

锚固岩石变形破坏 力学试验与模拟

赵同彬 谭云亮 尹延春 著



科学出版社

锚固岩石变形破坏 力学试验与模拟

赵同彬 谭云亮 尹延春 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

岩土体加固技术的发展与锚固理论研究密切相关,锚固岩土体作为一种复合材料具有复杂的物理力学性质,其工程条件也具有加卸载、流变、扰动等特征。本书以室内试验测试及模拟方法研究为主,侧重岩石及锚固体流变规律研究,从锚固岩石的整体力学效应及锚固结构界面效应分析变形破坏演化过程,揭示岩石工程锚固支护控制围岩稳定性作用机理。

本书可供采矿、岩土、水利、交通、土建等领域从事科研、设计、生产、施工与教学人员参考,也可作为高等院校采矿与岩土等相关专业的本科生和研究生的课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

锚固岩石变形破坏力学试验与模拟/赵同彬,谭云亮,尹延春著. —北京:科学出版社,2016. 1

ISBN 978-7-03-046065-3

I. ①锚… II. ①赵… ②谭… ③尹… III. ①锚固-岩石变形-实验
IV. ①TV223. 3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 249610 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京厚诚则铭印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016 年 1 月第一次印刷 印张:12

字数:231 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

锚固支护技术是一种有效的岩土体加固手段,广泛应用于采矿、岩土、水利、交通及土建等工程中,该技术施工简便灵活,可以适用于多种复杂岩土工程条件,且具有较好的岩土体控制效果,应用范围及领域不断扩展。但在锚固技术显示其优越性的同时,锚固理论方面的研究却略显滞后,现阶段岩石锚固理论的研究仍主要集中在锚固强化工程岩体整体力学性能方面,而对锚固岩石承载受力的应力传递规律方面的研究还有待进一步完善,且随着岩石工程施工深度增加及规模扩大,岩石的流变特性对锚固支护提出了新的挑战,锚固设计必须满足工程岩体的长期稳定性要求。因此,深入研究锚固岩石的流变特性及变形失稳机理,将为深部工程围岩控制及其他岩土工程的合理支护设计提供科学的研究基础。

岩土锚固理论研究源于工程、服务于工程,正因为如此,学者对岩土锚固支护的工程认知非常重要,需要从工程中提出科学问题,进而通过在实验室内开展系统的研究工作来指导工程。就锚固支护体而言,它是由锚杆、黏结材料、岩土体及锚固界面组成,属于一种典型的复合材料或结构体,因此锚固技术及理论的研究,应该包括锚杆性能、锚固岩石整体力学行为及锚固界面局部力学特性三个方面的问题,重点突破锚杆与围岩的相互作用机理。从锚固支护应用的工程环境来看,多数岩石工程在服役期内,锚固岩体必将承受加卸载、流变、扰动等相关环境因素改变带来的力学响应,而以往常规的力学性能测试研究,很难准确反映出锚固支护的工程本质特征。

面对复杂的岩石锚固问题,我们应该遵循科学研究的普遍规律,逐步分阶段地进行技术及理论研究,由简入繁、逐项突破。本书侧重锚固系统流变方面的理论研究,分析了锚杆对岩石变形破坏的控制机制,开发了多种锚固流变本构模型,研究了锚固结构界面应力及变形场演化规律,丰富了传统的锚固支护理论,为锚固支护技术的改进提供了科学依据,具有一定的学术及现场应用价值。本书研究成果特色之一:室内试验研究采用常规加载与流变加载两种方法,重点分析锚固岩石流变规律与控制机理;特色之二:采用加锚岩石、锚固结构两类模型进行研究,关注界面效应对锚固支护体稳定性的影响;特色之三:以 FLAC 数值模拟软件为平台,开发多种新的岩石锚固流变本构模型。

本书涉及采矿与岩土工程领域中锚固支护试验研究及控制机理,共分 8 章:第 1 章为绪论(赵同彬,谭云亮执笔),重点介绍了国内外锚固支护技术及理论的研究现状与关键科学问题;第 2 章为加锚体配制及基本力学特性试验(谭云亮,陈璐执

