

王志国 著

富水边坡注浆帷幕

破裂机理及稳定性研究

FUSHUI BIANPO ZHUJIANG WEIMU
POLIE JILI JI WENDINGXING YANJIU



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

富水边坡注浆帷幕 破裂机理及稳定性研究

王志国 著

北 京
冶金工业出版社
2016

内 容 提 要

本书以司家营研山铁矿复杂条件边坡帷幕注浆为工程背景,基于声发射三维定位技术研究了帷幕体试件在不同应力条件下裂隙的空间分布与演化特征;采用分形几何理论分析了裂隙空间分维演化特征,揭示了帷幕体破裂演化非线性机理;采用数值模拟方法研究了地应力与渗流应力耦合作用下的帷幕及边坡稳定性,提出了边坡安全与帷幕注浆参数;开展了帷幕注浆堵水技术研究并分析了现场实施效果。

本书适合从事金属矿露天开采及帷幕注浆研究的科研人员、工程技术人员使用,也可供高等院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

富水边坡注浆帷幕破裂机理及稳定性研究/王志国著. —
北京:冶金工业出版社,2016.8

ISBN 978-7-5024-7316-7

I. ①富… II. ①王… III. ①矿山注浆堵水—防渗帷幕—
边坡稳定性—研究 IV. ①TD745

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 194385 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcs@cnmp. com. cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7316-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版,2016 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm;11 印张;212 千字;166 页

45.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

司家营研山铁矿为鞍山式沉积变质铁矿床，是一座采矿规模为1500万吨的大型露天开采矿山。该矿是典型的大水矿山，二期露天采场东帮紧邻纵贯矿区东部边缘的新河；矿区东部第四系冲积层厚度大、高富水，其中冲洪积砂、砂砾卵石层和孔隙潜水含水层的富水性、透水性极强，且第四系土层具有特殊的物理力学性质。露天采场开挖后，新河水可通过长约692m的第四纪全新统强透水层通道向采场大量涌水。

为实现矿山安全生产和保护矿区地下水资源，选用帷幕注浆的方式进行地下水治理。目前已完成帷幕工程，其效果仍需评价。随着采深增加，矿区中部裂隙-岩溶富水层的不断揭露，边坡涌水量不断增加，边坡岩体强度降低，潜在滑坡危险增加。帷幕体在露天开采过程中稳定是边坡稳定与安全生产的前提，但目前对于开采荷载作用下导致帷幕体破裂规律的研究尚不够深入，因此开展帷幕体破裂规律、帷幕与边坡稳定及注浆堵水效果研究非常必要。针对该矿注浆帷幕存在的问题，华北理工大学等单位进行了注浆帷幕边坡治理方案横向课题合作研究；同期华北理工大学立项开展了有关帷幕体破裂机理的唐山市科技计划项目研究。

本书以司家营研山铁矿复杂条件边坡帷幕注浆为工程背景，采用室内试验、数值模拟、理论分析与现场测试相结合的方法开展了帷幕体破裂机理研究。基于声发射三维定位技术研究了帷幕体试件在不同应力条件下裂隙的空间分布与演化特征；采用分形几何理论分析了裂隙空间分维演化特征，揭示了帷幕体破裂演化非线性机理；采用数值

模拟方法研究了地应力与渗流应力耦合作用下的帷幕及边坡稳定性,提出了边坡安全与帷幕注浆参数;开展了帷幕注浆堵水技术研究并分析了现场实施效果。

本书是著者在系统总结有关研究成果的基础上参考有关资料编撰而成的。在编写过程中,得到了河北省自然科学基金(E2015209260)和华北理工大学等多方的大力支持,在现场调研和测试等方面得到研山铁矿的大力支持和帮助,项目课题组成员和研究生刘琳、宁连广、冯海明、王梅、李跃龙等参与了部分室内试验、现场测试及部分文字整理工作,在此一并表示衷心感谢!

由于著者水平所限,书中不妥之处,恳切希望读者批评指正。

王志国

2016年5月于唐山

目 录

1 绪论	1
1.1 课题研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 帷幕注浆技术研究现状	2
1.2.2 岩石破裂机理研究现状	4
1.2.3 边坡稳定性研究现状	7
1.3 本书的主要内容	10
2 研山铁矿注浆堵水帷幕工程概况	11
2.1 矿山工程地质概况	11
2.1.1 工程地质概况	11
2.1.2 矿床与围岩构造	12
2.1.3 矿山开采技术条件	13
2.2 水文地质概况	13
2.2.1 区域水文地质	13
2.2.2 矿区水文地质	14
2.2.3 露天采场东帮水文地质条件	15
2.3 注浆堵水帷幕情况	16
2.3.1 矿区东边坡现状	16
2.3.2 矿区东边坡地层分布	17
2.3.3 注浆堵水工程概况	18
3 边坡岩土体基本物理力学性质研究	21
3.1 室内岩石力学实验	21
3.1.1 土力学实验	21
3.1.2 岩石力学实验	22
3.2 帷幕体基本力学性质试验	30

