



“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧



编委会主任 钱七虎



上海科学技术出版社

吴德兴 汪波 孙钧 王勇 钦亚洲 著

新型锚杆支护技术与工程实践

“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧

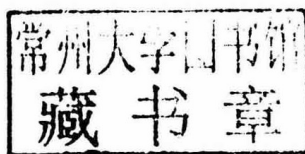


复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书

新型锚杆支护技术与工程实践

吴德兴 汪 波 孙 钧 王 勇 钦亚洲

著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

新型锚杆支护技术与工程实践 / 吴德兴等著. —上海: 上海科学技术出版社, 2020.1

(复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4608 - 7

I. ①新… II. ①吴… III. ①地下工程—锚杆支护—研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 216168 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

新型锚杆支护技术与工程实践

吴德兴 汪波 孙钧 王勇 钦亚洲 著

上海世纪出版(集团)有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21.5

字数 400 千字

2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4608 - 7 / TV · 9

定价: 150.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书以预应力锚杆(索)、让压锚杆(索)及多重防腐锚杆等新型岩石锚杆的研发及应用现状为基础,通过对当前我国地下工程中面临的如岩爆、大变形及腐蚀等各类复杂工程问题的支护现状及发展趋势分析,系统阐释了地下工程中以上述几种新型锚杆为核心构件的相关支护理论与成套工艺技术。全书共分为8章:第1章总结分析了我国地下工程的现状、发展趋势、面临的新问题及支护理念的发展变化,并对预应力、让压及防腐锚杆的研发与应用现状进行了详细的归纳总结;第2章通过对地下工程建设中将长期面临的高地应力(岩爆、大变形)与腐蚀环境(结构耐久性)两类地层支护现状的分析,阐述了当前支护现状的不足,指出了新型支护理念的应用推广与配套新型锚杆研发的迫切性;第3章从产品的构成与分类、性能测试、施工配套工艺等方面对几种新型锚杆进行了详细介绍;第4~8章结合不同工程案例,对几种新型锚杆的工艺试验与工程应用情况进行了详细介绍。

本书以几类新型锚杆为纽带,深入浅出地阐述了地下工程中新型锚固支护理论、技术研发与工程应用实践,可为国内外地下工程建设提供参考借鉴,也可供从事地下工程相关研究、设计、施工和管理人员及高校相关专业师生参考学习。

重大工程建设关键技术研究

总主编

孙 钧 同济大学教授,中国科学院院士

学术顾问

邱大洪 大连理工大学教授,中国科学院院士

钱七虎 中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士

郑皆连 广西大学教授,中国工程院院士

陈政清 湖南大学教授,中国工程院院士

吴志强 同济大学教授,中国工程院院士

王 平 西南交通大学教授

刘斯宏 河海大学教授

杨东援 同济大学教授

复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书

编委会

主 任

钱七虎

委 员(以姓氏笔画为序)

王守慧 石振明 石新栋 朱雁飞

刘 浩 孙 钧 李术才 李利平

李晓军 杨志豪 吴惠明 吴德兴

陈 健 周文波 洪开荣 姚占虎

黄宏伟 曹文宏 曹国侯 龚 剑

蒋树屏 解东升

总 序

近年来,我国各项基础设施建设的发展如火如荼,“一带一路”建设持续推进,许多重大工程项目如雨后春笋般蓬勃兴建,诸如三峡工程、青藏铁路、南水北调、三纵四横高铁网、港珠澳大桥、上海中心大厦,以及由我国援建的雅万高铁、中老铁路、中泰铁路、瓜达尔港、比雷埃夫斯港,等等,不一而足。毋庸置疑,我国已成为世界上建设重大工程最多的国家之一。这些重大工程项目就其建设规模、技术难度和资金投入等而言,不仅在国内,即使在全球范围也都位居前茅,甚至名列世界第一。在这些工程的建设过程中涌现的一系列重大关键性技术难题,通过分析探索创新,很多都得到了很好的优化和解决,有的甚至在原来的理论、技术基础上创造出了新的技术手段和方法,申请了大量的技术专利。例如,632 m 的上海中心大厦,作为世界最高的绿色建筑,其建设在超高层设计、绿色施工、施工监理、建筑信息化模型(BIM)技术等多方面取得了多项科研成果,申请到 8 项发明专利、授权 12 项实用新型技术。仅在结构工程方面,就应用到了超深基坑支护技术、超高泵送混凝土技术、复杂钢结构安装技术以及结构裂缝控制技术等诸多创新性的技术革新成果,有的达到了世界水平。这些优化、突破和创新,对我国工程技术人员将是非常宝贵的参考和借鉴。

