

国家自然科学基金项目“尾矿库溃坝事故安全预警阈值及应急准备基础研究”
(No. 71373245) 资助出版

帷幕注浆堵水隔障带 稳定性及监测技术研究

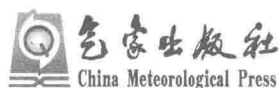
中国安全生产科学研究院
付士根 李全明 马海涛 ◎ 著



国家自然科学基金项目“尾矿库溃坝事故安全预警阈值及应急准备基础研究”
(No. 71373245)资助出版

帷幕注浆堵水隔障带 稳定性及监测技术研究

中国安全生产科学研究院
付士根 李全明 马海涛 © 著



图书在版编目(CIP)数据

帷幕注浆堵水隔障带稳定性及监测技术研究 / 付士根, 李全明, 马海涛著. — 北京: 气象出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-5029-6529-7

I. ①帷… II. ①付… ②李… ③马… III. ①矿山注浆堵水-防渗帷幕-稳定性-研究 ②矿山注浆堵水-防渗帷幕-监测-研究 IV. ①TD745

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 057312 号

Weimu Zhujiang Dushui Gezhangdai Wendingxing Ji Jiance Jishu Yanjiu
帷幕注浆堵水隔障带稳定性及监测技术研究

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 张盼娟 彭淑凡

终 审: 邵俊年

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 8.75

字 数: 172 千字

版 次: 2017 年 4 月第 1 版

印 次: 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社发行部联系调换

前 言

采矿业是我国国民经济的基础产业,然而目前,浅部资源开采殆尽,富矿、露天矿及易开采的地下矿山已不能满足工业发展需求,大水矿床逐渐被开发利用。随着开采强度的不断加大,大水矿床开采过程中排水带来的一系列安全、环境及水资源保护等问题日益凸显。我国大量的金属矿产资源赋存于广泛分布的石灰岩溶地区,岩溶类矿床分布广、涌水量大、危害程度大,均为世界之最。这些矿床在开采过程中,多次发生透水、涌水等水害事故,造成极为惨重的人身伤亡和经济损失。

多年来,我国岩溶水矿井采用的防治水技术主要有矿床疏干和帷幕注浆。疏干排水是世界各国在矿井开发中应用最广泛的一种防治水技术,但由此引发了一系列的安全和环境问题。随着注浆堵水技术在煤炭、水利等系统的成功运用,19世纪70年代以来,冶金系统相继在水口山铅锌矿等深部厚层灰岩中采用注浆帷幕截流技术防治地下水,取得了较好的效果。

随着注浆帷幕堵水技术的发展,近矿体顶板灰岩帷幕注浆堵水技术成为近年来研究应用的防治水新方法,为水文地质条件复杂型的大水矿床的安全高效开采提供了技术保障。研究和实践证明,井下近矿体顶板帷幕注浆堵水技术已经在多个大水金属矿山取得了良好的堵水效果。但是随着开采和帷幕内外高压水头作用等因素影响,帷幕注浆堵水隔障带的稳定性关系到能否实现大水矿床安全高效开采。因此,帷幕注浆堵水隔障带的稳定性一直是矿山科研人员和企业非常关注的重大安全问题。

本书以岩溶水矿山谷家台铁矿为例,通过相关地质资料收集及室内岩石物理力学性能试验,运用岩石力学、基于多元联系系数的集对分析理论及三维数值模拟等技术方法,对近矿体顶板帷幕注浆堵水隔障带稳定性和监测方法进行了深入系统的研究,包括近矿体顶板注浆帷幕厚度研究,帷幕注浆参数研究和堵水效果评价,矿岩的物理力学性质研究,堵水隔障带稳定性定性评价研究,注浆帷幕稳定性三维数值模拟研究,应用矿柱内的应力-应变说明开采过程中矿柱对支撑上部围岩稳定性的重要作用,并研制和开发了光纤岩移监测系统。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏,敬请批评指正。