3.2.1 单轴抗压实验	30
3.2.2 单轴抗拉试验	31
3.2.3 剪切试验	32
3.2.4 帷幕体试件含水量测试	33
3.3 现场岩体力学测试	34
4 注浆帷幕体破裂机理试验研究	38
4.1 试验概述	38
4.1.1 加载设备	38
4.1.2 声发射系统	40
4.1.3 红外辐射监测系统	44
4.1.4 帷幕体试样制备	44
4.2 单轴压缩荷载帷幕体破裂特征研究	45
4.2.1 岩石单轴受压破裂声发射与红外辐射研究	45
4.2.2 帷幕体声发射演化规律	46
4.2.3 基于声发射定位的帷幕体裂隙空间演化分析	49
4.2.4 帷幕体红外辐射规律分析	60
4.3 三轴压缩条件下帷幕体裂隙扩展规律研究	63
4.3.1 岩石三轴压缩声发射试验研究	63
4.3.2 帷幕体声发射演化规律	64
4.3.3 基于声发射定位的帷幕体裂隙空间演化分析	68
4.3.4 不同围压下帷幕体破裂机理综合分析	76
4.4 帷幕体破裂演化的分形特征研究	80
4.4.1 岩石破裂声发射分形研究概述	80
4.4.2 分形维数计算方法	81
4.4.3 单轴压缩条件下帷幕体裂隙分维演化规律	83
4.4.4 三轴压缩条件下帷幕体裂隙分维演化规律	87
4.5 小结	92
5 注浆帷幕与边坡稳定性数值模拟研究	94
5.1 研究方案	94
5.2 计算模型	95
5.2.1 地质力学模型	95
5.2.2 计算模型	97
5.2.3 边界条件	98

5.3 选取模型参数	98
5.4 防渗墙设计参数论证	99
5.4.1 渗透系数的要求	99
5.4.2 高喷防渗墙的厚度	100
5.4.3 抗压强度	100
5.4.4 其他指标	100
5.5 建模过程	100
5.6 数值模拟结果分析	100
5.6.1 N24 剖面的模拟过程及结果分析	100
5.6.2 N26 剖面的模拟过程及结果分析	115
5.6.3 N28 剖面的模拟过程及结果分析	128
5.6.4 防渗效果与边坡稳定性分析	141
5.7 小结	146
6 研山铁矿帷幕注浆堵水技术实施与效果	148
6.1 帷幕注浆堵水试验	148
6.1.1 帷幕堵水试验	148
6.1.2 现场初步试验结果	151
6.2 研山铁矿帷幕注浆堵水技术	152
6.2.1 设计方案	152
6.2.2 设计参数论证	153
6.2.3 施工技术要求	153
6.2.4 工程质量检测方案及要求	154
6.2.5 方案适宜性分析	155
6.3 堵水效果现场监测分析	156
6.4 小结	157
参考文献	158

1.1 课题研究意义

司家营研山铁矿地处河北滦县,为鞍山式沉积变质铁矿床,属于司家营铁矿矿体北矿区,开采方式为露天;年设计露天采矿规模为1500万吨,服务年限30年以上,最终将形成高600m的露天边坡。研山铁矿东边坡东侧最大地表水体——新河纵贯本区东部边缘,露天采场开挖过后,新河水通过长约692m的第四纪全新统强透水层通道向采场大量涌水。新河以东约500m为滦河。为此,研山铁矿对该区进行了帷幕注浆,目前已完成帷幕工程,但效果还需评价;并且该区随采深增加及中部裂隙-岩溶富水层的揭露,边坡涌水量增加,边坡岩体强度减弱,潜在滑坡危险增加。

虽然已形成矿山注浆堵水帷幕,但随着开采深度和开采范围的增加,采掘活动将越来越靠近堵水帷幕。帷幕附近的开采活动必然引起帷幕及附近区域岩体的应力状态变化,从而影响帷幕的稳定性;随着开采深度的增加,帷幕内外也将产生较大水力压差,水力压差越高,帷幕受到的水的渗透作用越大,帷幕的稳定性也就越差;由于帷幕注浆区域附近区域水文地质条件比较复杂,注浆帷幕形成后要经受长时间地下水渗透和侵蚀,注浆帷幕是隐蔽性工程,受施工工艺的限制,堵水帷幕各处并不均匀,存在薄弱位置和相对不稳定区域;同时,由于帷幕嵌入基岩的岩体存在裂隙,会出现绕流问题,加重基岩渗水。因此,开展注浆帷幕及边坡稳定性的研究和实践,对于保证矿山的安全生产具有重要意义。

