

高海拔高地应力区 水工隧洞及深斜（竖）井施工

侍克斌 郝杰 周峰 崔龙 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高海拔高地应力区 水工隧洞及深斜（竖）井施工

侍克斌 郝杰 周峰 崔龙 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以地处高海拔、高地应力区的新疆布仑口-公格尔水电站地下工程为依托,从围岩质量评价、陡倾层状和块状围岩稳定性分析及岩爆预测等影响围岩稳定的相关问题入手,对其围岩稳定性进行了较为全面系统的分析,并结合工程实际,研究了开挖及衬砌施工工艺。

本书可作为水利、交通、矿山、通源储存等领域设计、施工和教研人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高海拔高地应力区水工隧洞及深斜(竖)井施工 / 侍克斌等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2017.3
ISBN 978-7-5170-5227-2

I. ①高… II. ①侍… III. ①高纬度地区—水工隧洞—工程施工②高地—水工隧洞—工程施工 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第048035号

书 名	高海拔高地应力区水工隧洞及深斜(竖)井施工 GAO HAIBA GAO DIYINGLI QU SHUIGONG SUIDONG JI SHEN XIE (SHU) JING SHIGONG
作 者	侍克斌 郝杰 周峰 崔龙 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 16.5印张 314字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在高海拔高地应力区修建水工引水隧洞及深斜（竖）井，将大幅度提高施工的难度，会遇到人、机缺氧后工作效率降低、岩爆等技术难题，尤其对地址条件复杂的小断面隧洞及深斜（竖）井，当采取人工钻爆法施工时，无论是在开挖，还是在衬砌环节，都会使工艺难度系数进一步增加。

本书针对地处高海拔高地应力区的新疆布仑口-公格尔水电站引水隧洞及深斜（竖）井施工，从围岩质量评价、陡倾层状和块状围岩稳定性分析及岩爆预测等围岩稳定性相关问题入手，试图对围岩稳定性进行全面系统的分析，并结合工程实际，研究其开挖及衬砌工艺，为确保工程顺利施工提供技术支撑，其成果也可作为同类地下工程安全建设与设计的参考依据。

本书研究了以下内容：①针对水工隧洞施工中围岩评价体现出的模糊性和不确定性，在传统可拓评价理论的基础上，对权重和贴近度准则选择方法进行研究；②在对层状岩体的动力失稳机制研究的同时，也对层状围岩弯曲失稳机制进行分析，推导出岩板弯曲长度极限平衡方程和安全系数公式；③根据块体理论假设与实际不符的情况，以三棱锥为例，进一步将关键块体划分为绝对关键块体、相对关键块体和非关键块体，并通过绝对关键块体概率对围岩安全系数进行了修正；④将围岩力学参数的概率分布模型与灰关联理论相结合，研究隧洞围岩力学参数对拱顶变形的敏感程度；⑤应用基于FCM的粗糙集理论对已发生岩爆工程进行分析，求得岩爆评价各指标的权重，再结合云模型理论计算得到最大综合确定度，根据最大综合确定度预测岩爆等级；⑥应用爆破震动基础理论和数值模拟方法分析对比在不同围岩条件下隧洞在爆破荷载作用下的响应，得出在层状围岩条件下质点震动速度、位移、质点加速度的特点和

变化规律，以及爆破震动波在层状围岩隧洞中的衰减规律；⑦研究了深斜（竖）井的钻爆开挖施工技术；⑧通过正交试验，设计和配制了大掺量Ⅱ级粉煤灰高性能混凝土，并研究了适合深斜井混凝土衬砌工程的大掺量Ⅱ级粉煤灰混凝土施工工艺；⑨研究了深斜井混凝土衬砌工程的自密实混凝土配合比、拌和运输方案以及衬砌浇筑工艺。

本书的研究工作得到了新疆维吾尔自治区水利水电工程重点学科建设基金（XJZDXK-2010-02-12）、中国葛洲坝集团股份有限公司科技项目“高海拔、高地应力区深斜竖井施工关键技术研究”（GXJ-2010-03）等的资助。