笔),重点介绍了锚杆对岩石力学性能的强化作用;第3章为加锚体流变力学试验及锚固控制机制分析(赵同彬,刘姗姗执笔),重点介绍了锚固对岩石流变的控制机制;第4章为锚固流变本构模型FLAC软件二次开发(赵同彬,张玉宝执笔),重点介绍了几种锚固流变本构模型的建立及其FLAC二次开发方法;第5章为锚固结构拉拔试验及界面应力分布规律(赵同彬,尹延春执笔),重点介绍了锚固界面应力分布及流变演化规律;第6章为锚固结构推出试验及变形场演化规律(尹延春,赵同彬执笔),重点介绍了锚固结构变形场演化及蠕变规律;第7章为基于进化算法锚固结构滑移预测研究(赵同彬,肖亚勋执笔),重点介绍了锚固系统蠕变滑移模型的开发;第8章为全书总结(尹延春,赵同彬执笔),系统总结了本书所做研究工作的主要结论。

本书得到了国家自然科学基金项目(51004068,51474136)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011NJ014)、矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地基金(山东科技大学)、煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金(安徽理工大学)、山东科技大学领军人才工程基金、山东科技大学学术著作出版基金等支持。

在将本书奉献给广大同仁之际,需要说明的是本书的研究参考了众多专家、学者的成果,尤其是中国科学院武汉岩土力学所、煤炭科学研究总院、山东大学、中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、安徽理工大学、河南理工大学、山东科技大学等单位学者的研究工作,再次深表感谢。还要特别感谢中国矿业大学(北京)姜耀东教授的指导,感谢马洪岭博士、陈云娟博士、张泽博士、于凤海博士、郭伟耀博士、刘长雷硕士、魏平硕士、张明璐硕士、邹建超硕士、程康康硕士等为本书奉献的辛勤劳动。

本书系统总结了作者及研究团队十年期间(2006~2015年)的学术成果,由于作者水平有限,本书不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015年6月于青岛

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 锚固技术发展历程	2
1.2.1 国外锚固技术	2
1.2.2 国内锚固技术	3
1.3 锚固岩体基本力学特性研究现状	4
1.4 锚固界面力学传递机理研究进展	5
1.4.1 界面剪应力均匀分布理论	5
1.4.2 界面剪应力幂函数分布理论	6
1.4.3 界面剪应力“中性点”分布理论	6
1.4.4 界面剪应力 Mindlin 分布理论	7
1.5 锚固支护理论研究关键科学问题	8
1.6 研究内容与研究方法	10
1.6.1 研究内容	10
1.6.2 研究方法	11
第 2 章 加锚体配制及基本力学特性试验	13
2.1 加锚体配制	13
2.1.1 加锚材料选择	13
2.1.2 加锚参数确定	14
2.1.3 试件制作	14
2.2 加锚体基本特性力学试验	16
2.2.1 试验设备	16
2.2.2 加锚体抗拉强度试验	17
2.2.3 加锚体抗压强度试验	20
2.2.4 加锚体抗剪强度试验	22
2.2.5 加锚体抗弯强度试验	25
2.3 锚固岩石力学性能强化机理	30
2.3.1 锚杆对岩石抗拉特性强化作用	30
2.3.2 锚杆对岩石抗压特性强化作用	33

2.3.3	锚杆对岩石抗剪特性强化作用	35
2.3.4	锚杆及钢带对岩石抗弯特性强化作用	38
2.4	锚固岩层稳定性控制机理	44
2.4.1	锚杆阻止岩层离层产生及扩展作用	44
2.4.2	锚杆-钢带组合对岩层增韧作用	49
2.4.3	锚杆对岩层增强作用	51
第3章	加锚体流变力学试验及锚固控制机制分析	53
3.1	高应力软岩工程特性分析	53
3.2	典型软岩蠕变特性试验	55
3.2.1	软岩常规力学性能测试	55
3.2.2	蠕变试验方案	55
3.2.3	红砂岩蠕变试验	56
3.2.4	粉砂岩蠕变试验	60
3.2.5	软岩蠕变特性分析	63
3.2.6	软岩蠕变硬化-损伤机制	63
3.3	加锚体蠕变特性试验	69
3.3.1	加锚体配制	69
3.3.2	加锚体蠕变试验	71
3.3.3	加锚体蠕变特性分析	74
3.4	岩石流变锚固控制机制	75
3.4.1	岩石流变模型	75
3.4.2	加锚体流变控制机制	78
第4章	锚固流变本构模型 FLAC 软件二次开发	87
4.1	FLAC 本构模型二次开发	87
4.1.1	FLAC 有限差分计算原理	87
4.1.2	开发环境	88
4.1.3	编译关键技术问题	89
4.2	黏弹锚固模型 FLAC 二次开发及应用	91
4.2.1	蠕变三维本构模型	91
4.2.2	蠕变差分方程	95
4.2.3	加锚广义开尔文体的程序流程	100
4.2.4	深部围岩的锚固支护模拟研究	100
4.3	黏弹塑锚固模型 FLAC 二次开发及应用	105
4.3.1	黏弹塑锚固模型建立	105
4.3.2	本构模型的差分形式	106