在正常生产条件下,如果帷幕的稳定性发生变化,必然是应力场变化所诱发的帷幕内部岩体微破裂萌生、发展、贯通等致使岩体失稳的结果。因此,在帷幕发生失稳破坏前,帷幕内部必然有微破裂前兆,而诱发微破裂活动的直接原因则是由开采活动及水力梯度变化引起的帷幕岩体内部应力场的变化。研究帷幕体在各种应力条件下的破裂机理,对于认识帷幕体失稳机理及进一步开展边坡稳定性分析具有重要理论意义。

研山铁矿采至深部后,东边坡将受到帷幕静水压力 and 下部裂隙-岩溶动水压力组合作用,高陡边坡稳定性成为安全高效开采的首要问题。

基于上述认识,本书以研山铁矿注浆帷幕为工程对象,对注浆区域现场采样,研究注浆体岩石的力学性质、透水性、声发射性质等,进行帷幕体破裂机理

研究,建立矿山地质及力学模型,分析帷幕注浆区域的应力场分布情况,开展帷幕及东边坡稳定性研究,以保障研山铁矿安全高效开采顺利实施。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 帷幕注浆技术研究现状

注浆堵水帷幕指的是在矿井水源方向或含水层,通过排孔注浆,浆材在孔中裂隙互相渗透,形成帷幕隔水墙,从而阻断水源的一种工程治水堵水方法。注浆技术在我国岩土工程领域的应用始于20世纪50年代末期,经过几十年的实践发展,矿区帷幕注浆堵水技术已经得到全面运用。我国已有近50多个矿山推广应用了帷幕注浆堵水加固技术,积累了丰富的经验,形成了一整套成熟、实用的矿山防治水技术方法^[1,2]。

1.2.1.1 帷幕注浆堵水技术应用的研究

该研究主要从工艺、材料等方面保证注浆效果,提高注浆质量,形成稳定的帷幕。从全国近50条矿区帷幕注浆工程看,其堵水率大多不高于70%^[3]。随着注浆理论与试验的研究及注浆堵水帷幕技术的不断发展,帷幕的稳定性有了显著的提高。近些年,矿山帷幕注浆堵水加固技术已由地面帷幕发展到井下帷幕,并逐渐发展成熟^[4]。济南张马屯铁矿采用以“帷幕注浆堵水为主,结合矿坑同水平完全疏干”综合治理技术方法实施帷幕注浆工程^[5]。水口山铅锌矿鸭公塘矿区大型帷幕注浆治水工程采用“地面-井下联合注浆帷幕治水方案”^[6]。中关铁矿基于水文地质条件复杂,其石灰岩顶板具有厚度大、透水性强、与区域地下水连通性好等特点,确定了地表帷幕注浆堵水、井下疏干排水的“以堵为主、疏堵结合”的全封闭帷幕单排注浆防治水方案^[7,8]。刘家沟水库帷幕灌浆试验采用“孔口封闭灌浆法”施工工艺流程^[9]。大红山矿帷幕注浆防治水技术的帷幕平面布置成半封闭式,并采用孔口封闭、全孔循环、自上而下分段的注浆方法^[10]。凡口铅锌矿帷幕注浆属于小裂隙强动水注浆,采取了隔阻浆液效果好、可泵性强的廉价材料,如谷壳、稻草等,掺杂在浆液中进行灌注,达到了降低水运载能力目的,并在水力梯度特别大的孔段调整浆液中水玻璃的含量,促使浆液更快地凝固^[11]。

近年来,有关注浆加固技术和方法的研究不断深入。如控制裂隙方向注浆法可在地基裂隙中人为地切割裂缝,灌入浆液^[12]。吴秀美^[13]通过试验研究了改性黏土浆的塑性强度及影响因素、比重与黏度、稳定性等性能,结果表明改性黏土浆液的沉降稳定性比水泥浆好,注浆堵水帷幕稳定。王军^[1]、祝世平等^[14]论述了利用无线电作孔间CT透视探测导水构造及监测注浆效果,寻找帷幕薄弱环节,进行有针对性的布孔和补注浆,评价帷幕的堵水效果。孟广勤^[15]研究了井下矿