感谢葛洲坝集团新疆公司布仑口-公格尔水电站项目部、新疆水利水电勘测设计研究院等提供的研究实践平台和大力支持！本书的撰写参阅、调研了此电站及相关工程的大量施工和设计资料，并参考了许多前人的研究文献。感谢新疆农业大学水利与土木工程学院张红忠、董文明副教授、刘思海、王鹏和王国伟同学，他们参与了部分研究和整理了一些资料。

由于作者水平有限，书中难免存在不适和错误之处，敬请读者批评指正。

作者

2016年10月6日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 主要研究内容	11
第 2 章 隧址区域地质概况	13
2.1 发电引水隧洞工程地质条件	13
2.2 发电引水隧洞沿线存在的工程地质问题	16
第 3 章 基于改进可拓物元理论的地下洞室围岩质量评价	18
3.1 概述	18
3.2 影响围岩质量的主要因素	19
3.3 可拓学理论概述	21
3.4 基于改进可拓法的围岩质量评价方法与步骤	25
3.5 工程应用	29
第 4 章 陡倾层状围岩滑坡-弯曲破坏机制及动力稳定性分析	35
4.1 概述	35
4.2 层状岩体隧洞围岩稳定影响因素	35
4.3 陡倾角层状围岩滑坡-弯曲破坏机制研究	38
4.4 陡倾层状围岩动力稳定性分析	45
4.5 工程实例分析	52
第 5 章 块状岩体隧洞围岩稳定性及参数敏感性研究	60
5.1 概述	60
5.2 有限长迹线块体理论在隧洞围岩安全性评价中的应用	60
5.3 基于围岩力学参数概率分布模型的变形敏感性灰关联分析	76
第 6 章 云模型理论在深埋隧洞岩爆灾害预测中的应用	86
6.1 概述	86
6.2 岩爆的定义	87

6.3	岩爆影响因素及预测判据	88
6.4	粗糙集理论简介及权重计算	95
6.5	云模型理论简介	98
6.6	基于 FCM 算法粗糙集理论的云模型岩爆等级评价模型建立	101
6.7	工程实例	106
第 7 章	岩石爆破作用理论	111
7.1	岩石爆破机理	111
7.2	岩石爆破模型的发展过程	111
7.3	岩石本构模型	112
7.4	冲击波作用理论	114
7.5	应力波作用理论	115
第 8 章	数值模拟模型	120
8.1	ANSYS/LS-DYNA 程序算法原理	120
8.2	数值模拟计算模型	124
第 9 章	不同地质条件下的隧洞施工爆破模拟	130
9.1	布仑口-公格尔水利枢纽工程概况	130
9.2	模型的建立	131
9.3	参数的选取	133
9.4	隧洞在不同围岩条件下的数值模拟	133
9.5	模拟结果分析对比	141
第 10 章	高海拔高地应力区深斜井施工导井开挖	143
10.1	开挖施工方案	143
10.2	导井钻孔爆破开挖	145
10.3	导井施工中的技术革新	147
10.4	结语	148
第 11 章	布仑口-公格尔水电站深斜井施工导井的施工测量	149
11.1	水电站引水隧洞工程概况	149
11.2	施工控制测量	150
11.3	导井施工测量	150
11.4	结语	152
第 12 章	高海拔高地应力区深斜井施工导井开挖单价分析	153
12.1	工程施工条件	153
12.2	导井开挖施工	153

12.3	导井施工单价分析	155
12.4	结语	157
第 13 章	高海拔高地应力区深斜井扩挖技术	158
13.1	开挖施工方案及施工方法	158
13.2	自下而上斜井扩挖施工	159
13.3	斜井扩挖施工中技术革新所产生的效果	162
13.4	结语	163
第 14 章	高海拔高地应力区深斜井扩挖施工单价分析	164
14.1	工程概况	164
14.2	斜井扩挖施工	164
14.3	斜井扩挖施工单价分析	166
14.4	结语	169
第 15 章	带狭长型上室的埋藏式调压井开挖施工技术	170
15.1	开挖施工方案	170
15.2	导井钻孔爆破开挖	171
15.3	调压井扩挖施工	173
15.4	结语	174
第 16 章	高海拔区深斜井衬砌施工技术	176
16.1	斜井衬砌施工方案	176
16.2	斜井衬砌施工	177
16.3	斜井段衬砌施工中技术改进	179
16.4	结语	180
第 17 章	大掺量Ⅱ级粉煤灰高性能混凝土的强度试验	181
17.1	影响混凝土抗压强度的因素	181
17.2	试验原材料	181
17.3	试验方案的设计	183
17.4	数据分析	184
17.5	空白组强度对比试验	189
17.6	结论	191
第 18 章	大掺量Ⅱ级粉煤灰泵送混凝土深斜井衬砌施工配合比试验	193
18.1	试验原材料	193
18.2	混凝土配合比设计	195
18.3	试验结果分析	196