4.3.3	BK-MC 开发流程	108
4.3.4	算例验证	109
4.3.5	深部巷道围岩稳定性模拟研究	109
4.4	损伤流变锚固模型 FLAC 二次开发及应用	114
4.4.1	损伤演化方程	114
4.4.2	非线性 BKS 损伤蠕变模型及其数值模拟实现	115
4.4.3	深部锚固支护巷道破坏模拟研究	116
第 5 章	锚固结构拉拔试验及界面应力分布规律	120
5.1	基于弹性模型锚固段应力理论分析	120
5.1.1	Mindlin 基本解	120
5.1.2	模型条件	121
5.1.3	理论解推导	121
5.1.4	算例分析	123
5.2	锚固结构拉拔试验	124
5.2.1	试验系统研制	124
5.2.2	锚固结构制备	126
5.2.3	试验方案	129
5.2.4	锚固结构破坏类型	130
5.3	界面应力分布规律	132
5.3.1	拉拔试验界面应力计算方法	132
5.3.2	第一界面应力分布规律	133
5.3.3	第二界面应力分布规律	134
5.3.4	单测试界面模型流变试验结果	135
5.3.5	双测试界面模型流变试验结果	136
5.3.6	界面应力轴向传递机理分析	139
5.4	界面应力分布影响因素模拟分析	140
5.4.1	颗粒流简介	140
5.4.2	锚固结构拉拔颗粒流模型建立	143
5.4.3	锚固结构破坏过程	144
5.4.4	锚杆和锚固剂参数对应力分布影响	146
5.4.5	锚杆拉拔速度对应力分布的影响	147
第 6 章	锚固结构推出试验及变形场演化规律	151
6.1	锚固结构数字散斑试验	151
6.1.1	数字散斑相关方法	151
6.1.2	锚固模型制备	153

6.1.3 试验方案	155
6.2 锚固结构变形场演化规律	156
6.2.1 黏弹阶段	157
6.2.2 黏脱阶段	157
6.2.3 失稳阶段	158
6.3 锚固结构变形场蠕变规律	159
6.4 锚固结构推出试验模拟分析	161
6.4.1 锚固结构推出模型颗粒流模拟	161
6.4.2 数值模拟试验结果分析	163
第7章 基于进化算法锚固结构滑移预测研究	165
7.1 遗传规划进化原理	165
7.2 遗传规划模型识别系统开发	167
7.2.1 树状结构表达的程序设计	167
7.2.2 基于 Visual C++ 平台的模型识别系统实现	167
7.3 锚固系统蠕变滑移特征分析	169
7.4 锚固系统蠕变滑移模型识别及预测	170
第8章 全书结论	174
8.1 主要结论	174
8.2 创新点	176
参考文献	177

第 1 章 绪 论

随着煤炭开采深度的逐步增加和水电工程、交通工程的大规模建设,复杂条件下的岩体工程越来越多,这给岩体锚固技术及理论带来了极大的挑战。因此,在当前岩体工程背景条件下,更加全面、深入地研究锚固支护技术及理论对工程的安全稳定性设计具有重要的意义。本章回顾了岩体锚固技术产生、发展的历程,从锚固提高岩体整体物理力学性能及锚固界面应力传递方面,介绍了岩体锚固机理研究的进展情况,并指出了今后深部岩体工程锚固理论研究的关键科学问题。