在 2016 年 3 月初召开的全国人大全体会议期间,很多代表谈到,极大量的技术创新与发展是“十三五”时期我国宏观经济实现战略性调整的一项关键性驱动因素,是实现国



家总体布局下全面发展的根本支撑和关键动力。

同时,在新一轮科技革命的机遇面前,也只有关键核心技术上一个个地进行创新突破,才能实现社会生产力的全面跃升,使我国的科研成果和工程技术掌控两者的水平和能力尽早、尽快地全面进入发达国家行列,从而在国际上不断提升技术竞争力,而国力将更加强大!当前,许多工程技术创新得到了广泛的认可,但在创新成果的推广应用中还存在不少问题。在重大工程建设领域,关键工程技术难题在实践中得到突破和解决后,需要把新的理论或方法进一步梳理总结,再一次地广泛应用于生产实践,反过来又将再次推动技术的更进一步的创新和发展,是为技术的可持续发展之巨大推动力。将创新成果进行系统总结,出版一套有分量的技术专著是最有成效的一个方面。这也是出版“重大工程建设关键技术研究”丛书的意义之所在。以推广学术上的创新为主要目标,“重大工程建设关键技术研究”丛书主要具有以下几方面的特色:

1. 聚焦重大工程和关键项目。目前,我国基础设施建设在各个领域蓬勃开展,各类工程项目不断上马,从项目体量和技术难度的角度,我们选择了若干重大工程和关键项目,以此为基础,总结其中的专业理论和专业技术使之编纂成书。由于各类工程涉及领域和专业门类众多,专业学科之间又有相互交叉和融合,难以单用某个专业来设定系列丛书,所以仍然以工程大类为基本主线,初步拟定了隧道与地下工程、桥梁工程、铁道工程、公路工程、超高层与大型公共建筑、水利工程、港口工程、城市规划与建筑共八个领域撰写成系列丛书,基本涵盖了我国工程建设的主要领域,以期为未来的重大工程建设提供专业技术参考指导。由于涉及领域和专业多,技术相互之间既有相通之处,也存在各自间的不同,在交叉技术领域又根据具体情况做了处理,以避免内容上的重复和脱节。

2. 突出共性技术和创新成果,侧重应用技术理论化。系列丛书围绕近年来重大工程中出现的一系列关键技术难题,以项目取得的创新成果和技术突破为基础,有针对性地梳理各个系列中的共性、关键或有重大推广价值的技术经验和科研成果,从技术方法和工程实践经验的角度进行深入、系统而又详尽的分析和阐述,为同类难题的解决和技术的提高提供切实的理论依据和应用参考。在“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”(钱七虎院士任编委会主任)中,对当前隧道与地下工程施工建设中出现的关键问题进行了系统阐述并形成相应的专业技术理论体系,包括深长隧道重大突涌水灾害预测预警与风险控制、盾构工程遇地层软硬不均与极软地层的处理、类矩形盾构法、水下盾构隧道、地面出入式盾构法隧道、特长公路隧道、隧道地质三维探测、盾构隧道病

