

国家自然科学基金项目 (51374097) 资助

煤矿事故应急救援与影响控制博士人才培养项目资助

断层破碎带垮冒堆积体中 应急救援通道开挖理论与技术

张国华 郝传波 于会军 / 著

Theory and Technology of Emergency Rescue Channel

Excavation in the Collapse-Caving Accumulation Body about Fault Fracture Zone

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51374097)资助

煤矿事故应急救援与影响控制博士人才培养项目资助

断层破碎带垮冒堆积体中 应急救援通道开挖理论与技术

张国华 郝传波 于会军 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以灾后最易导致应急救援线路中断的断层破碎带巷道段垮冒堵塞为背景,在阐明断层破碎带地质特征、失稳垮冒空间特征、垮冒堆积体物理特征的基础上,进一步给出了堆积体边界抗力分布规律、堆积体内部块体自组织特征及块间作用力分布规律,给出了在堆积体中开挖救援通道的最优位置以及宜选的断面形状,进而结合工程实际,给出了三种较为适用的救援通道开挖技术、相应的适用条件和关键技术参数。

本书可为煤矿应急救援科技工作者和相关领域工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

断层破碎带垮冒堆积体中应急救援通道开挖理论与技术/张国华,郝传波,于会军著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3462 - 9

I. ①断… II. ①张… ②郝… ③于… III. ①矿山事故—救援—巷道掘进—研究 IV. ①TD77②TD263.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 026228 号

书 名 断层破碎带垮冒堆积体中应急救援通道开挖理论与技术
著 者 张国华 郝传波 于会军
责任编辑 姜志方
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 6.5 字数 125 千字
版次印次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在矿山灾后应急救援过程中,一般均将沿原有巷道开展救援作为第一线路选择。但灾后巷道失稳垮冒以至堵塞救援通道、阻断救援线路,势必会延长救援人员到达待援人员驻留区的时间,增加待援人员伤亡的可能。此时,如何能够安全快速通过堆积堵塞区,成为灾后能否实现安全、快速、有效救援的关键。

本书依托国家自然科学基金项目(51374097)——巷道垮落体中再造应急救援通道支护机理研究,以煤矿井下灾后安全、快速、有效开展应急救援为目的,以断层破碎带巷道段失稳垮塌堵塞救援线路为背景,首次系统地针对断层破碎带地质特征及垮冒特征、冒落堆积体力学特征、救援通道关键技术参数、救援通道快速开挖技术等开展了相关研究。

第1章主要阐明了本书所涉及问题的研究背景、内容、方案、技术路线等。

第2章以灾后巷道垮冒事故及应急救援案例为背景,分析了巷道垮塌堵塞对应急救援的影响特点。

第3章在分析断层破碎带的地质特征、垮冒堆积体特征的基础上,以最易导致巷道堵塞的破碎充填物、断层破碎带类型为背景,进一步分析了其冒空区空间特征,进而依据冒落自然平衡拱理论和弹塑性理论,推导出了沿巷道横截面延展方向上冒空区高度和两帮片帮滑移失稳宽度的计算公式,以及沿巷道延伸方向上垮冒堆积体的覆盖范围计算公式。

第4章在分析垮冒堆积体边界特征的基础上,给出了垮冒堆积体将空间充满所应具备的条件,进而将垮冒堆积体分成能够将空间充满和不能够将空间充满两种情况,从理论上分别推导出了垮冒堆积体的高度、边界水平抗力、堆积体中任意一点位置处的横向和纵向作用力计算公式,给出了堆积体边界上的水平抗力分布曲线,以及堆积体中任意横向和纵向剖面上块体间相互作用力的分布曲线,描述了堆积体内部不同区域内岩石块体的移动特征。

第5章在自制实验测定装置的基础上,实验室测定了细沙、块径为5~20 mm的煤块以及块径为20~35 mm的煤块三种堆积体介质在堆积过程中的水平抗力,验证了第4章所述理论的正确性,分析了水平抗力计算公式的适用性及适用条件。