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 矿山水害防治技术研究现状	(3)
1.2.2 围岩稳定性研究现状	(5)
1.2.3 围岩稳定性监测技术研究现状	(8)
1.3 存在问题	(10)
1.4 主要研究内容及技术路线	(10)
第 2 章 近矿体顶板帷幕注浆堵水工艺研究	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 矿区地质	(12)
2.2.1 矿区地层	(12)
2.2.2 矿区构造	(13)
2.2.3 围岩蚀变	(14)
2.3 矿区水文地质	(14)
2.3.1 矿区水文地质特征	(14)
2.3.2 矿区主要充水因素	(15)
2.3.3 矿区“天窗”特征	(16)
2.3.4 矿区地下水的补给、径流、排泄	(17)
2.4 近矿体顶板帷幕注浆可行性研究	(17)
2.4.1 近矿体顶板帷幕注浆条件	(17)
2.4.2 注浆方案技术比较	(18)
2.4.3 注浆材料	(19)
2.5 注浆帷幕安全厚度研究	(19)
2.5.1 按抗压强度计算帷幕厚度	(20)

2.5.2	按“三带理论”计算帷幕厚度	(24)
2.6	近矿体顶板帷幕注浆堵水施工研究	(25)
2.6.1	注浆参数	(25)
2.6.2	帷幕注浆施工设计	(28)
2.6.3	注浆堵水效果检测	(32)
2.7	小结	(35)
第 3 章	堵水隔障带力学特性试验研究	(36)
3.1	试验仪器和试验原理	(36)
3.1.1	岩石密度试验	(36)
3.1.2	岩石抗拉强度试验	(36)
3.1.3	岩石单轴抗压强度及变形试验	(36)
3.1.4	岩石三轴压缩及变形试验	(37)
3.1.5	岩石抗剪试验	(38)
3.2	岩石力学试验结果	(39)
3.2.1	岩石密度试验结果	(39)
3.2.2	岩石抗拉强度试验结果	(40)
3.2.3	岩石单轴抗压强度及变形试验结果	(41)
3.2.4	岩石三轴压缩及变形试验结果	(44)
3.2.5	岩石抗剪试验结果	(44)
3.2.6	试验结果汇总	(45)
3.3	近矿体顶板帷幕注浆堵水机理研究	(46)
3.3.1	注浆对岩石孔隙的影响	(46)
3.3.2	注浆堵水隔障带水理性质	(47)
3.3.3	堵水隔障带岩石密度	(48)
3.3.4	注浆体岩石力学性质	(48)
3.4	小结	(49)
第 4 章	堵水隔障带稳定性评价	(50)
4.1	非确定性评价方法及其比较	(50)
4.2	集对分析	(53)
4.2.1	多元联系数	(54)
4.2.2	系数 i 的取值	(55)
4.2.3	集对势等级分序	(56)
4.2.4	多元联系数评价模型	(57)

4.3	堵水隔障带稳定性影响因素分析	(61)
4.3.1	区域工程地质因素	(61)
4.3.2	区域水文地质因素	(63)
4.3.3	工程影响因素	(65)
4.4	稳定性集对评价模型建立	(67)
4.4.1	评价对象因素权集计算	(67)
4.4.2	堵水隔障带稳定性集对分析	(69)
4.5	小结	(71)
第 5 章	堵水隔障带稳定性数值模拟研究	(73)
5.1	FLAC ^{3D} 基本原理	(73)
5.1.1	有限差分计算方法	(73)
5.1.2	FLAC ^{3D} 流-固耦合模拟计算	(76)
5.2	矿房开采模型建立	(77)
5.2.1	工程概况	(77)
5.2.2	采矿方法	(78)
5.2.3	矿房模型	(78)
5.2.4	力学参数及地应力场	(79)
5.3	矿房开采步序模拟	(81)
5.4	开采模拟结果及分析	(82)
5.4.1	堵水隔障带覆岩应力特征	(82)
5.4.2	堵水隔障带覆岩变形特征	(91)
5.4.3	点柱稳定性分析	(93)
5.4.4	间柱稳定性分析	(96)
5.5	小结	(101)
第 6 章	堵水隔障带稳定性监测系统研究	(103)
6.1	帷幕注浆堵水隔障带现有监测方法	(103)
6.2	光纤岩移监测系统研制	(105)
6.2.1	光纤传感技术基本原理	(105)
6.2.2	光纤岩移监测系统研制	(106)
6.3	谷家台铁矿应用实例	(112)
6.3.1	监测系统安装	(112)
6.3.2	监测结果分析	(116)
6.4	小结	(119)

第 7 章 结论与展望 (120)

7.1 主要研究结论 (120)

7.2 主要创新点 (121)

7.3 展望 (122)

参考文献 (123)

作者简介 (131)