害快速检测、隧道及地下工程数字化、软岩大变形隧道新型锚固材料等,使得关键问题在研究中得到了不同程度的解决和在后续工程中的有效实施。

3. 注重工程实用价值。系列丛书涉及的技术成果要求在国内已多次采用,实践证明是可靠的、有效的,有的还获得了技术专利。系列丛书强调以理论为引领,以应用为重点,以案例为说明,所有技术成果均要求以工程项目为背景,以生产实践为依托,使丛书既富有学术内涵,又具有重要的工程应用价值。如“长大桥梁建养关键技术丛书”(郑皆连院士任编委会主任、陈政清院士任副主任),围绕特大跨度悬索桥、跨海长大桥梁、多塔斜拉桥、特大跨径钢管混凝土拱桥、大跨度人行桥、大比例变宽度空间索面悬索桥等重大桥梁工程,聚焦长大桥梁的设计创新理论、施工创新技术、建设难点的技术突破、桥梁结构健康监测与状态评估、运营期维修养护等,主要内容包括大型钢管混凝土结构真空辅助灌注技术、大比例变宽度空间索面悬索桥体系、新型电涡流阻尼减振技术、长大桥梁的缆索吊装和斜拉扣挂施工、超大型深水基础超高组合桥塔、变形智能监测、基于 BIM 的建养一体化等。这些技术的提出以重大工程建设项目为依托,包括合江长江一桥、合江长江二桥、巫山长江大桥、桂广铁路南盘江大桥、张家界大峡谷桥、西堍门大桥、嘉绍大桥、港珠澳大桥、虎门二桥等,书中对涉及具体工程案例的相关内容进行了详尽分析,具有很好的应用参考价值。

4. 聚焦热点,关注风险分析、防灾减灾、健康检测、工程数字化等近年来出现的新兴分支学科。在绿色、可持续发展原则指导下,近年来基础建设领域的技术创新在节能减排、低碳环保、绿色土木、风险分析、防灾减灾、健康检测(远程无线视频监控)、工程使用全寿命周期内的安全与经济、可靠性和耐久性、施工技术组织与管理、数字化等方面均有较多成果和实例说明,系列丛书在这些方面也都有一定体现,以求尽可能地发挥丛书对推动重大工程建设的长期、绿色、可持续发展的作用。

5. 设立开放式框架。由于上述的一些特性,使系列丛书各分册的进展快慢不一,所以采用了开放式框架,并在后续系列丛书各分册的设定上,采用灵活的分阶段付梓出版的方式。

6. 主编作者具备一流学术水平,从而为丛书内容的学术质量打下了坚实的基础。各个系列丛书的主编均是该领域的学术权威,在该领域具有重要的学术地位和影响力。如陈政清教授,中国工程院院士,“985”工程首席科学家,桥梁结构与风工程专家;郑皆连教授,中国工程院院士,桥梁设计施工专家;钱七虎教授,中国工程院院士,防护与地



下工程专家；吴志强教授，中国工程院院士，城市规划与建设专家；等等。而参与写作的主要作者都是活跃在我国基础设施建设科研、教育和工程的一线人员，承担过重大工程建设项目或国家级重大科研项目，他们主要来自中铁隧道局集团有限公司、中交隧道工程局有限公司、中铁十四局集团有限公司、中交第一公路工程局有限公司、青岛地铁集团有限公司、上海城建集团、中交公路规划设计院有限公司、陆军研究院工程设计研究所、招商局重庆交通科研设计院有限公司、天津城建集团有限公司、浙江省交通规划设计研究院、江苏交通科学研究院有限公司、同济大学、河海大学、西南交通大学、湖南大学、山东大学等。各位专家在承担繁重的工程建设和科研教学任务之余，奉献了自己的智慧、学识和汗水，为我国的工程技术进步做出了贡献，在此谨代表丛书总编委对各位的辛劳表示衷心的感谢和敬意。

当前，不仅国内的各项基础建设事业方兴未艾，在“一带一路”倡议下，我国在海外的重大工程项目建设也正蓬勃发展，对高水平工程科技的需求日益迫切。相信系列丛书的出版能为我国重大工程建设的开展和创新科技的进步提供一定的助力。

孫 鈞

2017年12月，于上海

孙钧先生，同济大学一级荣誉教授，中国科学院资深院士，岩土力学与工程国内外知名专家。“重大工程建设关键技术研究”系列丛书总主编。

序

进入 21 世纪以来,随着经济的持续发展、综合国力的不断提升及高新技术的不断应用,我国隧道及地下工程得到了前所未有的迅速发展。我国已成为世界上隧道及地下工程规模最大、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、修建技术发展速度最快的国家。同时,随着城市地铁建设力度的不断加大,跨江越海隧道工程数量不断增加,国家的重点建设项目如长距离供水、水下交通、西气东输等工程都将涉及穿越江河的问题,铁路、公路、市政、供水、供气、防洪、水电等隧道工程的建设都使隧道的数量大幅度增多。