1.1 引 言

自 1872 年英国北威尔士露天页岩矿首次应用锚杆加固边坡及 1912 年德国谢列兹矿最先在井下巷道采用锚固支护以来,锚固技术至今已有 100 多年的发展历史^[1,2]。锚固技术作为一种优越的岩土体加固技术手段,越来越广泛地应用于各种工程领域,目前不仅广泛应用于世界主要产煤国家,而且也推广应用于冶金、水利水电、交通、军工及建筑等工程之中,且适用范围和使用规模仍在不断地扩大。目前,锚固技术已从初期的单一锚杆、锚索支护形式,发展到了现阶段的锚喷、锚注等联合支护形式,这些技术都具有施工简便、灵活、易于实现机械化、适应性强以及对岩层控制效果好等优点。当锚固技术在工程领域显示其优越性的同时,其潜在的一些问题也暴露出来,由于锚固加固机理的研究滞后于锚固技术的发展,至今尚未形成一个公认的支护理论用于指导实践,加之锚固支护又属于隐蔽性很强的工程,岩层冒落之前征兆不明显,具有突发性,仅在我国煤炭行业就出现了多起锚固支护巷道塌垮事故,给煤矿正常生产和井下人员的安全造成了极大的威胁^[3-7]。这些事故的发生,让我们进一步地认识到锚固支护技术是一个复杂的相互作用系统,现阶段对锚固理论方面的研究还不够深入,还有许多相关的作用原理没有完全清楚。关于锚固支护机理及锚固系统的深入研究分析,仍将是今后采矿界和岩土工程界长期需要重点研究的方向。

多数工程岩体破坏失稳都不是一开始就出现的,开挖后的岩体应力调整和变形需要持续一个较长的时期;即使及时进行锚固支护,围岩位移和破坏范围仍会随时间不断增加,这种流变现象已为大量的现场量测资料所证明^[8-11]。根据岩体所处的应力环境和自身物理力学性质的不同,时间效应对岩土工程长期稳定性的影响差异性也较大。孙钧院士曾经指出^[12],只要岩土介质受力后的应力水平值达到

或超过该岩土材料的流变下限,将产生随时间而增长发展的流变变形,随着应力的增加,流变变形成为岩体工程中不可忽视的问题。当前地下岩石工程不断向深部发展,煤炭及其他矿产资源的井工开采深度也是越来越大,国内的山东新汶孙村煤矿、河北开滦赵各庄煤矿、江苏徐州张小楼煤矿已进入 1000m 水平开采^[13],在今后 10~20 年内,我国将有更多的矿井进入深井开采阶段。何满潮等^[14]、周宏伟等^[15]在分析已有研究成果基础上,将深部开采和浅部开采岩体工程的力学特性主要区别概括为“三高一扰动”(高地应力、高地温、高岩溶水压和采矿扰动)的应力环境。其中,高地应力将使深部岩体的流变特性更加显著,煤矿开采难度大大增加,深井巷道围岩流变问题将是巷道锚固支护控制方面长期面临的一个难题^[16]。只有从岩体流变学的观点和方法出发,才能对支护体与围岩的时效相互作用等工程实际问题作出有说服力的合理解释。

当前,在锚固技术作为巷道支护的主要技术手段的背景下,就锚固岩体流变特性试验以及锚固系统变形失稳机理等方面展开系统研究,将为深井巷道围岩控制及其他岩土工程的合理设计,提供科学的研究基础。可以预计,随着锚固流变理论的深入研究、支护材料和施工配套设备的不断更新、监测技术的进步,锚固支护技术将在采矿工程和岩体工程领域有更加宽广的适用范围。

1.2 锚固技术发展历程

1.2.1 国外锚固技术

锚固支护技术始于国外,英国采矿专家从钉子能钉牢层状木板的启示中,发明了用锚杆控制岩层稳定性的支护技术^[17-23]。锚固技术的最早使用可以追溯到 19 世纪末至 20 世纪初,1872 年英国北威尔士露天页岩矿首次应用锚杆加固边坡,1912 年德国谢列兹矿最先采用锚杆支护井下巷道,1912 年美国 Aberseheslin 的 Friedens 煤矿也开始使用锚杆,1915~1920 年美国金属矿山开始逐步使用锚杆支护技术,1918 年美国西利西安矿山开采中首先使用了钢丝绳锚索支护,1924 年前苏联顿巴斯矿开始应用锚喷支护,1934 年阿尔及利亚的 Cheurfas 大坝的加高工程首次采用了 10000kN 级预应力锚杆为抗倾覆锚固,这是世界上第一例采用预应力锚杆加固坝体,并获得成功的工程实例。此后,其他国家在采矿工程和岩土工程中也开始了锚杆支护的研究与使用,锚固支护得到迅速发展和推广。到目前为止,世界范围内已开发出各种类型锚杆达 600 余种,每年的使用量达 2.5 亿根之多,锚固技术广泛用于地下工程围岩支护,坝体、坝基加固,边坡加固等土木和岩土工程。20 世纪 90 年代以后,国外岩土锚固技术无论在理论研究、技术创新或工程应用方面都取得了飞速发展。

