5 围岩大变形防治研究现状	17
1.5.1 大变形机制	17
1.5.2 大变形预测	18
1.5.3 大变形支护	21
1.6 本书研究内容与主要成果	22
参考文献	25

第一篇 隧道信息化施工与围岩及支护结构稳定性

第 2 章 信息化施工基本理论与方法概论	37
2.1 新奥法基本原理与内容	37
2.1.1 新奥法基本原理	37
2.1.2 新奥法主要内容	38
2.2 信息化施工概念模型	38
2.3 施工地质跟踪调查与测试方法	39
2.3.1 施工地质跟踪编录与测试	40
2.3.2 反馈应用	40
2.4 地应力测试与分析方法	41
2.4.1 水压致裂测试法	41
2.4.2 应力解除测试法	42
2.4.3 Kaiser 效应测试法	42
2.4.4 地应力场的反演分析方法	43
2.4.5 高地应力的判别方法	43

2.5 围岩动态分级方法	45
2.5.1 现状与问题	45
2.5.2 施工阶段围岩分级法	47
2.6 超前地质预报技术与方法	47
2.6.1 地质调查与分析法	48
2.6.2 地球物理探测法	49
2.6.3 直接探测法	52
2.6.4 综合分析法	53
2.7 监控量测方法	54
2.7.1 监控量测的目的和任务	54
2.7.2 监控量测项目及测点埋设	54
2.7.3 监测数据整理	56
2.7.4 监测数据分析与反馈应用	58
参考文献	61
第3章 隧道地应力场与高地应力研究	63
3.1 地应力测试及分析	63
3.1.1 水压致裂法测试及分析	63
3.1.2 钻孔应力解除法测试及分析	72
3.1.3 声发射 Kaiser 效应测试及分析	80
3.1.4 α 杯测试及分析	84
3.2 隧道区域构造应力场反演分析	84
3.2.1 计算模型	85
3.2.2 模拟结果及验证	87
3.2.3 区域地应力特征	89
3.3 隧道地应力场形成演化数值模拟分析	90
3.3.1 计算模型	90
3.3.2 模拟结果及验证	91
3.3.3 地应力场形成演化过程及变化规律	92
3.4 围岩高地应力分析与判别	93
3.4.1 工程地质定性分析	93
3.4.2 现场地应力测试定量判别	94
3.4.3 应力场有限元模拟定量判别	94
3.5 围岩二次应力测试方法与二次应力场特征研究	95
3.5.1 围岩二次应力测试的 W(改进)型门塞式应力恢复法	95
3.5.2 围岩二次应力沿洞轴线方向分布特征	100
3.5.3 围岩二次应力场的断面分布特征	101
3.5.4 围岩二次应力与主要影响因素的相关性	104
参考文献	106

第4章 施工阶段隧道围岩分级方法及应用研究	107
4.1 概述	107
4.2 施工阶段围岩定性分级	108
4.2.1 围岩定性分级指标选取	108
4.2.2 围岩定性分级指标的快速获取方法	108
4.2.3 泥巴山隧道施工阶段围岩定性分级方法	112
4.3 施工阶段围岩定量分级	114
4.3.1 围岩定量分级指标选取	114
4.3.2 围岩定量分级指标的快速获取方法	115
4.3.3 围岩定量分级的BQ法	131
4.4 高地应力隧道围岩分级BQ-hg法及应用	135
4.4.1 高地应力隧道围岩分级的BQ-hg法	135
4.4.2 高地应力隧道围岩分级BQ-hg法应用	137
4.5 施工阶段围岩智能分级方法及应用	143
4.5.1 人工神经网络法	143
4.5.2 模糊逻辑推理法	149
4.5.3 支持向量机法	154
4.6 围岩分级智能判别软件系统开发与应用	157
4.6.1 系统设计	157
4.6.2 软件开发	158
4.6.3 软件应用	160
参考文献	161
第5章 隧道综合超前地质预报方法研究	162
5.1 概述	162
5.2 超前物探不良地质响应特征研究	162
5.2.1 TSP对不良地质响应特征	162
5.2.2 地质雷达对不良地质响应特征	169
5.2.3 瞬变电磁法对不良地质响应特征	188
5.2.4 BEAM法不良地质响应特征	203
5.3 隧道不良地质综合超前地质预报方法及应用	211
5.3.1 地质分析为主的综合预报体系	211
5.3.2 不良地质综合预报模型	214
5.3.3 综合预报方法在铜锣山隧道中的应用	222
5.4 隧道超前地质预报软件开发及应用	228
5.4.1 软件设计及功能	228
5.4.2 软件开发	230
5.4.3 应用案例	232
参考文献	235