第6章采用数值模拟的方法开展了相关研究,从避免和减少对堆积体维系块体之间力学平衡的扰动角度出发,给出了救援通道优选位置和宜选断面形状,并就

三种适用的支护方式,阐述了其应用过程中的影响因素,给出了其在选择时的参考性指标。

第7章结合工程实际以及应急救援快速、安全、有效的需要,针对交替式开挖形成技术,给出了棚子的间距、循环交替超前支护范围、超前支护体长度、超前支护体之间的间距确定方法;针对超前注浆开挖形成技术,提出借鉴锚注技术,以中空钢管代替中空锚杆,从而起到输送胶结材料和超前支护双重作用的指导思想,并给出了该技术的适用条件参考指标;探讨性地提出了强力顶管通道形成技术,设计了相应施工装置,给出了以上三种技术的各自适用条件等参考指标。

第8章总结了当前研究所获得的结论,并就未来研究提出了展望。

本书凝聚了本研究团队多年来的辛勤劳动和创新性学术思想,也得到了相关专家、学者和工程技术人员思想的启迪和大力支持,对他们一并表示由衷的感谢!同时,本书出版也得到了国家自然科学基金(51374097)的资助。

由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。同时,也恳请读者多予指导,以便开阔思维,进行后续深入研究。

作 者

2016年10月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 问题的提出及研究的目的意义	(1)
1.2 国内外研究现状、水平和发展趋势	(2)
1.3 研究内容、研究目标及拟解决的关键问题	(12)
1.4 研究方法关键技术路线	(13)
2 巷道垮塌及应急救援特点分析	(15)
2.1 巷道垮塌事故及应急救援实例	(15)
2.2 巷道垮塌堵塞对应急救援影响特点分析	(23)
2.3 本章小结	(24)
3 断层破碎带地质特征及垮冒特征	(25)
3.1 断层破碎带的地质特征	(25)
3.2 断层破碎带垮冒体堆积特征分析	(27)
3.3 断层破碎带内垮冒空间特征分析	(30)
3.4 垮冒堆积体在巷道内堆积覆盖范围分析	(33)
3.5 本章小结	(34)
4 垮冒堆积体力学特征理论研究	(35)
4.1 堆积体边界力学特征分析	(35)
4.2 垮冒堆积体内块体间作用力分析	(44)
4.3 堆积体内块体移动特征	(49)
4.4 本章小结	(50)

5	垮冒堆积体力学特征实验研究	(51)
5.1	实验装置与实验方案	(51)
5.2	实验数据采集与分析	(54)
5.3	本章小结	(62)
6	救援通道开挖模拟研究	(64)
6.1	救援通道位置确定	(64)
6.2	救援通道断面形状与尺寸确定	(69)
6.3	救援通道支护方式确定	(72)
6.4	本章小结	(79)
7	救援通道快速形成技术研究	(80)
7.1	交替式开挖形成技术	(81)
7.2	超前注浆开挖形成技术	(84)
7.3	强力顶管通道形成技术	(85)
7.4	本章小结	(87)
8	结论与展望	(88)
8.1	结论	(88)
8.2	展望	(90)
	参考文献	(91)

1 绪 论

1.1 问题的提出及研究的目的意义

我国煤矿 95% 以上属于井工开采。因人类对自然控制能力的局限性,当煤矿井下灾害发生后,作业人员本能的第一反应就是迅速撤离灾害危险区域^[1]。据煤矿事故统计和救援经验,井下重大灾害第一现场瞬间死亡人员比例不到 10%,其余绝大部分是因气体中毒、逃生路线阻断无法及时逃离、氧气逐步耗尽而窒息、救援通道受阻而长时得不到补给和及时救治等所致^[2-3]。从大量的井下灾后应急救援经验来看:灾后巷道失稳垮塌冒落是否造成巷道堵塞,致使救援受阻,从而延长救援人员到达待援人员驻留区的时间,以及如何能够安全快速通过堵塞段,已经成为灾害发生后能否实现安全、快速、高效救援的关键^[4-5]。