锚固技术产生于矿山,在煤矿的生产实践中不断革新,世界范围内的煤炭行业锚杆支护经历了如下几个典型的发展历程^[24-27]:1945~1950年,机械式锚杆研究与应用;1950~1960年,采矿业广泛采用机械式锚杆,并开始对锚杆支护进行系统研究;1960~1970年,树脂锚杆推出并在矿山中得到应用;1970~1980年,发明管缝式锚杆、胀管式锚杆并应用,研究新的设计方法,长锚索产生;1980~1990年,混合锚头锚杆、组合锚杆、架锚杆、特种锚杆等得到应用,树脂锚固材料得到改进。此外,各种适应特殊开采条件的锚杆形式得到发展,适应软岩巷道大变形要求的等塑性锚杆、可拉伸锚杆、钢股锚杆;以及适应大断面巷道和洞室的桁架锚杆、锚索等。当前,世界范围内对锚杆支护技术研究最为活跃的应属澳大利亚,而美国和澳大利亚锚杆技术发展最为迅速,两国煤矿锚杆支护比重已接近100%,其锚固技术水平居于世界前列。

1.2.2 国内锚固技术

20世纪50年代以后,我国开始了锚固支护技术的研究与应用。1956年在煤矿岩巷中率先试验使用楔缝式锚杆支护巷道,进入60年代以后,除了矿山巷道之外,我国开始在铁道隧道、边坡工程、水库大坝、地下工程等大量地采用锚固技术^[28-33]。

锚固技术引进和应用的初期,主要是在相对完整、物理力学性质较好的岩体中使用,并获得了非常理想的支护效果,但适用工程岩体范围还比较局限。由于我国软弱岩层分布十分广泛,煤矿中的煤巷、半煤岩巷所占比例较大,因此,研究开发有效地控制软岩和采动等大变形巷道的支护控制技术,成为推动国内锚固技术发展的关键所在。原煤炭部从“六五”开始,继“七五”、“八五”均有计划地将软岩巷道支护技术列入煤炭部科技发展规划。

同期出现软岩问题并开展研究的有金川镍矿为代表的冶金系统,以葛洲坝软弱类岩层研究为代表的水利水电系统等。国内的水利水电系统也是对岩土锚固技术研究和应用比较活跃的一支队伍,“七五”期间,在“高坝坝基技术研究”课题下,设有“岩体锚固技术研究”专题,重点对预应力锚索结构、张拉设备、锚夹具、灌浆材料、钻孔工艺、锚索施工技术及锚固机理等进行了系统的理论分析和试验研究;“八五”期间,在“岩质高边坡开挖及加固”课题下,结合黄河李家峡高坝坝肩加固工程,重点对群锚锚固机理及预应力锚固技术、近区爆破岩体对锚固设施的影响、快速锚固凝胶材料对锚固设施的影响等关键技术进行了更深入系统的研究。

经过科研院所和生产单位长期多方面联合科技攻关,到“九五”期间,煤巷锚固技术日益成熟,并能生产成套系列产品,初步适应了我国煤矿生产的具体要求,国内各大矿区煤巷锚杆支护的比例已达到20%以上,少数矿区已超过50%,有些矿井锚固支护巷道比例高达90%以上;在软岩巷道支护控制方面,成功地

将锚梁网、锚喷网、锚索、锚注等应用到生产实践中,并在部分矿井中取得了一定的经济效益。

1.3 锚固岩体基本力学特性研究现状

锚固岩体物理力学特性研究是以岩土体为主要对象,关注锚固后工程岩体整体性能的变化,这种锚固系统对加固体所产生的力学效应,也常被称为锚固效应。目前,有关锚固支护对岩体物性强化方面的研究,也形成了一系列比较丰富的研究成果^[34-43]。