第6章 围岩位移量测及参数反演分析	236
6.1 围岩位移量测方法	236
6.1.1 壁面位移量测	236
6.1.2 多点位移计量测	236
6.2 围岩收敛、拱顶下沉分析与稳定性判别.....	237
6.2.1 鹧鸪山隧道量测分析	237
6.2.2 二郎山隧道量测分析	244
6.3 围岩内部位移分析与松动圈确定	254
6.3.1 鹧鸪山隧道量测分析	254
6.3.2 二郎山隧道量测分析	258
6.4 围岩岩体力学参数反演分析	260
6.4.1 位移反分析理论简介	260
6.4.2 典型工程反演分析	262
参考文献.....	271
第7章 隧道围岩稳定性分析与评价	272
7.1 围岩变形破坏特征	272
7.2 围岩稳定性的块体理论分析	276
7.2.1 块体稳定分析理论简介	276
7.2.2 块体稳定性分析及评价	277
7.3 围岩稳定性的数值模拟分析	279
7.3.1 围岩稳定性的三维有限元分析	279
7.3.2 围岩稳定性的动态跟踪分析	284
7.3.3 岩体质量对围岩稳定性的影响分析	288
7.4 围岩稳定性的监测信息反馈评价	292
7.4.1 位移监测信息反馈评价	292
7.4.2 支护结构监测信息反馈评价	293
7.5 围岩稳定性综合评价及反馈应用	296
参考文献.....	298
第8章 隧道支护结构力学行为及安全性研究	299
8.1 隧道支护结构受力特征现场监测	299
8.1.1 V级围岩段典型断面监测(LK22+100)	299
8.1.2 IV级围岩段典型断面监测(LK23+605)	305
8.2 隧道支护结构力学行为数值模拟	309
8.2.1 地质与计算模型概述	309
8.2.2 进口浅埋段施工过程数值模拟	310
8.2.3 V级围岩段施工过程数值模拟	316
8.2.4 IV级围岩段施工过程数值模拟	321
8.2.5 出口偏压段施工过程数值模拟	326

8.2.6 小结	333
8.3 隧道支护结构受力计算	334
8.3.1 荷载结构法计算模型	334
8.3.2 进口浅埋段支护结构计算	337
8.3.3 V级围岩段支护结构计算	339
8.3.4 IV级围岩段支护结构计算	341
8.3.5 出口偏压段支护结构计算	343
8.4 隧道支护结构力学行为综合研究	346
8.4.1 龙溪隧道支护结构变形破坏特征分析	346
8.4.2 龙溪隧道支护结构力学行为综合分析	349
8.4.3 龙溪隧道初期支护结构安全性评价	354
8.4.4 龙溪隧道初期支护参数优化	356
参考文献	357

第二篇 隧道岩爆灾害及其防治

第9章 岩爆发育特征与烈度分级研究	361
9.1 二郎山隧道岩爆发育特征实录	361
9.2 锦屏二级水电站隧洞岩爆实录	364
9.3 其他典型工程岩爆实录	378
9.4 岩爆发育特征及规律	380
9.4.1 岩爆发育特征	380
9.4.2 岩爆基本规律	382
9.5 岩爆烈度分级问题	388
9.5.1 岩爆烈度分级	389
9.5.2 岩爆分级烈度方案对比	391
参考文献	392
第10章 岩爆形成机制及其地质力学模式研究	393
10.1 岩爆形成条件及影响因素分析	393
10.2 岩爆形成机制的岩石力学试验研究	394
10.2.1 单轴压缩下岩石破坏后区破坏型式的试验研究	394
10.2.2 岩爆倾向性指数测试研究	398
10.2.3 岩石变形破裂机制的卸荷三轴试验研究	402
10.3 岩爆岩石断口形貌及显微结构研究	408
10.3.1 岩爆岩石断口电镜扫描分析	408
10.3.2 岩爆岩石X射线粉晶衍射成分分析	415
10.3.3 岩爆岩石显微结构分析	417
10.3.4 岩爆机制的微观分析	419
10.4 岩爆现象的物理模拟	419

10.4.1 岩爆岩石物理模拟	420
10.4.2 相似材料物理模拟	423
10.5 岩爆机制的力学分析	430
10.5.1 卸荷作用	430
10.5.2 岩爆发生过程	431
10.5.3 岩爆力学机制分析	432
10.6 岩爆机制的地质力学模式	435
参考文献	438
第 11 章 岩爆预测研究	440
11.1 地质综合分析与预测	440
11.2 应力强度比分析与岩爆预测	443
11.2.1 最大切向应力分析计算	443
11.2.2 应力强度比预测	448
11.3 强度应力比预测	450
11.4 层次分析-模糊数学综合评判预测	451
11.4.1 AHP-FUZZY 综合岩爆预测模型	452
11.4.2 工程应用	457
11.5 神经网络综合分析与预测	460
11.5.1 BP 神经网络岩爆预测模型	460
11.5.2 工程应用	462
11.6 基于统计损伤力学的概率预测	462
11.6.1 基于统计损伤力学的岩爆概率预测模型	462
11.6.2 分析验证	464
11.7 岩爆的洞室效应及预测	465
11.7.1 岩爆尺寸效应典型现象	465
11.7.2 岩爆尺寸效应分析预测	467
11.7.3 岩爆洞室形态和尺寸效应探讨	470
11.8 岩爆综合集成预测	473
11.8.1 综合集成预测概念模型	473
11.8.2 岩爆综合集成预测	474
11.8.3 预测结果验证	475
参考文献	477
第 12 章 岩爆防治措施研究	478
12.1 岩爆防治原则与常用措施	478
12.1.1 岩爆防治原则	478
12.1.2 改善围岩受力状态及物理力学性质	479
12.1.3 释放和解除应力	479
12.1.4 调整施工作业	480