18.4 结论	199
第 19 章 大掺量Ⅱ级粉煤灰泵送混凝土深斜井衬砌施工程序及工艺	200
19.1 工程简介	200
19.2 大掺量Ⅱ级粉煤灰泵送混凝土施工程序及工艺研究	200
19.3 结论	205
第 20 章 深斜井衬砌自密实混凝土配合比的设计及调整	207
20.1 自密实混凝土原材料的选择	207
20.2 自密实混凝土配合比的设计方法及试验调整	212
20.3 自密实混凝土施工配合比的调整	219
20.4 小结	221
第 21 章 上斜井自密实混凝土衬砌施工工艺	222
21.1 上斜井采用自密实混凝土衬砌的背景	222
21.2 上斜井自密实混凝土拌和及运输方案	224
21.3 上斜井自密实混凝土衬砌浇筑工艺	227
第 22 章 陡深斜井自密实混凝土与常规混凝土衬砌优势对比分析	232
22.1 自密实混凝土与常规混凝土施工性能的优势对比分析	232
22.2 陡深斜井自密实混凝土与常规混凝土衬砌施工速度的优势对比 分析	233
22.3 陡深斜井自密实混凝土与常规混凝土衬砌施工成本的优势对比 分析	233
参考文献	236

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

21 世纪是地下空间开发的重要时期,截至目前,世界上许多国家已经在各个领域建成 200 多条长度大于 10km 的隧道,典型的工程如 1988 年正式通车运行的日本青函海底隧道、1994 年通车穿越英吉利海峡的英-法海底隧道、2007 年建成的世界最长陆上隧道——瑞士勒其山隧道和 2015 年建成的位于阿尔卑斯山下的哥特哈德隧道等。目前,我国在建和已建成铁路隧道总长超过 14500km,尚有超过 10000km 的隧道正在规划设计阶段。同时,我国蕴藏着丰富的水力水电资源,越来越多的水利水电工程项目已经建成或正在施工,如鲁布革、小浪底、三峡工程、溪洛渡、小湾、糯扎渡、水布垭和向家坝等,这些水利水电工程都包含大量的水工隧洞等地下建筑。伴随着地下工程施工水平的不断提高,越来越多的高坝采用地下发电厂房,统计资料显示,目前已经建成超过 100 座的地下水力发电厂房,其中,20 多座水力发电厂房装机容量超过 100MW。二滩水电站已建地下厂房尺寸为 $280.3\text{m} \times 25.5\text{m} \times 63.9\text{m}$,溪洛渡水电站地下厂房尺寸为 $397\text{m} \times 32.8\text{m} \times 78.2\text{m}$,长江三峡右岸地下发电站厂房尺寸为 $311.3\text{m} \times 32.6\text{m} \times 87.3\text{m}$ 。目前,我国已建或在建的长距离地下水工隧洞主要有长约 11.38km 的引滦入津引水隧洞、4 条单隧洞长约 16.67km 的锦屏二级引水隧洞群、19.3km 的福堂水电站引水隧洞以及长约 85.3km 的辽宁大伙房一期隧洞工程等。作为西部大开发的战略重地,新疆水利地下工程也发展迅速,如已建“引额济克、济乌”工程长约 30km 的引水隧洞、伊犁河南岸干渠 35km 引水隧洞以及克州布仑口-公格尔水电站长 16km 的引水发电隧洞等,目前在建的有精河-艾比湖调水工程 41.8km 长的引水隧洞、西水东引工程 140km 长的水工隧洞和三塘湖调水工程 380km 长的水工隧洞等。调水工程和水电项目开发工程一般都跨流域建设,隧洞几乎都建在高山峡谷之中。南水北调西线工程中,引水隧洞最大埋深达到 1150m,四川锦屏二级水电站最大埋深达 2600m,新疆布仑口-公格尔水电站地下洞室最大埋深达到 1500m 左右。在金属矿开采方面,目前探矿深度将达到 2000~4000m,开采深度也将更深,地采向深部延伸速度达 8~16m/年,深部矿山数量还将增