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

采矿业是我国国民经济的基础产业,我国 80%以上的工业原料和 95%以上的能源来自于矿山,矿产资源的开发对国民经济的发展具有极为重要的意义^[1-2]。然而目前,我国浅部资源开采殆尽,富矿、露天矿及易开采的地下矿山已不能满足工业发展需求,大水矿床(是指日排水量大于 1.0×10^4 t,或最大涌水量大于正常涌水量 2 倍以上的矿山)^[3]逐渐被开发利用。随着开采强度的不断加大,大水矿床开采过程中排水带来的一系列安全、环境及水资源保护等问题日益凸显。

我国大量的金属矿产资源赋存于广泛分布的石灰岩溶地区,岩溶类矿床分布广、涌水量大、危害程度大,均为世界之最。在北方区,广泛分布的山西式铁矿严重受太原群薄层灰岩和奥陶系灰岩的水害威胁(如河北邯郸、山东莱芜等)^[4-5]。由于山西式铁矿距奥陶系灰岩的距离很近,矿区附近的断裂与岩体构造直接控制着奥陶系、石炭二叠系灰岩喀斯特水的补给、径流和排泄条件,断裂破碎带和发育于岩体周边的张开性裂隙往往将灰岩水直接导入矿坑,给该区矽卡岩型矿床的开发带来严重的水害威胁。这些矿床在开采过程中,多次发生透水事故^[6-9]。如 1999 年 7 月 12 日,莱芜矿业公司谷家台铁矿在 -100 m 水平 28 A 穿脉发生透水导致 29 人死亡的特大井下突水事故。1995 年 2 月 13 日, +1 m 水平 22 线 3[#] 川脉掘进迎头发生涌水,出水量近 $3000 \text{ m}^3/\text{d}$; 4 月 3 日, +11 m 水平 23 线 5[#] 川脉发生涌水,水量在 $3000 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右^[10]。

在南方区和西南区,大部分金属矿床属于火成岩体与寒武奥陶系灰岩接触带的热液变质型矿床。由于矿体与灰岩含水层直接接触,使得该区金属矿床的水文地质条件十分复杂,矿井涌水量很大,喀斯特水一旦被揭露后直接溃入或通过地下暗河溶洞导入,成为矿井突水的一大特点。矿井涌水往往突发性强,水量大。长期以来,因为矿区水害而造成的人身伤亡和经济损失极为惨重。

多年来,我国岩溶水矿井采用的防治水技术主要有矿床疏干和帷幕注浆。疏干排水是世界各国在矿井开发中应用最广泛的一种防治水技术,但由此引发

了一系列的安全和环境问题。首先,随着矿床开采的延深,地下水经沉降强排,产生了巨大的水头差,在一些构造破碎带和隔水薄层的地段易发生突水事故,严重地威胁着矿井和职工的安全。其次,大规模的疏干排水会导致矿区出现大面积的岩溶地面塌陷与沉降,造成农田破坏、居民搬迁、河流改道等一系列问题,严重破坏水文地质环境,越来越不适应国民经济的发展对地下水资源的需要。

随着注浆堵水技术在煤炭、水利等系统的成功运用,进入 20 世纪 70 年代以来,冶金系统相继在水口山铅锌矿等深部厚层灰岩中采用注浆帷幕截流技术防治地下水,取得了较好的效果。此种治水方法适用于过水断面较窄的情况,注浆帷幕两端和底部均有稳定、可靠的不透水边界,或岩溶裂隙不发育、弱发育的相对隔水带,且只要堵截相当一部分地下水,在一定程度上控制地面塌陷,就算达到了建造矿区帷幕的目的。

随着注浆帷幕堵水技术的发展,近矿体顶板灰岩帷幕注浆堵水技术成为近年来研究应用的防治水新方法,为水文地质条件复杂型的大水矿床的安全高效开采提供了技术保障。

近矿体顶板灰岩驱水封闭系统注浆堵水实质是一种地下封闭帷幕注浆,即通过注浆在矿体周围形成不透水的封闭空间、尽可能地减少矿井涌水量的防治水技术。近些年来研究和实践证明,井下近矿体顶板帷幕注浆堵水技术已经在多个大水金属矿山取得了良好的堵水效果。