在隧道建设技术方面,高速铁路隧道技术体系已基本形成;艰险山区复杂地质条件长大隧道建造技术不断取得进步;大断面软弱围岩隧道建造技术取得了很大进展;城市大跨浅埋隧道、越江跨河水下隧道的建造技术都已取得突破;隧道掘进机研发与制造取得了很大进步,这些都标志着我国隧道建设技术达到了一个新的发展水平。尤其是我国幅员辽阔,地质条件复杂,极端复杂的地质条件是制约隧道安全、高效建设的主要因素,是公认的隧道建设难点。依托一大批重难点工程,如青藏铁路关角隧道、兰渝铁路西秦岭隧道、港珠澳大桥沉管隧道、大瑞铁路高黎贡山隧道、武汉三阳路长江隧道等的相继贯通,我国在隧道及地下工程尤其是复杂地质与环境条件下的隧道工程建设方面,取得了很大成就和较多创新成果。为此,针对地形与地貌类型复杂、地质构造复杂、岩土体工程地质不良等复杂地质条件,以重难



点工程的突破创新成果为基础,丛书编委会与上海科学技术出版社共同策划了本丛书。

丛书从地质探测、预警与风险控制、设计、施工、数字化应用等角度,系统梳理了山岭、水下、软硬不均地层等复杂地质与环境条件下隧道的建设关键技术,以学术专著的形式,介绍了近年来在复杂地质隧道建设过程中形成的创新成果和核心技术。丛书中涉及和介绍的创新成果与技术在国内属于领先水平,有的已形成具有自主知识产权的核心技术,且均已在重大工程中得到了应用,使得丛书具有前沿性、原创性、创新性、引领性的特点。例如,洪开荣的《软硬不均与极软地层盾构处理技术》,从理论上、技术上、工程案例上阐述软硬不均地层与水下隧道极软地层的盾构处理技术,代表了软硬不均地层隧道及地下工程的最新理论与实践;曹国侯、刘浩的《隧道地质三维探测技术》,依托作者主持的科研项目“国防工程地质预测及质量无损检测系统”,并结合团队多年的研究和应用成果,全面介绍了隧道复杂地质地球物理探测的新理论、新方法与新技术;李术才的《隧道突涌水监测方法与预警技术》,依托国家重大科研仪器设备研制专项“用于掘进机施工的隧道不良地质定量超前预报综合地球物理探测仪器”、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“隧道突水突泥机理与灾害控制”等重大科研项目,介绍了在复杂地质隧道突水突泥灾害源超前预报技术及其在大型隧道工程中的应用;等等。丛书中涉及的工程应用案例还包括四川成兰铁路跃龙门隧道、济南黄河隧道工程、鄂西高速齐岳山隧道、青岛胶州湾隧道、南京长江隧道、武汉地铁8号线过江隧道等一批重难点工程。

在国家大力推进“一带一路”建设、实施创新驱动发展战略、建设交通强国的战略背景下,希望丛书的出版不仅能够更好地总结上述技术成果、推动创新技术的推广应用,更希望能在基础理论研究和共性关键技术的突破方面起到促进作用,在技术创新模式的培育、专业人才的培养方面能够起到积极的作用。丛书在研讨策划、组织、编写和审稿的过程中得到了相关大型企业、高校、研究机构和学会、协会的大力支持,许多专家在百忙之中给丛书提出了很多非常好的建议和想法,在此一并表示感谢。

2018年8月

钱七虎先生,中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士。“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”编委会主任。

前 言

锚固技术作为土木工程中最常见的支护手段,在水利水电、交通、铁路、矿山等工程领域的岩土、地下工程中有着广泛的应用。锚杆(索)作为岩体锚固中的重要支护构件,从出现的那一刻起,就伴随着岩体力学、岩土工程地质学和材料科学等学科的发展在不断地改进、革新。

随着工程界对岩体力学认知的不断深入,以锚杆(索)为主体的锚固支护技术经历了以砂浆锚杆为核心构件的被动支护形式、以预应力锚杆为主体的主动支护形式,以及以摩擦型锚杆为主体的横向主动、纵向被动支护的混合型支护形式等,其类别繁多,不一而足。上述支护形式的演变过程实际上也是各种新型锚杆不断涌现和进步发展的过程,这极大地推动了锚固手段不断的技术演化,其前景喜人。