体顶板灰岩注浆参数,特别是注浆扩散半径的确定及布孔和注浆方式。

1.2.1.2 注浆试验研究

由于岩土体地质环境的复杂性、注浆工程的隐蔽性,开展现场试验极为困难,室内试验成为注浆理论研究的重要途径。根据注浆岩体特征,注浆试验研究可分为裂隙岩体注浆试验、破碎岩体注浆试验和松散介质试验研究。

(1) 裂隙岩体注浆试验。程盼等^[16]进行了冲积层注浆加固试验,揭示了冲积层劈裂注浆机理及加固特性。Swedenborg 等^[17]研究了硬岩节理裂隙注浆前后的力学特征。李术才等^[18]开展了富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究。J. S. Lee 等^[19]采用合成材料模拟了三种节理情况下的岩体,研究了浆液在岩石裂隙中的渗透注浆强度问题。赵宏海等^[20]在裂隙岩体注浆模拟试验中,研究了裂隙宽度、注浆压力、水灰比等因素对浆液扩散半径、注浆后试件的抗压强度和渗透系数的影响规律。冯志强^[21]模拟了围压对岩体的渗流特征的影响,认为随着围压与浆液的渗透性成反比线性关系,渗透系数与液体黏度呈反比关系。

(2) 破碎岩体注浆试验。杨坪等^[22]开展了砂卵(砾)石层注浆试验,研究注浆压力、浆液水灰比等因素对注浆后结石体抗压强度的影响规律。谢猛^[23]模拟了现场注浆工艺,得到松散碎石体特性与注浆压力、注浆量、浆液扩散距离、浆液水灰比等注浆参数之间定量的关系。张伟杰等^[24]利用自主研发的三维注浆模型试验系统,开展了富水破碎岩体多孔分序帷幕注浆试验,获得了注浆扰动下岩体多物理场演化规律,探索了多孔分序帷幕注浆试验中浆液的扩散规律及注浆加固机理。

(3) 松散介质试验研究。Kleinlugtenbelt 等^[25]研制了三维注浆系统,可以量测注浆效率和由于砂体稠化和浆液渗出造成的排水效率。梁飞林^[26]等对松散体进行了模拟注浆试验,得出了浆液的扩散速度、扩散半径及其影响因素之间的关系;邹超等^[27]为确定注浆压力、注浆流量、注浆速度、时间、浆液的扩散半径等参数设计了两种实验开展研究;侯克鹏等^[28]对松散体试件进行室内灌浆加固试验研究,表明灌浆后松散体试件的强度及力学参数都有了显著的提高,浆液的配比显著影响浆液渗透范围和灌浆结石体力学特性。邹金峰等^[29]、Tirupati^[30]、钱自卫等^[31]建立了不同的模型试验装置,开展了不同被注岩体、注浆材料、地质环境条件下的模型试验研究,探索了浆液扩散规律。

1.2.1.3 注浆堵水帷幕稳定性研究

注浆堵水帷幕处在渗流、应力等多物理场条件下,开展注浆堵水帷幕的失稳突水机理研究对于合理设计注浆堵水帷幕工程具有重要意义。有关学者采用理论分析、数值模拟、现场试验等方法开展了帷幕稳定性、帷幕厚度选择等方面研究。

注浆帷幕稳定性与帷幕墙厚度关系密切,可通过理论计算、数值模拟等方法确定。高建军等^[32]从不同浆液材料所能承受的最大渗透比降角度出发研究相关幕体、幕厚所能承受的水头压力,给出了确定注浆堵水帷幕厚度的方法;黄炳仁^[33]以岩体力学和弹性力学为基础计算了业庄铁矿井下近矿体堵水帷幕的厚度。王亮^[34]采用抗渗标准、帷幕体抗压强度确定帷幕厚度,并采用数值模拟验证帷幕厚度选择的合理性。Fu Shigen 等^[35]利用数值分析的方法计算了喀斯特充填型矿床顶板帷幕灌浆厚度并分析了其稳定性。郝哲^[36]等在可靠性理论及注浆理论与实践基础上,给出了注浆工程中可靠性基本概念、可靠指标、注浆工程安全等级等,对帷幕注浆工程进行静态可靠性分析,建立了一套较完整的帷幕注浆可靠性分析系统。