近矿体顶板帷幕注浆堵水技术能够较好地保护地下水资源及矿山安全生产,较好地避免矿床疏干法和地面垂直帷幕注浆堵水法引起的地面塌陷、河流改道、居民搬迁等一系列环保和民生等问题,堵水率一般可达到 85% 以上。但是随着开采和帷幕内外高压水头作用等因素影响,帷幕注浆堵水隔障带的稳定性关系到能否实现大水矿床安全高效开采。因此,注浆帷幕堵水隔障带的稳定性一直是矿山科研人员和企业非常关注的重大安全问题。

本书以谷家台铁矿作为研究对象,通过对谷家台铁矿的工程地质、水文地质现场调查,综合研究了矿区近矿体顶板帷幕注浆堵水的可行性,利用集对分析原理评价分析了注浆帷幕堵水隔障带的稳定性;采用三维 FLAC^{3D} 数值模拟开采开挖对注浆帷幕堵水隔障带的破坏和扰动范围,研究帷幕堵水隔障带的破坏机理并对其稳定性进行监测。上述工作为大水矿床的安全高效开采和可持续发展提供了重要的理论依据和技术支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 矿山水害防治技术研究现状

矿山水害防治技术一般分为三类,即疏干、封堵、避让。具体来说,矿山水害防治首先应深入掌握矿区水文地质条件,在此基础上,遵循先简单、后复杂,先地面、后井下、层层设防的原则,开展矿山水害防治。对于各种可能涌入矿坑的地表水,首先采取地面防水措施;为防范突水淹井,应采取井下防水及探放水措施;为保证安全顺利开采,坑内一般以排水疏干为主,并尽量在浅部将地下水拦截;在水文地质条件适宜、经济技术条件允许时,应优先采取帷幕注浆方案^[11]。

(1) 疏干排水^[12-13]

20世纪80年代以前,矿山通常采取疏干排水的防治水害方法。大多数矿山在生产过程中进行大量疏干排水,保障矿床的安全开采。例如西石门铁矿采用疏干排水方法,矿床疏干效果较好,保障了矿山几十年正常生产安全;安庆铜矿、三山岛金矿等虽采用地下控制疏干排水,但对主要的导水断层裂隙进行注浆堵水,也起到了良好的治理效果。

国内大水矿山疏干排水实践表明,疏干排水是早期矿山开采中广泛应用的一种防治水技术,为当时大水矿山的开采起到了重要的安全保护作用。然而大规模的疏干排水破坏了地下水的补给平衡,导致矿区出现大面积的岩溶地面塌陷与沉降,造成农田破坏、生产生活用水困难,矿区与周边村民等矛盾可谓一触即发,在一定程度上影响了社会稳定。同时随着国家法律法规的不断完善和人民群众对环保问题改善的渴求,矿山防治水技术必须走可持续发展的新路子,保障矿山实现安全高效生产具有重要意义。疏干排水技术因其危害性较大和限制条件的影响,适用范围也将越来越小。

(2) 帷幕注浆堵水

为解决矿床疏干排水开采过程带来的一系列灾害,我国防治水工作者于20世纪60年代开发了矿区帷幕注浆技术,20世纪70年代开始在岩溶发育地区修建高坝,为防止坝基渗透应用了帷幕注浆法。经过多年的发展,帷幕注浆已广泛应用到水利、建筑、铁路和矿业等多个领域。经过50多年的工程实践,我国矿山帷幕注浆工艺成功地应用到多个矿山治水工程,且堵水效果都很好,保护了水资源环境,节省了排水费用,大幅度降低了矿石生产成本,有效缓解了许多大水矿山的治水难题^[14-15]。

注浆(灌浆)就是将具有充填胶结性能的材料配成浆液,以泵压为动力源,用

注浆设备通过注浆管将其注入岩层,浆液以渗透、填充、劈裂和挤密等方式扩散、胶结或固化,从而达到加固围岩或防渗堵水的目的,改善受注地层的水文地质和工程地质条件^[16]。帷幕注浆技术又分为地面帷幕注浆技术和井下近矿体顶板帷幕注浆技术。

①地面帷幕注浆技术。造浆、压浆和注浆孔钻进均在地面进行,适用于含水层埋藏深度不大于 150 m、无效钻进占总进尺比例小的情况,便于使用大型钻机和大型设备,效率高,质量好,但相对钻孔有效进尺较低,特别是在含水层较薄时。如水口山铅锌矿、张马屯铁矿、铜录山铜矿和新桥硫铁矿等矿山都采用帷幕堵水的治水技术,取得了良好的效果。经过几十年的实践,我国矿区地表帷幕注浆技术已日趋成熟,从局部注浆堵水到大型帷幕注浆防水,都取得了较好的应用效果,其中有些注浆技术已达到国际先进水平^[17-23]。