加,未来10~15年将近600多座有色金属矿山中的2/3将转入深部开采(采深大于1000m)。因此,“多、长、大、深”成为我国地下工程发展的主要特点。

近年来,地下工程显现出许多地质灾害问题,如具有层状岩体结构的围岩出现滑移-弯曲失稳、节理岩体围岩局部或整体径向变形量大以及在坚硬完整岩体中产生的岩爆现象等都与埋深有直接关系,岩体的力学特性随着埋深的增加更具有复杂性。因此,围岩表现出的力学复杂性和对地下空间开发的制约性成为国内外学者共同关注的焦点,无论是对地下洞室的围岩质量等级划分、稳定性分析、力学参数的敏感性分析还是岩爆理论研究及预测,虽然取得了丰硕的研究成果,但是在工程实践中不可避免地存在着许多问题,譬如,围岩质量等级划分往往精确到某一类别,这与实际围岩等级具有模糊性和不确定性相矛盾;层状围岩容易出现滑移-弯曲失稳,而在地震、爆破振动以及施工机械振动等周期性荷载作用下易发生层状岩层的动力失稳;关键块体的研究鲜有将结构面迹线有限长考虑其中,也未涉及关键块体安全系数在结构面迹线有限长基础上的修正;在围岩力学参数敏感性分析中通常假定参数服从均匀分布,而参数服从其他分布的研究较少;现有岩爆预测方法考虑岩爆参数的不确定性和随机性较少,参数权重取值也未与具有丰富参考价值的已发生岩爆工程进行有效联系。本书主要以新疆布仑口-公格尔水电站地下工程为依托,从围岩质量评价、陡倾层状和块状围岩稳定性分析及岩爆预测等围岩稳定性相关问题入手,试图对围岩稳定性进行全面系统的分析,并结合工程实际,研究其开挖及衬砌工艺,这对确保工程顺利进行、有效合理地开发地下空间具有十分重要的意义,其成果可为我国水电、交通、矿山、能源储存等领域地下工程的安全建设与运营提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 围岩质量分类研究

围岩作为地下工程的特殊岩体,不仅具备自然岩体的地质复杂性,而且直接受到人为开挖扰动,进一步增加了结构面、受力状态以及赋存环境等因素的不确定性,为了避免工程地质灾害发生,必须对围岩质量进行科学合理的评价。国内外相关学者很早就对围岩质量分类进行了研究,诞生了许多围岩分类方法(表1.1)。另外,随着计算机技术的不断完善,应用数理统计法、聚类划分法以及模糊数学等理论对岩体质量进行划分成为可能,如模糊数学法、灰色理论法、神经网络法、Fisher判别分析法、概率论分类法和可拓分类法等,

使得围岩稳定性评价更趋于科学合理。对这些分类方法进行研究发现,在对岩体质量进行评价时几乎均考虑了岩石强度、岩体完整性及结构面特性和岩体周围地下水、地应力等环境条件。而这些方法也带有各自的缺点,如模糊数学方法的隶属度权重太过主观和随意;灰色理论无法准确预测数据信息波动大且分散的工程问题;神经网络虽然避免了人为确定权重的不合理性,但是对训练样本数有一定限制;Fisher 判别分析法对工程实例数据要求较高,需要依靠训练样本尽可能有大的容量来满足精度要求;概率论分类法假设各个分类标准相互独立,并且认为各分类标准判定围岩类别的作用等同,这与实际不符;可拓分类法具有隶属度对评价因素的模糊性反映不够充分和权重计算过于单一的缺点。