随着数值模拟技术发展,采用数值模拟方法分析预测注浆帷幕稳定性的应用研究较多。刘琳等基于研山铁矿高富水特厚冲积层边坡帷幕注浆问题,采用 FLAC^{2D} 开展帷幕注浆稳定性分析与帷幕合理厚度选择研究^[37, 38]。徐磊^[3]以徐楼铁矿近矿体注浆帷幕为研究对象,运用数值计算软件 MIDAS/GTS-FLAC^{3D} 耦合建立简化数值模型,开展帷幕稳定性分析。袁博等^[39]运用 UDEC 软件研究破碎围岩体在注浆加固作用下的变形,呈现了施工扰动效应对相邻巷道及硐室群围岩稳定性的影响,得到了其变形规律。王兴^[40]、夏冬等^[41]结合中关铁矿注浆堵水帷幕工程,采用 COMSOL 软件开展了帷幕和开采区的渗流应力场分布、帷幕内围岩疏干排水引起的应力响应研究。付英浩等^[42]以深井巷道涌水区域为对象,建立了区域内的渗流场-应力场耦合地质力学模型,基于 COMSOL 有限元分析深井巷道涌水区域渗流场与应力场变化特点,开展现场深部帷幕注浆,有效地封堵了涌水通道。王刚^[43]运用 COMSOL 软件分析了影响隧道注浆加固圈堵水加固效能及其稳定性的基本因素,结合钟家山隧道对富水地层合理注浆加固圈参数进行研究,确定最优参数组合,提出适用于富水地层的帷幕注浆堵水加固方法。赵恰^[44]以地下水三维平台 Modflow 为工具,结合凡口铅锌矿,建立地下水三维模型,并以该模型为平台,开展了矿区地面帷幕的模拟与参数优化工作。

在上述研究中,对注浆堵水帷幕实施中的工艺参数及强度设计的研究较多,而对帷幕竣工后在使用过程中的状态及其变化的研究明显不足;对注浆堵水帷幕失稳机理的静态研究、室内研究多,而动态的、结合工程实例的研究则很少;对单一岩体的失稳破坏研究多,而对结构复杂的堵水帷幕体失稳破坏过程研究少;对注浆帷幕稳定性的研究主要集中于地下矿山,有关露天矿山的相关研究少。

1.2.2 岩石破裂机理研究现状

岩石力学研究最根本的问题是岩石(体)失稳破坏问题,岩石(体)失稳破坏会造成很多地质灾害,如突水、地震、冲击地压(矿震)、边坡失稳等,对

这些地质灾害进行有效的预测预报,一直是岩石力学界研究的重点、难点问题。随着科技的进步,对岩石失稳机理的研究手段不断得到改善,如利用光学和电镜扫描技术、光学透射方法、岩石红外遥感技术、X射线技术、CT方法、实时全息干涉技术、激光散斑、声发射技术以及数值模拟等手段,研究岩石失稳破裂全过程。在研究岩石破坏机理方面,很多力学理论被应用,如材料力学、弹性力学、断裂力学和损伤力学等。在此基础上,国内外学者提出了多种岩石失稳的理论和学说,如刚度理论、失稳理论、能量理论、强度理论、断裂损伤理论、突变理论及岩爆倾向性理论等。

(1) 岩石破裂损伤研究。岩石是包含孔隙、裂隙各种缺陷的脆性材料,近年来众多学者采用断裂力学、损伤力学、室内试验、数值分析等方法开展了岩石破裂研究,取得了不少成果。早期 Brace^[45]提出了二维裂隙滑移开裂模型。朱维申等模拟研究了雁形裂隙的扩展过程。朱维申、李术才等在双向荷载下模拟了雁形裂隙的扩展过程,提出了节理裂隙螺旋演化的等效模型和考虑裂隙螺旋扩展与损伤耦合的应变本构方程^[46-48]。

朱珍德^[49]研究了卸载后板岩裂隙微观结构参数的统计规律,模拟再现了卸荷后板岩微裂隙的空间分布。Latham J P 等^[50]采用 FEMDEM 方法模拟了远场应力下裂隙岩体裂隙网络的 3D 几何特征。张波等^[51]通过类岩石材料试件单轴压缩试验研究了含交叉多裂隙岩体的力学性能。

围绕岩石破裂过程则更多开展了损伤力学研究。刘建坡等^[52]建立了循环载荷岩石损伤和声发射关系的数学模型。张明等^[53]基于三轴压缩试验,结合统计强度理论和连续损伤理论建立了岩石统计损伤本构模型。杨永杰等^[54]基于声发射特征参数建立了岩石三轴压缩损伤演化模型。Martin 和 Chandler^[55]对花岗岩开展了单轴及三轴循环加、卸载试验,初步建立了内聚力、内摩擦角与损伤变量的关系。S. L. Qiu 等^[56]基于增量循环加、卸载试验对大理岩的峰前损伤行为进行了量化分析。

(2) 岩石破裂声发射定位研究。声发射定位能够反映岩石裂纹动态演化过程,也是岩样内部应力场演化过程的宏观表现,是深入研究岩石破裂失稳机制的基础。声发射定位技术已成为岩石破裂机理研究的重要手段。