矿区地面注浆帷幕截流技术大量节省了矿山排水电费和采矿费用,显著提高了经济效益,并且解决了疏干排水方法无法解决的环境地质问题以及社会问题。但是,其堵水率相对较低,实践表明大多数采用此方法的冶金矿山平均堵水率不足 70%^[24](表 1.1),同时地面帷幕注浆因投入较大、工期较长、对矿区水文地质条件要求苛刻等方面的问题也限制了其发展的空间。

表 1.1 大水金属矿山注浆堵水率统计表

名称	治水方法	矿坑最大涌水量 (m ³ /d)	注浆后涌水量 (m ³ /d)	堵水率 (%)
水口山铅锌矿	注浆帷幕截流	71 520	32 184	55.00
张马屯铁矿	注浆帷幕截流	20 400	3 672	82.00
黑旺铁矿	注浆帷幕截流	91 999	36 800	60.00
铜录山铜矿	注浆帷幕截流	10 959	5 041	54.00
平均				62.75

②井下近矿体顶板帷幕注浆技术。它是大水金属矿山防治水技术方法的创新,不仅解决了疏干排水方案引起地面塌陷、雨季突水隐患以及高昂的排水费用等问题,也解决了地面矿区帷幕截流防治水技术堵水率较低、工程造价高以及对矿区水文地质条件要求较高等多方面的问题。学者和专家们^[11-12,25-26]对井下近矿体顶板帷幕注浆技术进行了深入的研究,取得了较好的效果。如今,井下近矿体帷幕注浆技术已在多个大水金属矿山实践与推广应用,其堵水率一般在 85% 以上,能有效地控制地面塌陷、保护矿区地下水资源等,取得良好的经济和社会效益。

③地面-井下联合帷幕注浆堵水技术。造浆、压浆在地面通过输浆孔向井下钻进的注浆孔注浆。适用于含水层较深,有可利用的井下巷道用于注浆。水口

山铅锌矿鸭公塘矿区大型帷幕注浆治水工程和谷家台铁矿,采用地面-井下联合注浆帷幕治水方案。

国外大水金属矿山,在数量上比国内少得多,且水文工程地质条件都相对简单,矿坑涌水量也小得多,其防治水方法主要是采用疏干排水,但是国外自动化控制程度较高,排水设备性能较好。

国外堵水技术方法也有发展,建造地下帷幕方法愈来愈受到重视,也认为帷幕注浆是今后矿山地下水防治工作的方向之一。目前有些国家利用挖沟机在松散层中修建帷幕,开挖、护壁、清渣流水作业,是当前国外先进的堵水截流技术。可以说,从国外大水金属矿山防治水技术现状来看,如果从其所获得的经济效益、社会效益等方面来衡量,我国的大水矿山防治水技术均处于世界领先水平。

1.2.2 围岩稳定性研究现状

采场顶板稳定性问题是地下采矿工程的一个重要研究内容,关系到工程施工的安全性及其生产期间的安全可靠。近矿体顶板帷幕注浆堵水隔障带形成后,堵水帷幕隔障带就成了开采矿体的直接顶板,是矿山开采过程中的一道人造安全屏障,是矿山的生命线。它的有效性、可靠性,即稳定性直接关系到矿山的安全和生存,其失稳轻则造成局部堵水效果下降,大幅度增加矿山生产成本,重则导致帷幕堵水功能失效,直接造成矿山重大透水事故,致使矿井停产甚至报废。因此,注浆堵水帷幕的稳定性一直是矿山科研人员非常关注的重大安全问题^[27-28]。

围岩丧失稳定性,从力学观点来看,是由于围岩的应力水平达到或超过岩体的强度范围较多,形成了一个连续贯通的塑性区和滑动面,产生较大位移最终导致失稳^[29]。

根据当前围岩稳定的分析理论和数学模型,围岩稳定分析方法可以归纳为解析分析法、工程类比法、模型试验法、数值模拟分析法等。随着计算机技术的快速发展和广泛使用,数值模拟方法在研究围岩应力及变形和破坏发展的过程具有直观可视性,已成为解决工程设计和施工问题的最有效的方法。