表 1.1 国内外围岩分类方法汇总表

分类选择的指标		分 类 方 法
单一性指标		普氏坚固系数 f (1925 年)
		法国抗压强度 R_c
		捷克抗拉强度 S_t
单个综合指标		美国学者太沙基提出岩石载荷 H_p 法 (1946 年)
		奥地利学者 Rabcewicz 提出隧洞围岩自稳时间 T (1957 年)
		美国学者 Deer 等提出岩石质量 RQD 法 (1969 年)
		日本学者在《新奥法设计施工指南》中提出的弹性波速 V_p 法 (1983 年)
少量指标并列		奥地利提出应用新奥法对围岩分类
		2005 年中国《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005) 提出的围岩分类法
多指标并列		1984 年中国总参工程兵提出的围岩分类法
		中国《水工隧道设计规范》(SL 279—2002) 提出的围岩分类法
		中国《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001) 提出的围岩分类
多个指标复合	乘积法	中国提出应用质量指标 Q 与稳定性 W 进行铁路隧道围岩分类 (1973 年)
		中国工程兵岩体质量系数 Q
		N. Barton (挪威) 岩体质量 Q 系统 (1974 年)
		Ю.С. Давыдов (苏联) 稳定程度 S (1977 年)
		杨子文 (中国) 岩体质量指数 RMQ (1978 年)
		中国科学院提出岩体质量系数 Z 进行围岩分类 (1979 年)
		关树宝围岩质量指标 Q 和稳定性分级 W (1980 年)
		Palmstrom 提出岩体分类指标 RMI (1996 年)
	和差法	Wickham 提出岩体结构等级 RSR 分类法 (1972 年)
		Bieniawski 提出地质力学 RMR 分类法 (1973 年)



续表

分类选择的指标		分 类 方 法
多个指标 复合	和差法	中国学者王石春提出 RMQ 分类法 (1981 年)
		中国提出水电工程围岩分类
		《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008) 中提出围堰工程地质分类
	综合法	《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2009) 和《工程地质分级标准》(GB/T 50218—2014) 提出围岩分类法
岩体力学介质属性		国家建设委员会人工洞室围岩分类法 (1975 年)
		原水利电力部东北勘察设计院提出的地下洞室围岩分类法 (1981 年)
特殊膨胀岩类		Liviez 提出“一种新的岩石坚固性工程地质分类”方法 (1979 年)

本书以可拓理论为基础,针对其在隶属函数和权重取值方面存在的不足进行改进,试图对围岩质量进行更合理的评价。

1.2.2 层状岩体力学特性与稳定性研究

1.2.2.1 层状岩体的各向异性

岩体的各向异性很早就被岩石力学界所认识,由于层状岩体具有层理结构,在其平行和垂直层理面上的力学性质差别很大,考虑到研究问题过于复杂,提出在不失真的条件下可将层状岩体简化成横观各向同性介质岩体,从而将复杂问题进行合理简化。但是并未间断对岩体各向异性特性的研究。

20 世纪 70 年代, Lekhnitskii 借助广义胡克定律得到各向异性体弹性理论的一般方程。Pinto 以片岩单轴试验为基础证实层状岩体弹性模量具有各向异性。Pinto、Liu 等和 Read 等分别对泥质板岩和片岩进行参数各向异性试验并总结了试验参数的变化规律。Jeage 首次得出单一结构面与岩石强度各向异性的关系,其在岩体力学各向异性方面的研究具有相当高的学术价值。Rarnamurth 通过改变结构面和外力的夹角观察岩体力学特性的变化情况,得出岩体参数具有各向异性特性的结论。Amadei 基于丰富的室内和室外试验资料,归纳出力学参数弹性各向异性的变化规律。Salamon、Wardle 和 Gerrard 立足岩体强度和变形等参数具有各向异性的特征,提出层状岩体等效各向异性体理论框架。Sngh 将等效介质理论应用到层状岩体的变形和参数特性中。Lashkaripou 和 Passaris 建立了岩体变形模量的预测模型,并将模型中涉及的单轴抗压强度看作已知量。