近年来,随着地下工程向深山、水下、城市的进一步发展,埋深大、隧道长、修建难度大是目前及今后较长时期内隧道建设普遍面临的问题。在以新奥法为核心理念的喷锚支护体系中,岩石锚杆(索)的需求量日益激增,巨大的市场份额带来锚杆行业快速发展的同时,工程建设中面临的诸如岩爆、软岩大变形、抗震和结构腐蚀等难题也对新型锚固支护技术的研发提出了全新的挑战。

过去 20 年里,新型锚杆支护技术的发展,为大量地下工程及所遇到的上述各种复杂工程问题提供了解决方案,尤其在断面大、地质条件相对复杂且服务运营周期长(一般都在 50 年以上,通常要求 100 年或以上)的交通、水电等隧道及地下工程中,各种新型锚杆支护技术已发挥了极大的技术支撑作用。



为此,结合当前新型锚杆的研发和应用情况,针对未来地下工程建设中面临的各类灾害问题而编写一本新型锚杆的技术专著是很有必要的。

本书以多种新型锚杆为基础,结合研发过程中取得的相关科研成果及工程应用情况,综合当前我国地下工程中面临的各类复杂工程问题及支护体系的发展趋势,系统阐述了预应力锚杆(索)、让压锚杆(索)、多重防腐锚杆的支护理论与成套支护技术,内容涵盖新型锚杆及其支护机理、产品的构成与分类、性能测试、施工配套工艺、软岩隧道的变形量预测与让压支护体系参数设计,以及涨壳式(预应力)中空注浆锚杆、恒阻大位移让压锚杆、DCP 多重防腐锚杆、可拆卸锚杆等几种新型岩石锚杆技术在国家大型工程中的应用情况。本书有别于现有的相关锚杆专著,内容突出“新、专、实”三个特点:所谓“新”,指的是侧重于新型锚杆,尤其是具有自主知识产权的几种新型锚杆;所谓“专”,指的是专注于新型锚杆的品类与受力特色;所谓“实”,指的是新型锚杆的应用实践。

本书既有较为深入的理论阐述,又有实用性较强的应用技术,旨在为从事该专业的读者提供一本介绍新型锚杆技术及其工程应用的专著,希望本书的出版能够对我国地下工程中锚杆支护技术理念的更新及大面积推广起到积极的推动作用。

本书由孙钧院士制订编写大纲并组建编写组以收集近年来国内外发展成果和工程实践案例,由吴德兴、汪波、孙钧、王勇和钦亚洲等专家分工研写,最后由孙钧和汪波审定成稿。

本书编写过程中得到了杭州图强工程材料有限公司及其所属院士工作站、杭州丰强土建工程设计咨询研究院、西南交通大学、同济大学等单位的大力支持,以上单位的大量研究成果为本书编写提供了丰富的相关数据,特别是杭州图强工程材料有限公司提供了很多新型锚杆技术资料,在此表示衷心的感谢。本书涉及的很多工程应用及试验成果都是与各相关参建单位、科研院所配合或合作完成的,部分室内试验是在西南交通大学及长江水利委员会的室内实验室完成的。徐建强、陈祥荣、高军、吕刚等为第4章和第5章编写提供了部分工程应用资料。特别感谢项小珍、吕志平、王志伟、徐安、施劭矗、刘柯良等为本书编写提供的支持与帮助。本书在编写过程中得到了相关建设单位和施工单位的指导与大力支持,在此一并表示衷心的感谢!