(1) 解析分析法

解析分析法是指采用数学力学的计算取得闭合解的方法。在解析分析法方面,1976年,Goodman^[30]采用赤平投影方法分析了非连续性岩体的稳定性;1977年,石根华^[31]提出了在赤平透明图上判断滑落体的方法,并采用矢量代数法分析岩体的稳定性,此后中科院地质所的孙玉科^[32]、王思敬等^[33]在应用赤平极射投影和实体比例投影分析法进行地下工程围岩稳定分析方面的研究,取得了大量的成果;张子新等^[34]运用块体理论赤平解析法分析了硐室稳定性,确定了失

稳的块体;1983年,于学馥等^[35]采用复变函数计算进行围岩应力与变形计算,得出了弹性解析解。可用解析分析法解决的实际工程问题十分有限,特别是在岩体的应力-应变超过峰值应力和极限应变,围岩进入全应力-应变曲线的峰后段的刚体滑移和张裂状态时,便不再适用了,但解析分析法具有精度高和得到一些规律性研究成果等优点。随着工程实践的不断深入,该方法已较为成熟。

(2) 工程类比法

工程类比法是地下工程围岩稳定性评价的重要方法之一,将拟建工程的工程地质条件、水文地质条件和岩体力学特性等因素同具有类似条件的已建工程,开展资料的综合分析和对比,从而判断拟建工程区岩体的稳定性,取得相应的资料进行稳定计算。自1926年前苏联普罗托奇雅可诺夫以岩石的“坚固性”作为分级依据,提出普氏坚固性分级,随后国内外学者根据工程实践提出不同的围岩分类标准,如美国伊利诺斯大学 Deere^[36]在1963—1968年间提出并逐步发展 RQD(岩体质量指标)分级,挪威学者巴尔通(Barton)等^[37]提出了岩体质量分级,南非 Bieniawski^[38]提出南非地质力学分级(RMR),谷德振^[39]的岩体质量指标 α 系统分类等。东北大学林韵梅教授等^[40-43]在对国内外稳定性分级分析研究的基础上,提出一种以准岩体强度 L 为指标将岩体划为五级的分级方法;通过聚类分析和逐步回归等多种数学方法研究了《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)^[44]中 BQ 公式的理论依据。

(3) 模型试验法

其依据是相似性原理和量纲分析原理,模拟试验采用某种人工材料,应用相似原理,根据所模拟的实体原型制成相似模型,通过对模型上有关力学参数、变形状态的测试与分析进而推断在实体原型上可能出现的力学现象与力学规律。针对理论分析中的缺陷和不足,国内外不少学者开展了大量的模型试验研究工作,得出了许多有益的结论。如荷兰 Bandis^[45]等进行了模拟高地应力条件下的圆形洞室开挖模型试验后认为:即使在超高应力条件下,围岩的各向异性性质还是很明显,其二次应力和变形都由岩体构造控制。陈霞龄等^[46]通过平面应变和三维两种破坏模型对地下洞室的稳定性进行了研究。赵震英^[47]采用模型试验的手段,对洞群开挖全过程围岩的应力和位移分布进行了深入研究,讨论了围岩破坏过程以及安全度等问题。唐东旗等^[48]开展了断层带留设防水煤柱开采的相似模拟试验研究。胡耀青等^[49-50]从固流耦合的理论出发,运用相似理论推导了三维固流耦合作用下的相似模拟准则,利用典型的隔水层与含水层的相似材料,研究了承压水上采煤底板各含水层水压分布随采动的变化规律。刘爱华等^[51]研制了可模拟深部开采突水机理的模型试验系统。李向阳等^[52-55]采用相似模拟的方法研究了木架山矿区倾斜采空场处理时的地表移动与覆岩破坏规律。孙世国等^[56]做了开挖对岩体稳态扰动与滑移机制的模拟试验。

(4) 数值模拟分析法

随着计算机技术和相关软件的发展,数值模拟分析已成为解决地下岩土工程问题的有力工具,在地下工程围岩稳定性分析中得到了广泛的应用。数值分析能很好地考虑介质的非线性、各向异性以及性质随时间和温度变化、复杂边界条件等问题,解决经典解析法无法克服的缺陷。利用数值方法可以对地下工程开挖过程中的地压活动规律进行模拟,结合相关的力学知识,分析围岩的变形、地应力的分布和塑性区的范围,从而对其围岩进行稳定性评价,预测预报可能发生破坏的范围,以便采取相应的措施确保安全,避免事故发生。根据分析原理、基本思路和适用条件等方面划分,目前常用的数值模拟可分为以下几种:

①有限元法(FEM)。有限元法的思想在 20 世纪 40 年代就已形成,该方法发展至今已相当成熟,是目前使用最广泛的一种数值方法,可用来求解弹性、弹塑性、粘弹塑性、粘塑性等问题,是地下工程岩体应力应变分析最常用的方法。

在早期的数值模拟研究中,大多采用有限元分析方法,Cividini 等^[57-63]的研究,标志着 20 世纪 90 年代国际上在这方面的研究水平。我国的孙均等^[64]、骆念海等^[65]、张玉军等^[66]利用有限元模拟也做了大量的研究工作。马文瀚等^[67]、黎斌等^[68]、程晔等^[69]运用有限元强度折减法与优化理论进行了溶洞顶板稳定性分析研究。在有限元基础上,东北大学刘红元等^[70-71]开发了岩层断破过程分析程序(SFPAR^{2D});杨天鸿等^[72-73]开发了岩石损伤破裂过程渗流-应力耦合分析系统 F-RFPA^{2D},用于模拟岩石介质逐渐破坏过程,其中渗流分析和应力分析求解器均是采用有限元法进行;杨天鸿等利用该系统对岩石裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流-损伤耦合机制进行了模拟分析,对采动岩层破坏突水通道形成特征和并行渗流耦合数值仿真结果进行综合反演,揭示岩层破断突水前兆规律。有限元分析法的不足之处在于有限元法只适用于连续介质,对于非连续介质计算结果不理想。

②不连续变形分析(DDA)方法。块体系统不连续变形分析(Discontinuous deformation analysis)是基于岩体介质非连续性发展起来的一种新的数值分析方法^[74-75]。它是平行于有限元法的一种方法,其不同之处是可以计算不连续面的位错、滑移、开裂和旋转等大位移的静力和动力问题。将 DDA 模型与连续介质力学数值模型结合起来,如将 DDA 模型与有限元数值方法结合,应该是 DDA 模型工程应用研究的发展方向。

③离散单元法(DEM)。1971 年,Cundall 等^[76]提出离散单元(Distinct element method)模型,且 Cundall 和 Hart^[77]合作成功地开发出了相应的二维和三维计算程序以来,这一方法已在岩土工程问题中得到越来越多的应用。东北大学王泳嘉等^[78-80]于 1986 年首次向我国岩石力学与工程界介绍了离散单元法的基本原理及应用例子,其后离散单元法在我国发展迅速。邢纪波等^[81]、王国强

等^[82]、王强等^[83]相继开展了对离散单元法的深入研究,有效地模拟了岩体变形与破坏过程。离散单元法的一个突出功能是它在反映岩块之间接触面的滑移、分离与倾翻等大位移的同时,又能计算岩块内部的变形与应力分布。

④有限差分法(FDM)。有限差分法(Finite differential method)是先从物理现象引出相应的微分方程,再经离散化得出差分方程,由参数的差分公式求解微分方程;其求解方式可分为显式和隐式两种^[84]。近年来基于连续介质力学的数值方法显式快速拉格朗日差分分析法(Fast lagrangion analysis of continuun, FLAC)在岩土工程中得到了广泛的应用^[85-87]。陈育民等^[88]提出了基于该方法的分析模型,分析了页岩中水压力对隧洞稳定性的影响。胡斌^[89]开发了FLAC^{3D}前处理程序(FLAC^{3D} pre-processing package),成功实现了建模自动化,并且把真实地形、地貌反映到计算模型中。姜文富^[90]采用FLAC^{3D}流固耦合数值分析,量化地模拟了在矿压、渗流水压(水头)一定的条件下导水断层破碎带注浆加固方案的优化设计。匡顺勇等^[91]、李树忱等^[92]采用FLAC^{3D}流固耦合数值分析方法分析了大水矿山顶板突水机理和海底隧道顶板厚度计算。李树忱等^[93]根据弹性理论,建立基于单元的安全系数法,通过FLAC^{3D}中的FISH语言实现了围岩稳定安全系数的求解过程。FLAC主要用于模拟由岩土体及其他材料组成的结构体在达到屈服极限后的变形破坏行为,该方法能更好地考虑岩土体的不连续和大变形特性。