在国外学者不断对岩体各向异性特征进行深入研究的同时,国内许多学者也在此方面进行了科学探索,并取得了丰硕的成果。周大千以砂岩和油页岩试验为基础,对三类各向异性岩石的强度理论进行了深入分析。赵平劳立足各向



异性特征试验,得到层状岩体结构具有各向异性规律的结论。刘殿名借助声学手段来探求岩石的各向异性特征,并对岩石各向异性的影响因素和产生机制进行了讨论。席道英和陈林等基于砂岩变形参数单轴压缩试验,将横观各向同性理论与动态参数进行对比,发现其变化规律近似椭圆形。曹文贵和颜荣贵采用单轴压缩试验的方式对各向异性凝灰岩相关参数进行测试。刘东燕和朱可善采用 Hoek-Brown 准则并结合节理岩体力学效应和层状岩体断裂特征,提出了一种物理力学参数的相关关系。曾纪全和杨宗才以相关岩石模型试验的结构面倾角为突破点,研究层状岩体变形和强度的变化规律。宋建波提出一种能够近似估算层状岩体强度的模型,并用试验进行合理性验证。冒海军等根据单弱面理论分析了一维和三维抗压强度与结构面方位之间的关系。田象燕等立足砂岩和大理岩的单轴压缩试验,得出砂岩和大理岩均具有各向异性特征。

1.2.2.2 层状岩体工程稳定性研究现状

20 世纪以来,由于交通、水电、能源等大规模的建设,涉及大量层状岩体边坡和地下层状岩体洞室的防治与治理工作,为了更准确地建立层状岩体的治理方法,研究者采用多种方法对该类型边坡和地下洞室的稳定性、破坏机制、破坏过程、变形特征以及治理方式等问题进行研究,取得了大量有价值的研究成果。层状岩体边坡方面的有以下研究。

Jose 对层状岩体结构面和折断面参数进行了较为详细的研究,认为参数对剪切强度影响不明显。Bobet 立足 Hoek、Bray 和 Aydan 等的研究成果,考虑渗流对块体倾倒的影响,并对极限平衡方法进行了分析。Duncan 以 G-B 模型为基础,增加水压力以及上覆荷载对岩体的作用,并给出了基本解析式。肖远和王思敬以最大拉应力作为岩体破坏准则,将层状岩体边坡的弯曲失稳问题转化为平面应变问题进行计算。程谦恭等将塑性极限理论应用于层状岩质边坡的稳定性分析中,并推导出滑坡判据表达式。李云鹏等针对顺产边坡产生屈曲失稳的因素较多的问题,提出了一种新的边坡稳定性位移判据。孙红月和尚岳全通过分析总结实际水电站顺层边坡实例,提出对顺层边坡的变形破坏类型进行科学分类。陈志坚等经过对边坡结构深入分析,认为层状岩体边坡存在最不稳定滑动面,并提出了基于能量准则的最不利滑动面定位方法。任光明等以物理模型试验为手段研究了层状岩体边坡滑坡失稳的内在原因,并以能量法为理论基础推导出边坡失稳时的临界坡长。邓荣贵等立足实际设计资料,推导出顺层边坡失稳的理论计算公式。李树森等采用能量守恒原理求出边坡破坏的临界坡长和载荷。刘小丽和周培德依据弹性力学能量法理论,在考虑边坡长度的条件下推导出顺层岩质边坡发生失稳的力学公式。刘钧分析了顺层边坡在竖向和横向力共同作用下发生弯曲失稳的现象。陈祖煜等、汪小刚等将改进的 G-



B法应用于反倾向层状边坡工程的抗倾覆计算中,得到的计算结果与实际相符。

地下工程经常建造在层状岩体中,层状结构的围岩稳定性由于层状岩体力学的各向异性和结构面强度低的特点而变得十分复杂,鉴于此,国内外学者进行了研究。Tonon 和 Amadei 采用边界元法分析了围岩力学参数各向异性对隧道围岩变形的影响。Hoek 利用组合悬臂梁理论,对岩体弯曲折断位置进行了有效的估计。孙广忠将层状岩体破坏的形式分为三种:倾倒变形、溃曲破坏和弯折破坏。蒋臻蔚等立足层状岩体的破坏特征,认为顺层滑移和弯折破坏是岩体破坏的主要形式。苏永华等将薄板理论应用到直立层状岩体稳定性分析中。周应麟和邱喜华在分析层状围岩隧道受力特征的基础上,提出围岩受力特征与岩体产状有直接关系,总结出隧道破坏机理及几种典型失稳模式。姜伟和吴爱国经过研究发现拱腰和拱肩在陡倾状层理隧道中稳定性最差。肖明等通过有限元对研究工程地下厂房稳定性进行分析,为了符合岩体实际情况,将层状岩体力学参数的各向异性特性考虑到模型中,分析结果与实际吻合。