12.1.5 加固围岩措施	480
12.2 改变爆破方式在岩爆防治中的作用	482
12.2.1 炮眼布置	482
12.2.2 周边眼控制爆破	483
12.3 岩爆防治措施作用机理模拟	484
12.3.1 不同喷层厚度加固方案模拟分析	484
12.3.2 不同锚杆间距加固方案模拟分析	488
12.3.3 不同锚杆长度加固方案模拟分析	490
12.3.4 锚杆和喷层同时加固方案模拟分析	493
12.4 岩爆防治方案	494
参考文献	498

第三篇 隧道大变形灾害及其防治

第 13 章 隧道围岩大变形实例分析	501
13.1 概述	501
13.2 软岩类围岩大变形典型实例分析	504
13.2.1 鹧鸪山隧道围岩大变形	505
13.2.2 龙溪隧道围岩大变形	510
13.2.3 国内外软岩类大变形实例对比分析	518
13.2.4 小结	520
13.3 结构型围岩大变形典型实例	521
13.3.1 构造改造型围岩大变形	521
13.3.2 浅表生改造型围岩大变形	525
13.4 人工采掘扰动型围岩大变形典型实例	527
13.4.1 铁山隧道围岩大变形	527
13.4.2 麻子山隧道实例对比分析	529
13.4.3 小结	531
参考文献	531
第 14 章 隧道围岩大变形机制与类型研究	532
14.1 围岩大变形的定义	532
14.2 围岩大变形的类型研究	533
14.2.1 围岩岩性控制型(Ⅰ类)	533
14.2.2 岩体结构控制型(Ⅱ类)	535
14.2.3 人工采掘扰动控制型(Ⅲ类)	535
14.3 围岩大变形的力学机制	536
14.4 典型隧道围岩大变形机制剖析	539
14.4.1 围岩大变形与地应力的相关性分析	539
14.4.2 围岩大变形与软岩膨胀性的相关性分析	540

14.4.3 围岩大变形与岩体结构的相关性分析	542
14.4.4 围岩大变形与地下水软化的相关性分析	543
14.4.5 隧道围岩大变形机制确定	543
14.5 围岩大变形的分级研究	544
14.5.1 隧道围岩大变形一般分级	544
14.5.2 典型隧道围岩大变形分级	546
参考文献	546
第 15 章 围岩大变形预测预报研究	548
15.1 大变形预测的基本问题	548
15.2 地质综合分析与预测	549
15.3 修正应力强度比预测	553
15.3.1 修正应力强度比法	553
15.3.2 工程应用	555
15.4 模糊层次综合评判预测	557
15.4.1 大变形模糊层次综合预测模型	557
15.4.2 工程应用	560
15.5 监控量测趋势分析与预测	563
15.5.1 监控量测趋势分析法	563
15.5.2 应用案例	564
15.6 大变形综合分析预测	566
15.6.1 大变形综合预测实施方案	566
15.6.2 未开挖段大变形超前预测	568
15.6.3 已开挖段围岩大变形预测	570
参考文献	572
第 16 章 隧道围岩大变形支护研究	573
16.1 围岩大变形的支护原则和方法	573
16.1.1 “围岩-支护”共同作用的力学原理	573
16.1.2 围岩大变形支护原则	576
16.1.3 围岩大变形设计思路	578
16.1.4 围岩大变形支护方法	578
16.2 围岩大变形与支护结构相互作用的数值模拟研究	580
16.2.1 计算模型	580
16.2.2 无支护计算结果	581
16.2.3 锚杆支护计算结果	582
16.2.4 喷混凝土支护计算结果	584
16.2.5 钢拱架及钢筋混凝土仰拱支护计算结果	585
16.2.6 联合支护计算结果	585
16.2.7 超前管棚支护计算结果	587

16.2.8 基于相互作用分析的典型隧道大变形整治方案	589
16.3 隧道围岩大变形支护优化设计	593
16.3.1 应力场对围岩变形和稳定性的影响	593
16.3.2 支护结构参数对围岩变形和稳定性的影响	596
16.3.3 基于相互作用分析的隧道大变形支护优化设计	601
16.4 典型大变形的信息化设计与施工过程	611
16.4.1 预设计概况	611
16.4.2 施工中变更设计概况	611
16.4.3 监控量测及大变形机制分析	612
16.4.4 临时支护措施及效果	613
16.4.5 理论计算及整治措施	614
16.5 隧道大变形防治方案建议	615
参考文献	616