⑤边界元法(BEM)。边界元法(Boundary element method)又称为边界积分方程法,是20世纪70年代兴起的一种数值分析方法。Crough和Starfield首次系统地介绍了边界元法的几种方法及其在岩石力学问题中应用的例子^[94]。Brady和Brown详细介绍了边界元直接法和间接法的计算公式^[95];Crotty和Wardle于1985年提出了能分析含有连续弱面的非均匀介质的边界元程序^[96]。边界元法因为网格剖分简单,计算工作量及对计算机内存容量要求低,在某些问题中也是一个很好的方法。但是边界元法对变系数、非线性等问题较难适应,且它的应用是基于所求解的方程有无基本解,因此,限制了边界元法在更广泛领域的应用。

其他的数值方法还有不连续变形分析^[97]、块体弹簧元法^[98]等。

(5) 其他方法

除了上述常用的方法外,还有一些新的理论和方法也在围岩稳定分析中得到应用,如模糊综合评判法、突变理论等^[99-100]。

1.2.3 围岩稳定性监测技术研究现状

我国目前已有40多个矿山推广应用了矿山帷幕注浆堵水技术,其中有多

岩溶水矿山运用了近矿体顶板帷幕注浆堵水技术,消除了岩溶水对矿山开采构成的威胁,解放了大量的矿石资源,解决了许多矿山的生存问题,同时也为其他行业的堵水、抗渗、加固等工程提供了有力的技术支持^[28]。矿体顶板注浆防水帷幕既是隔水体,又作为采场的顶板,兼有防水和保持采场顶板稳定的双重作用,一方面注浆帷幕体要承受采空区顶板的应力集中,另一方面要抵抗幕外的静水压力。因而注浆堵水帷幕隔障带的稳定性对大水矿山的安全高效开采起着至关重要的作用,是矿山企业 and 安全科研人员非常关注的重大安全科技问题,对它的监测及监测方法的研究也从未间断过。

注浆帷幕隔障带的厚度较小,可能因采矿作业扰动而产生破坏,引起突水淹井特别重大事故,给企业造成重大损失。因此,如何对注浆帷幕隔障带进行准确的稳定性评估,从而对矿山动力灾害进行有效的预报和预警成为矿山安全生产的关键^[101]。

传统的矿山岩体稳定性监测手段是对原位岩体的变形或应力状态进行现场测量,利用数值模拟手段对岩体应力状态进行标定^[102-103]。随着科技的不断进步,国外较早地研制了智能监测方法如 3D 动态空区激光监测系统、微震监测系统^[104],特别是微震(Microseism, MS)监测技术是利用岩体受力变形和破坏过程中释放出的弹性波来监测工程岩体稳定性的技术方法。目前,多通道微震监测技术在南非的深井金矿及美国、加拿大、澳大利亚、智利等采矿大国的金属矿山和波兰等国的煤炭矿山得到了普遍使用,成为矿山动力地压灾害监测和安全生产管理的主要手段^[105-108]。

我国的声发射研究起始于 20 世纪 70 年代,武汉安全环保研究院等单位相继开发研制或改进了一系列的声发射仪。近年来,微震监测技术在国内地压监测方面也逐渐使用。自 2001 年李庶林等^[109]采用加拿大 ESG 公司技术在凡口铅锌矿建立了 64 通道全数字型微地震监测系统以来,姜福兴等^[110]、杨承祥等^[111]在微震监测系统技术方面进行了深入的研究探索。目前国内多家矿山和水电站都相继建立了微震监测系统^[112-114]。特别是张马屯铁矿首次将微震监测技术应用于监测注浆帷幕的稳定性^[101],探索研究注浆帷幕在高水头压力作用下岩体产生微破裂的前兆,岩体内部应力重分布,从而发生突水、岩爆等动力灾害的可能性。

由于注浆堵水帷幕的特殊性,其稳定性监测方法还有地质水文观测孔水位和水温监测方法^[28,115],通过布设水文观测孔,定期比较帷幕内外的水位、水温等数据,了解帷幕的堵水效果及其变化规律,从而达到监测注浆堵水帷幕稳定性的目的。利用物探方法^[116]对矿山注浆帷幕效果进行检测,就是采用电法勘探的技术,通过分析注浆前后各个岩层电阻率变化,从而判断注浆效果的好坏,进而分析判断注浆帷幕的稳定性。