目前,针对在陡倾层状岩体中开挖隧洞的研究较少,而且许多研究仅仅从单一的角度利用数值软件分析实际问题,鲜有借助理论进行研究。

1.2.3 块体理论在实际工程中的应用研究

20 世纪 80 年代初,石根华博士与 Goodman 教授使块体理论在实际工程中的应用由稚嫩走向成熟。在各国学者的不断努力下,该方法在相关领域得到广泛的应用。Chan 在岩石工程选址和方案设计优选中应用了块体理论。Hoerger、Stone 将参数的随机性和不确定性考虑到关键块体中。Kusmual 为了正确估算地下工程在开挖过程中产生的关键块体体积大小,提出将节理间距、数值分析和随机统计法应用到块体大小的计算中。刘锦华、吕祖珩最早向国内引入了块体理论,并结合自己经验对块体理论进行了全面介绍,为使国内学者很快掌握该理论奠定了良好基础。

王思敬等为了方便确定多种形状的块体边界条件、关键块体滑动方式和进行安全性评价,采用矢量分析法进行分析研究。方玉树结合赤平投影法在关键块体稳定性分析中的应用,给出针对不稳定块体如何选择支护方式的理论依据,具有一定的应用价值。张菊明和王思敬认为四面体块体往往由两组结构面相互切割产生,该块体的稳定性与结构面的摩阻力分布有关系。李华晔从理论层面对块体理论进行了详细的分析,认为某些块体滑动失稳很可能具有一定的规模性。徐明毅等认为块体滑动并非单独存在,而是具有一定的块体组合形式,其中一个块体滑动可能引起多个块体的滑动,产生连锁反应,进而造成工程岩体的破坏。邬爱清等在研究三峡工程时对块体理论的工程应用技术进行了



深入研究。其中包括不定位块体分析、定位块体分析、随机块体分析、块体形态分析与显示及不稳定块体锚固方式。

然而块体理论假定结构面贯穿所研究的岩体,得出的关键块体是临界情况,这与结构面(节理、断层等)的有限迹线长度极不相符,使得以往用块体理论确定的关键块体中的一部分将转变成无限块体,实际开挖岩体中的关键块体的数量要大为减少。

目前对有限长结构面的块体理论研究并不多,赵文、王英学、谢全敏等将概率理论应用到块体理论中,对结构面迹线由原来假设的无限长变为有限长,更符合实际情况。张子新和孙钧考虑实际结构面迹线概率分布规律,计算得到块体滑落概率和块体的大小及分布密度。许研等认为关键块体的产生与节理切割密不可分,并将考虑概率理论的节理应用到关键块体分析中,结果部分关键块体由于节理并未贯穿而变为稳定块体。

综合分析国内外学者对块体理论的研究发现,关键块体理论的研究虽然较为成熟,但迄今为止尚未有人将关键块体产生概率与结构面迹线长度和块体锥棱长度相结合进行研究,也并未将关键块体概率考虑到围岩安全系数中,本书试图对关键块体产生的概率进行研究,并对传统安全系数进行修正。

1.2.4 岩爆预测研究

一直以来,岩爆都是深部岩体工程中经常发生的地质灾害,而且岩爆本身产生机制非常复杂,国内外学者虽然对其进行了大量研究,但是仍然没有找到如何有效地避免岩爆以及准确预测岩爆的方法。目前对岩爆的预测理论源于对岩石破坏试验中观察到的微破裂现象的认识。