冶金工业部建筑研究总院程良奎和范景伦^[44]在1979年完成了锚杆加固拱的室内大比例试验,通过试验结果分析发现,锚杆提高了岩石的抗剪强度和整体性,并保持了锚杆间岩块的镶嵌和咬合效应,从而可以限制岩块的松动和掉落。Sawwaf和Nazir^[45]通过小规模模型试验研究,测试在加固和未加固岩土中垂直锚固的不同情况,试验表明,加固能显著增加岩土体的刚度和锚杆抗拔力。邹志晖和汪志林^[46]通过模拟试验研究表明,岩性越软,布锚对岩性的影响越敏感,岩性越硬,布锚影响越小,当岩体的弹模提高到某一值时,布锚的作用就很微小了。侯朝炯和勾攀峰^[47]在实验室内进行了大量的试验研究,结果表明,锚杆支护能够对锚固范围岩体峰值强度和残余峰值强度起到一定的强化作用。杨双锁和张百胜^[48]也进行了锚杆对岩体作用力学效应方面的探讨,认为锚杆作用使锚固体的内聚力和弹性模量提高、泊松比减小,而对内摩擦角影响并不显著。

日本青木建设研究所的孙建生等^[49]进行了室内节理岩体的锚固试验,试验结果表明由于锚杆的存在,节理面的名义刚度显著增大;而且节理的刚度越小,锚杆对节理的拘束作用越大,加固效果越好。Dickin和Laman^[50]研究了沙地锚固部位的隆起反应,结果表明,最大抗力与锚杆埋深比例有关,当锚固比例是0.6时,锚固效果最好。叶金汉^[51]通过室内三轴压缩试验,研究了锚固岩体的应力应变曲线、强度及其破坏性状,结果表明,锚固岩体在三向应力状态下的特性表现为强度提高、变形量减少、弹性模量增大、应力应变曲线由脆性转为弹塑性,岩体锚固效应的机制是锚杆约束了岩体的变形,提高了其抗剪强度,使岩体的破坏从脆性状转变为弹塑性或黏弹性状,提高了岩体的稳定性。朱维申和任伟中^[52]针对三峡永久船闸高边坡岩体在开挖过程中的锚杆加固问题进行了室内相似材料模型试验,研究表明,节理岩体的抗压强度、弹性模量、扩容起始应力和残余强度等力学参数,随着锚固密度的增大而增加,而泊松比则减小,两者近似呈线性关系。

在锚固理论力学模型方面,杨延毅和王慎跃^[53]针对加锚节理岩体的特点,从损伤加筋体的自一致理论出发,推求加锚节理岩体的等效柔度张量和损伤张量,并

用脆性类材料的损伤增韧止裂理论,依据加锚节理裂纹的断裂扩展过程建立损伤演化方程,给出了此类加锚岩体的本构关系。李术才等^[54]研究了压剪应力状态下加锚节理面抗剪强度与锚固参数之间的关系,并建立了分支裂纹扩展的突变模型。宋扬^[55]根据复合材料力学的观点,建立了锚杆阻止顶板离层扩展的力学模型。谭云亮等^[56]从锚杆与岩体的复合作用分析出发,探讨了锚杆对岩体的增强机理,并通过巷道顶板的脆性损伤分析,提出了锚杆加固巷道顶板稳定性的潜力分析力学模型,为锚杆加固巷道顶板的设计和顶板稳定性评价提供了依据。

1.4 锚固界面力学传递机理研究进展

就锚固支护系统本身来讲,包括岩体、黏结材料、锚杆(索)三种介质和两个黏结界面,由五个要素的力学性质决定系统的稳定性。在对锚固系统进行拉拔试验时,力的传递由锚杆杆体到黏结材料,再由黏结材料到岩土体,因此,两个界面上的应力分布状态及传递的力学效应是研究的重点。

锚固界面理论研究初期,认为锚杆(索)-围岩界面剪应力是均匀分布,随着锚固理论研究的不断深入,目前主要形成了三种典型的锚固系统力学传递理论:加拿大 Phillips 的幂函数理论、国内东北大学王明恕的“中性点”理论、岩土体-锚固体协调变形的 Mindlin 理论。