岩石单轴荷载声发射定位研究。赵兴东等^[57]应用声发射及其定位技术、盖格尔定位算法,在单轴压缩载荷下,采用试验方法研究含不同预制裂纹的花岗岩岩样在破裂失稳过程中内部微裂纹孕育、萌生、扩展、成核和贯通的三维空间演化模式。王述红等^[58]开展了不同尺寸岩石在单轴压缩破坏过程中的三维定位声发射试验研究。裴建良等^[59]对取自锦屏 II 级水电站交通辅助洞的含自然裂隙大理岩岩样进行了单轴压缩条件下的声发射测试,并结合 AE 振铃数实现对不同空间分布类型自然裂隙时空演化过程的精确定位和追踪。

岩石三轴荷载声发射定位研究。Nasseri M. H. B. 等^[60]采用声发射源定位时空演化与 CT 扫描相结合研究不同三轴荷载下砂岩破坏机理。Ting A. 等^[61]基于三轴压缩围压卸载轴压加载试验,开展了煤岩试样声发射时空演化规律研究。左建平^[62]通过带有三维定位实时监测装置的 MTS815 试验机,实时监测了单轴荷载下煤体、岩体和煤岩组合体三者破坏过程的声发射行为及力学行为的关系,并获得了声发射三维空间分布规律。

岩石循环加卸载声发射定位研究。唐晓军^[63]、许江等^[64]通过对循环荷载作用下细粒砂岩声发射定位试验研究,分析了循环荷载作用下岩石变形破坏全过程的声发射时空演化特征及其损伤演化规律。赵星光等^[65]基于声发射定位监测,研究了深部花岗岩在三轴循环加、卸载条件下的损伤和扩容特性,通过分析岩石全应力-应变曲线与累计声发射撞击数和事件数的时空分布关系,揭示其破裂演化机制。

数值模拟与声发射定位相结合研究。Lei Xinglin 等^[66]为进一步认识高压渗流源下岩石裂隙和断层的不稳定性,采用声发射定位和数值模拟相结合的方法研究了包含石英岩脉的花岗岩试件的破裂演化特征。Cai M. 等^[67]采用 FLAC/PFC 耦合方法模拟了 Kannagawa 地下动力硐室的声发射传感器位置的声发射活动,与现场监测具有较好的一致性,观测的声发射活动可以用于评估岩石支护系统的有效性和硐室的整体安全。

Moriya H 等^[68]在现场声发射监测中,采用节理震源测定方法和双微分相对定位算法解析声发射定位图,较好地描绘了定位在采场工作面前方的高应力岩体中大型构造的破坏。

(3) 岩石裂隙网络分形几何研究。岩石内部存在微裂纹、微孔隙,在外荷载作用下表现出从无序到有序的扩展演化特点,具有典型的非线性特征。非线性理论分形几何适于描述裂隙网络分布等复杂性问题,分形理论可实现裂隙复杂结构的定量计算。谢和平^[69]采用分形理论对岩石材料的损伤、孔隙和粒子演化分布进行了大量研究,提出了分形损伤的概念,创立了分形-岩石力学。Wei Xiujun 等^[70]利用分形理论和数字图像技术研究了覆岩裂缝的分布和演化规律,建立了裂缝分维和覆岩压力之间的关系。Alireza Jafari 等^[71]利用分形几何定义了二维裂隙网络,并提出了一种新的裂隙网络渗透率的等效估计方法。Xie H.、Gao F.^[72]基于岩石裂纹分形分布和弱联系理论,考虑裂纹分布方位和裂纹发展不规则性影响,建立了复杂应力状态的岩石强度统计公式一般式。

一些学者采用分形理论开展了采动岩体裂隙网络演化的研究。谢和平等^[73]利用分形实验模拟了煤岩体开采过程中应力场、位移场的变化以及地表沉陷和移动规律,实现了裂隙复杂结构的定量计算与模拟。张永波等^[74]、王志国等^[75]利用相似材料模拟试验模拟了不同开采条件下采动岩体裂隙的分布规律,应用分形

几何理论研究采动岩体裂隙分布的自相似性及采动岩体裂隙网络演化规律。王金安等^[76]采用分形几何方法对 UDEC 计算得出的急倾斜煤层开采覆岩裂隙发育分布进行了分析。还有一些学者采用分形理论研究围岩采动裂隙分布规律,谢和平等^[77]、郜进海等^[78]研究了采动影响下巷道围岩裂隙的分形特征。