岩体在开挖扰动以后,应力重新分布过程中会在岩体中积蓄能量,积蓄能量的多少与岩体本身性质有关,当岩体发生破坏的时候,岩体中储存的大部分能量就会以微破裂的形式被释放,岩体内部破裂会伴随有声发射,能量释放的大小与工程结构临近失稳状态有关,因此可以通过能量释放的大小判断或者预测岩体稳定状态。

国内外专家在岩爆预测方面做了许多有益的工作,常用来对岩爆发生情况进行预测的方法包括微重力法、流变法、回弹法、钻筒屈服法、微地震法、光弹模拟技术、岩石冲击倾向性指标预测的钻屑法、刚度法以及区域地质和应力测试的动力区划法等,随着人们对岩爆机制的不断深入研究,越来越多的学者从强度、刚度、稳定、断裂、损伤、突变、分形和能量等方面对岩爆进行分析,提出了各种假设和判据,如王元汉等的岩爆判别准则、徐林生等的施工地质超前预报法和侯发亮的临界深度预测法等。随着人工智能和非线性理论的发展,有限元计算、模糊综合评判、人工神经网络等近现代方法也逐渐应用于岩



爆预测预报工作中。

虽然世界各国学者对岩爆预测的研究做了大量工作,但是岩石本身具有的复杂性和工程地质条件的多样性等决定了岩爆预测研究存在一定难度,对岩爆的预测方法还不完善,如岩爆的预测缺乏将实际工程与已发生岩爆工程进行结合以及岩爆的评价标准的界定和评价因子的权重计算难以体现其模糊性和不确定性等。

1.2.5 层状围岩隧洞施工爆破数值模拟分析

为了保证隧洞在施工中的围岩稳定和地下结构的安全,国内外相关学者长期以来对爆破震动的传播规律和质点震动速度进行了大量深入研究,主要是通过结合爆破震动的现场测试和试验室试验,利用概率统计的方法来研究相关问题。由于爆破震动传播的介质是十分复杂而且具有不确定性,所以目前主要是以质点振动速度或者峰值加速度等作为测试参数来研究爆破震动波的传播和衰减规律。Sharpel 研究了在均匀并且无限大的弹性介质中球形空腔所受爆炸压力的问题。Starfield 研究了孔型边壁上的压力时程特性。加拿大的 R. F. Favrean 弹性波理论模型提出了质点的速度是延迟的时间与距离之间的函数。斯托克斯 (G. G. Stokes) 建立了黏滞性内摩擦能量损耗的波动方程。伽坦逊 (Kjartansson) 的 CQ 理论提出了关于地震波衰减规律的数学表达式。Hustrulid 利用 Starfield Pugiuese 提出用球形单元代替柱状装药,在空间域和时间域上数值计算模拟某点应变,效果比较好。Blai Minchinion 通过借助 Flac 软件,模拟了炮孔的压力函数,并计算了围岩震速的计算公式。丁桦等是利用点源矩和等效孔穴理论,运用侵彻的空腔膨胀理论,研究了爆炸波的传播机制。许多学者还通过利用大型商用 AUTODYN、LS-DYNA、ADINA、ANSYS 等有限元数值模拟软件,进行了施工爆炸过程、岩土爆破破坏过程、震动波传播过程(近场和远场)等一系列规律的研究。

李玉民等在现场实测数据的基础上,总结得到如下结论:地下工程产生的水平振动的主频与建筑物的自振频率十分接近,相比垂向振动更容易引起建筑物的共振。间隔为 100ms 的微差爆破不会产生叠加现象,间隔为 25ms 的微差则会产生波形叠加。王民寿等同时指出:岩体由于构造的差异和岩性各向异性,使得爆破振动的动力响应也同样具有各向异性的特点,即在装药量相同、等测距的条件下测得的实测质点的振动频率和振速是不一样的。

李铮与朱瑞赓等根据岩体强度和隧洞所受静、动之和相平衡条件,结合应力波理论,求得无衬砌隧道在处于弹性状态条件下出现局部崩塌、大面积坍塌以及裂隙时岩土介质质点振动速度,推导出质点振动峰值的临界值计算公式。边克信和林学文与欧阳骥等在论述和分析了地下构筑物受到爆破作用时的