1.4.1 界面剪应力均匀分布理论

在传递理论研究初期假设:剪切应力沿锚固段长度均匀分布,注浆时地层没有被压缩,岩石与注浆体界面未产生滑移。得到锚固体剪应力表达形式为式(1-1),其分布情况如图 1-1 所示。

$$\tau_0 = \frac{p_{\max}}{2\pi al} \quad (1-1)$$

式中, τ_0 为锚固体与岩土体间黏结强度; $p_{\max}$ 为锚固体所承受的最大荷载; a 为锚固体半径; l 为锚固体长度。

大量试验和现场监测表明,除极少数工程中,沿锚固段剪应力并不是均匀分布的^[57-61]。程良奎,胡建林^[62]研究认为:黏结力从锚固段的近端逐渐向远端减少;随着张拉力的增加,黏结应力峰值逐渐向远端转移。Woods 和 Barkhordari^[63]研究证实了锚杆锚固段黏结应力分布的严重不均匀性,平均黏结应力随着锚固段长度的增加而减小。王建宁^[64]考虑杆体、浆体和锚固层的共同作用,理论计算结果也反映出了摩阻力分布的不均匀性。朱焕春等^[65]通过现场对全长黏结式锚杆进行循环加载张拉试验认为:在张拉荷载作用下,锚固系统破坏首先是孔内黏结介质的

横向破坏或断裂,继而是孔壁的剪切破坏,使锚固体应力向深部传递;荷载的增高或荷载循环作用次数的增加都可以导致这一过程的继续,直至某一稳定深度。

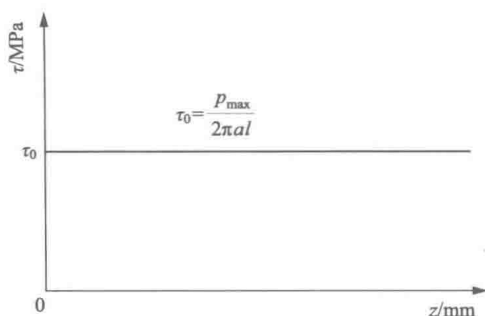


图 1-1 剪应力均匀分布形式

1.4.2 界面剪应力幂函数分布理论

加拿大 Phillips 提出假定摩阻力沿锚杆长度按幂函数式(1-2)表达^[57],其剪应力分布情况如图 1-2 所示。

$$\tau(z) = \tau_{\max} \exp\left(-\frac{Az}{d}\right) \quad (1-2)$$

式中, $\tau_{\max}$ 为最大摩阻力,位于锚固体外端部,即 $z=0$ 处摩阻力; d 为锚固体直径; A 为反映岩土体和锚固体结合力的相关参数; z 为与锚固段端口的距离。

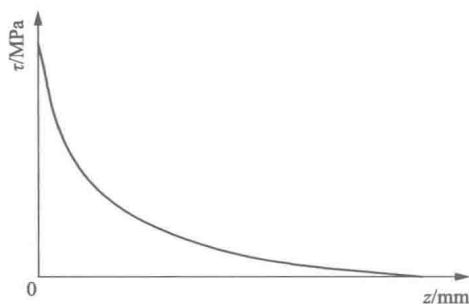


图 1-2 剪应力幂函数分布形式

1.4.3 界面剪应力“中性点”分布理论

国内东北大学王明恕等^[58]在试验和理论分析的基础上,提出全长锚固“中性点”理论。该理论认为在靠近岩石壁面部分(锚杆尾部),锚杆阻止围岩向壁面变形,剪力指向壁面。而在围岩深处(锚杆头部),围岩阻止锚杆向壁面方向移动,剪

力背向壁面,锚杆上剪力指向相背的分界点称为中性点,该点处剪应力为零,轴向拉应力为最大,由中性点向锚杆两端剪应力逐渐增大,轴向拉应力逐渐减少。该理论得到了部分实测结果的证实,对于圆形断面巷道,锚杆所受的剪应力可表示为式(1-3),其剪应力分布情况如图 1-3 所示。