岩石裂隙网络分形几何研究为表征岩石损伤破裂过程力学行为奠定了研究方法体系,对于帷幕体破裂损伤非线性问题,分形是较好的分析方法。

(4) 基于声发射空间定位分形特征研究。Hirata T. 等^[79]发现花岗岩在三轴压缩破裂实验中的声发射源分布具有分形特征,揭示了其微破裂空间分布是一个分形;其在进行 Oshima 花岗岩三轴试验时,发现声发射震源分布具有关联分形特征,随岩石破裂呈降维趋势。雷兴林等^[80]开展了粗晶花岗闪长岩在三轴压缩变形条件下,声发射活动空间分布特征的实验研究,结果表明,声发射空间分布具有明显的自相似结构,粗晶花岗岩声发射分布还具多分形特征。刘力强等^[81]利用声发射测量系统,研究了三轴压缩下两种花岗岩变形过程中微破裂活动的时空分布。裴建良等^[82]提出了声发射事件空间分布的柱覆盖分形模型,基于瀑布沟水电站地下厂房花岗岩单轴压缩试验,对其损伤破坏过程中声发射事件空间分布的分形特征进行了研究。此后,开展了柱覆盖分形系列研究。Xie H. P. 等^[83]根据层状岩盐单轴压缩和劈裂声发射试验,基于三维柱覆盖分维计算方法,研究了试件破坏过程中声发射空间分布分维演化规律。Zhang R. 等^[84]将采用相关维数计算声发射时间分布分维与采用柱覆盖计算声发射空间分布分维相结合,研究了岩石声发射时空分布分形特征。

由上述研究成果可见,岩石破裂研究基于室内岩石力学试验,采用声发射定位技术研究其破裂损伤空间演化规律,并可采用分形几何理论进行非线性特征研究。帷幕体是在破碎岩体基础上注浆充填形成的复合介质,其力学性质区别于岩体材料,帷幕体破裂过程虽然不同于原来岩体的破裂,但其研究仍可采用岩石破裂的研究方法。

1.2.3 边坡稳定性研究现状

从边坡稳定性研究看,国内外相关研究较多,形成了很多成熟的研究方法与防治技术。常用的边坡稳定性分析方法有很多种,但综合考虑,可分为定性分析法和定量分析法。定性分析方法有地质分析法、经验类比法、结构分析法等;定量分析法有极限平衡法、数值分析法等。在很多研究中都将二者结合使用。其中定量分析法又可分为确定性分析法和不确定性分析法两种。不确定性分析方法包括可靠度分析模糊数学等,现在的发展趋势是由确定向不确定发展。

1.2.3.1 边坡稳定性的确定性分析方法

(1) 极限平衡法。该法是最经典,采用最多,也是目前最成熟有效的一种

方法。其引入莫尔-库仑强度准则,通过对潜在滑体的受力分析,根据滑体的力(力矩)平衡,建立边坡安全系数表达式进行定量评价。常用的方法有瑞典条分法、Bishop 条分法、Saram 法、斯宾塞法、摩根斯坦-普赖斯法和传递系数法等^[85]。

极限平衡法在边坡稳定性分析中的应用十分成熟。ATAEI M. 等^[86]基于 Hoek-Brown 破坏准则用数值模拟和极限平衡方法综合分析了 Chador-Malu 铁矿的边坡稳定性。Wael Alkasawneh 等^[87]利用包括极限平衡法在内的不同滑动面搜索技术得出了边坡稳定性的安全系数,通过比较得出,使用蒙特卡罗优化技术可以使极限平衡法分析边坡稳定性的可靠性大大提高。Malkawi A. I. H. 等^[88]基于蒙特卡罗方法的随机原理开发了一种边坡稳定性分析的自动搜索程序。Paul F. McCombie^[89]利用多楔体法分析边坡稳定性,充分考虑了在既不是圆形又不是标准平面上运动所发生的扭曲。刘立鹏等^[90]基于 H-B 强度准则采用极限平衡软件 SLIDE 分析了影响边坡稳定性的因素,建立了岩质边坡稳定安全系数分布图。宋义亮等^[91]采用赤平极射投影法开展某危岩体的稳定性分析,计算了边坡稳定性系数。张卉等^[92]应用块体理论矢量运算法,以实际边坡工程为例,通过结构面的空间位置关系分析和相应块体物理参数、几何参数研究,准确定位了目标块体及可能的滑动方向。

(2) 数值分析法。该法在 20 世纪 60 年代用于边坡稳定性分析中。它在处理非均质、非线性、复杂边界边坡时,通过计算机处理获得岩土体应力-应变关系,并能模拟边坡的开挖、支护及地下水渗流等,分析岩土体间及与支护结构间的相互作用。常用的方法有有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、离散单元法(DEM)、快速拉格朗日分析法(FLAC)、不连续变形分析法(DDA)、有限差分法(FDM)、无界元法(IDEM)和数值流行元法(NMM)^[93]。