本书编写中参考的主要资料已在参考文献中注明,如有误漏之处敬请见谅。由于作者水平有限,书中难免存在差错、不当,恳请读者们批评指正。

作 者

2019年7月于杭州

目 录

第 1 章	地下工程中锚杆支护技术发展现状	1
1.1	我国地下工程的发展现状、趋势及对新型锚杆支护的需求 / 1	
1.2	锚固技术的基本特点及其作用机理 / 5	
1.2.1	基本特点 / 5	
1.2.2	地下工程中锚杆作用机理 / 7	
1.2.3	边坡工程中锚杆作用机理 / 9	
1.3	新型锚杆在地层支护中的发展 / 10	
1.3.1	锚杆发展历程概述 / 10	
1.3.2	预应力锚杆的研究与开发现状 / 16	
1.3.3	让压锚杆的研究与开发现状 / 18	
1.3.4	防腐锚杆的研究与开发现状 / 22	
1.4	锚杆产品的分类和存在的问题 / 27	
第 2 章	特殊地质与环境条件下地下工程支护技术现状与发展趋势	31
2.1	岩爆 / 31	
2.1.1	岩爆概述 / 31	
2.1.2	岩爆防治措施的研究现状及防岩爆支护技术 / 32	
2.2	软岩大变形 / 42	
2.2.1	国内外典型软岩大变形隧道支护措施 / 43	
2.2.2	大变形地下洞室支护参数特点 / 46	



2.2.3 大变形隧道在强力刚性支护条件下的破坏特征及原因 / 51

2.2.4 分层支护调研及作用机理 / 53

2.2.5 让压支护的基本理念 / 57

2.3 腐蚀地层 / 58

2.3.1 我国水下隧道发展现状及其锚杆腐蚀问题 / 58

2.3.2 腐蚀地层环境条件下隧道支护特点及腐蚀状况 / 60

2.3.3 锚杆腐蚀机理及其防护 / 61

2.3.4 锚杆腐蚀研究存在的若干问题 / 63

2.3.5 防腐锚杆研发的必要性 / 64

第3章 地下工程中新型锚杆的研发及工艺性能 66

3.1 涨壳式(预应力)中空注浆锚杆 / 66

3.1.1 基本原理及构造 / 67

3.1.2 规格与技术参数 / 69

3.1.3 优势特点 / 70

3.1.4 施工工艺 / 72

3.2 恒阻大位移让压锚杆(索) / 77

3.2.1 让压锚杆(索)概述 / 77

3.2.2 工作原理 / 77

3.2.3 新型让压锚杆(索) / 81

3.2.4 力学特性 / 83

3.3 DCP 多重防腐锚杆 / 87

3.3.1 DCP 多重防腐锚杆概述 / 87

3.3.2 DCP 多重防腐锚杆系列产品 / 90

3.3.3 施工工艺 / 91

3.3.4 腐蚀环境下新型多重防腐锚杆的防腐特性及寿命预测 / 94

3.4 其他新型锚杆 / 107

3.4.1 分段式预应力中空注浆锚杆 / 107

3.4.2 预锚式可拆卸锚杆 / 109

第 4 章 涨壳式(预应力)中空注浆锚杆现场工艺试验 113

4.1 在彭水水电站中的工艺试验 / 113

4.1.1 工程概况 / 113

4.1.2 EX 型涨壳式(预应力)中空注浆锚杆工艺试验 / 114

4.2 在乌弄龙水电站中的工艺试验 / 117

4.2.1 工程概况 / 117

4.2.2 涨壳式(预应力)中空注浆锚杆的施工工艺试验 / 118

4.3 郑万高铁隧道机械化施工工艺性能试验 / 125

4.3.1 工程概况 / 125

4.3.2 预应力注浆锚杆机械化施工工艺性能试验 / 127

第 5 章 涨壳式(预应力)中空注浆锚杆的工程应用 138

5.1 锦屏二级水电站工程中的防岩爆应用 / 138

5.1.1 工程概况 / 138

5.1.2 隧洞防岩爆支护设计 / 140

5.1.3 引水隧洞工程试验段岩爆概况及防治方案 / 142

5.1.4 涨壳式(预应力)中空注浆锚杆在岩爆地下洞室中的
防岩爆应用试验 / 144

5.1.5 1#、3# 引水隧洞中的推广应用 / 147

5.1.6 2#、4# 输水洞中的推广应用 / 149

5.1.7 地下厂房洞室拱顶涨壳式(预应力)中空注浆锚杆
数值模拟 / 150

5.2 苍岭隧道中的防岩爆应用 / 156

5.2.1 工程概况 / 156

5.2.2 岩爆特征与影响因素的相关性 / 156

5.2.3 预应力锚杆在岩爆防治中的关键设计参数 / 161