$$\tau(r) = k(u_r - u_n) \quad (1-3)$$

式中, k 为剪移比例系数, MPa/m; u_r 为围岩的径向位移, m; u_n 为中性点处围岩的径向位移, m; r 为圆形巷道断面半径, m。

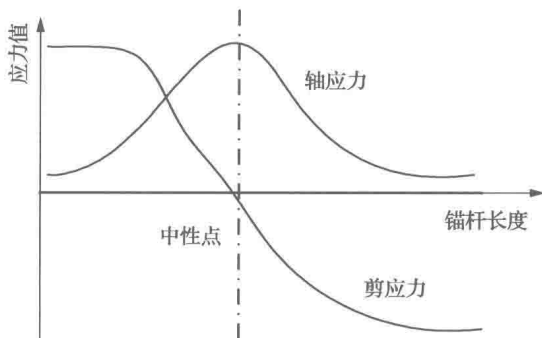


图 1-3 中性点理论锚杆应力分布形式

“中性点”理论在国内锚固支护工程中曾被普遍接受,但其理论形式还存在着一定的争议,因为它难以解释锚杆尾部的断裂机理。刘宏文^[66]对带垫板全长黏结锚杆进行研究,并认为带垫板的全长黏结锚杆不存在中性点,即使有剪力为零的点,也将是一系列的零点而不是一个“中性点”;同时,认为剪力的方向沿锚杆全长不会发生变化。杨更社和何唐镛^[67]也对全长黏结式锚杆的垫板效应进行研究,并提出带垫板锚杆的中性点公式,并认为中性点的位置随垫板反力变化而变化。

1.4.4 界面剪应力 Mindlin 分布理论

在上述研究成果中,由于没有考虑作用在锚固体上的剪应力的大小分布与岩土体的力学性质之间的关系,以及锚固段所受最大剪应力所处位置与试验结果相悖等问题^[68,69]。因此,这些理论的推广应用受到了一定的限制。近些年,国内一部分学者通过理论分析、实验室模拟、数值计算以及现场实测等多方面手段,又对岩土工程锚固力学传递机理进行了较深入系统的研究和探讨,其中山东科技大学的尤春安博士论文是当前最新进展成果的典型代表。尤春安^[68]基于 Mindlin 问题的位移解,采用岩土体-锚固体共同变形原理,推导出全长黏结式锚杆沿杆体所受的剪切力分布的弹性解,该弹性解能较好地与现场实测相符合。

全长黏结式锚杆所受的剪应力表达形式为式(1-4),其沿杆体剪应力分布如图 1-4 所示。

$$\tau = \frac{P}{\pi a} \left(\frac{1}{2} tz \right) \exp \left(-\frac{1}{2} tz^2 \right) \quad (1-4)$$

$$t = \frac{1}{(1+\mu)(3-2\mu)a^2} \left(\frac{E}{E_a} \right) \quad (1-5)$$

式中, P 为锚杆拉拔力; a 为锚杆杆体半径; E 为岩体弹性模量; μ 为岩体泊松比; E_a 为锚杆杆体的弹性模量; z 为与锚固段端口的距离。

由式(1-4)及图 1-4 可见:①全长黏结式锚杆在拉拔力的作用下所受的最大剪应力位置不是在孔口,而是在孔口以下的某个位置,剪应力沿杆长从零急剧地变到最大值,然后逐渐减少并趋向于零;②在弹性状态下,全长黏结式锚杆所受的剪应力范围较小,而最大剪应力数值较大,因此,当锚杆拉拔力达到一定值时,锚杆杆体与岩体的黏结面将进入塑性流动状态而使受力范围往下扩展;③全长黏结式锚杆所受的剪应力大小和分布与岩体性质有关,岩体越坚硬,剪应力分布越集中,最大剪应力值就越大;反之,岩体越松软,剪应力分布就越均匀,最大的应力值就越小。

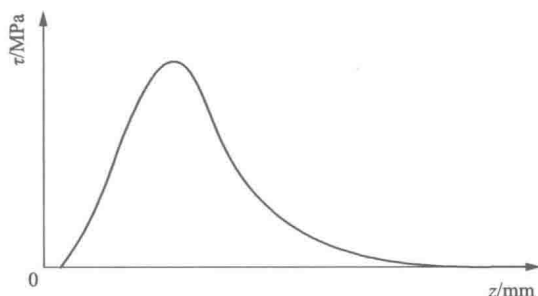


图 1-4 基于 Mindlin 解的剪应力分布形式

1.5 锚固支护理论研究关键科学问题

目前,锚固技术已经成为解决复杂岩体工程加固问题最经济、最有效的方法之一,但锚固理论方面的研究还明显落后于工程实践。如前所述,尽管近几十年来锚固机理方面研究有了较长足的进展,在一定程度上提高了岩体工程加固的理论和设计水平,但仍存在着许多缺陷和不足,尤其是在考虑时间效应的锚固理论方面的研究更为欠缺。随着深部岩体工程的不断涌现,高地应力将使锚固岩体的流变性