随着计算机技术的发展,数值模拟方法广泛应用于边坡稳定分析中。D. V. Griffiths 等^[94]通过比较有限元方法和其他方法边坡稳定性分析实例,验证了有限元方法替代传统极限平衡法的可行性。E. C. Leong 等^[95]对新加坡的武吉巴督残积土边坡用二维、三维边坡稳定性分析软件 SVslope 软件重新进行了分析。尧红等^[96]采用 ANSYS 软件对岩质边坡进行了稳定性分析,分析得出了边坡的安全系数和破坏滑动面。殷德胜等^[97]采用动态有限单元法,模拟岩质边坡开挖过程,通过动态调整开挖面,实现边坡优化分析。蒋中明等^[98]采用 FLAC^{3D} 软件渗流分析模块研究降雨入渗条件下三维边坡渗流场的变化过程。谢振华等^[99]通过分析劈裂注浆机理,建立了不同浆脉长度和起劈宽度的分层多次高压注浆技术浆脉作用模型,并结合 FLAC 软件对分层多次高压注浆机理进行研究。刘天幸等^[100]针对节理化岩质边坡节理面发育的特点,在连续-非连续离散单元法的基础上,自主编程实现了随机结构面网格的有限元和离散元耦合计算模型;模拟分析了 2001

年发生的武隆滑坡,得到的结果与实际滑坡演化过程相吻合。孔不凡等^[101]将离散元法与强度折减法结合,分别对土质边坡和含结构面的岩质边坡的稳定性进行了算例分析。赵川等^[102]采用三维离散单元法模拟滑坡运动过程,并与有限元模型对比,验证了其合理性。

1.2.3.2 边坡稳定性的不确定性分析方法

虽然边坡稳定性评价方法已经取得了很大进展,但问题亦不少,无论哪一种评价方法本身都有它的适应性和局限性,因此加剧了新技术、新方法在边坡稳定性评价中的应用。近年来,随着现代数学、力学和计算机技术的发展,人工智能、遗传进化算法、数据挖掘、灰色理论、非线性力学以及系统科学等新兴学科的兴起,为我们提供了全新的思维方式和研究方法,为突破岩石力学的确定性研究方法提供了强有力的理论基础。边坡稳定性的不确定性分析方法出现于20世纪70年代初,常用的方法主要有可靠度评价法、灰色系统评价法、人工神经网络分析法(ANN)、遗传法模糊评价法及综合法等。

王思长等^[103]采用尖点突变理论对边坡的稳定性进行分析,建立了边坡稳定尖点突变力学模型。张宏涛等^[104]基于Winner的多项式混沌展开及塑性上限定理,建立了一种岩土参数随机分布下边坡稳定可靠性的研究方法,可以获取边坡临界滑面、边坡失效概率以及稳定系数。蒋水华等^[105]基于可靠度理论,提出了三维边坡可靠度分析的非侵入式随机有限差分法,实现了概率分析与FLAC^{3D}的有机结合,极大地简化了可靠度分析过程。P. Samui等^[106]用最小二乘支持向量机(LSSVM)分析边坡稳定性,改进的LSSVM的成效比人工神经网络的好,改善的LSSVM模型可以作为边坡稳定性分析工具。Chi Tran等^[107]利用遗传算法思想评价土质边坡稳定性。Lysandros Pantelidis^[108]运用岩石分类系统评估岩石边坡稳定性,确定了一般性的分类影响因素。Li Wen xiu等^[109]基于大量工程地质和土木工程测量数据的统计分析,采用模糊数学理论建立了露天金属矿岩石边坡稳定基本模糊模型。Wang Yajun等^[110]基于模糊自适应控制理论建立了模糊随机损伤力学模型。

1.2.3.3 边坡稳定现场观测方法

随着监测技术的发展,边坡稳定分析中也引入了较多实用的现场观测方法。Xu N. W.等^[111]利用微震监测和数值分析相结合的综合方法对中国西南锦屏一级水电站左岸高边坡进行了稳定性分析,2009年6月安装了微震监测系统,这是第一次在中国引进高陡岩质边坡稳定性分析技术。微震监测系统由数据采集单元、数据处理单元和三维阵列的单轴加速度计组成,监测结果与数值分析得到的潜在滑动面较为一致。隋智力等^[112]以杏山铁矿露天转地下开采为工程背景,应用现场声发射的监测方法,监测每次爆破时的能量大小以及信号的传播规律。易武等^[113]基于岩质边坡失稳声发射产生微观机理,通过岩石声发射试验和岩质边坡