从目前国内外生产矿井井下正在使用的巷道来看,最易导致灾害发生后巷道垮塌失稳并堵塞巷道的地段应属地质破碎带,究其原因主要有两个:一是该地段巷道的围岩整体完整性和自稳性较差;二是在该地段开掘的巷道大多数采用被动的支护方式。在此条件下,一旦井下发生强冲击灾害致使被动支护体失稳,便会导致破碎围岩发生垮塌冒落以至堵塞巷道通路、中断救援线路的连锁效应发生。因地质破碎带巷道段的围岩完整性和自稳性较差,失稳垮塌巷道段的上覆破碎岩体向巷内垮塌堆积的补给性强,即随着失稳垮塌巷道段巷内垮塌堆积体的清理,上覆破碎围岩体随即冒落补充。如果在灾后应急救援期间遇到此类情况,救援通道的开挖与形成势必极为困难和耗时,同时,在救援通道开挖期间还会随时威胁开挖作业人员的人身安全^[6]。

基于以上分析,本研究以解决应急救援过程中的关键技术问题为出发点,依托国家自然科学基金项目(51374097)——巷道垮落体中再造应急救援通道支护机理研究,提出开展断层破碎带巷道垮塌堵塞段应急救援通道快速通过技术研究,旨在为实现煤矿井下灾后安全、快速、有效应急救援提供理论和技术支持。该研究不仅对应急救援具有重要意义,同时对矿井正常生产期间遇到类似问题的处理同样具有指导意义。

1.2 国内外研究现状、水平和发展趋势

截至目前,国内外关于地质破碎带垮塌段应急救援通道形成、支护机理等方面的研究甚少。对于地质破碎带的研究,均集中在巷道掘进期间破碎围岩的稳定性评价、巷道掘进支护、顶板冒落修复等方面。一是研究的目的并非为了灾后应急救援的需要,而是服务于正常生产的需要;二是所要形成的工程体的围岩也并非为垮冒之后的垮冒堆积体,而是破碎且处于原岩应力状态下的围岩;三是在开挖或修复时间上没有救援需要的那种时间上的要求。所有这些虽与本研究内容相关性不强,但仍有一定的借鉴意义和参考价值。

1.2.1 巷道垮塌方面的研究

郝传波等^[4-7]以巷道围岩严重破坏、应急救援线路被阻断为背景,分析了节理裂隙较为发育情况下巷道围岩破坏后形成的空间形状。应用矿山压力和岩体力学相关理论,确定了围岩垮塌并造成救援通道堵塞的判定条件。在此基础上,阐述了在未来研究垮塌巷道时应涉及的有关问题,并从安全、快速、高效救援的理念出发,针对煤矿井下灾后救援中常遇到的垮塌巷道,开展灾前巷道稳态评价、垮塌巷道等级划分、垮塌巷道与块状堆积体结构研究、垮塌巷道内救援通道快速形成技术研究,推导出了垮空区高度计算公式并分析了其影响因素。

1.2.2 施救技术方面的研究

针对灾后人员驻留区内待援人员的施救问题,刘腾飞等^[8]提出利用快速钻孔技术,尽快实施应急救援、输送救援物资维持受灾人员生命安全,需要及时通过垮落的巷道建立直达灾区的通道。通过分析钻探技术如何在垮落的巷道中的应用案例,为实现快速透巷、快速施救增加一条有效途径,并指出了该项技术的发展方向和前景。

周兴龙^[9]在分析了垮落巷道的坍塌现状的基础上,指出如果事故发生的巷道和工作面有设备、支护锚杆或支护金属网等,巷道的清理恢复将十分困难,普通的掘进、清砟机存在难于单独完成工作等各种特点。并经过对各种可能性的分析,研制开发了能对锚杆、金属网等进行剪切的液压剪,能对重物进行撬移的扩张器,能对救援通道进行快速支护的多级液压支柱,能对重物进行起重的救护起重气垫和能提供临时动力源的高压手动油泵。这些设备的成功研发,无疑对实施快速救援具有重要的工程意义。

李学来等^[10]多位学者借鉴煤矿井下施工大直径钻孔的经验,以近水平快速救

灾钻孔钻进工艺为背景,认为钻进过程中由于钻孔直径大,如何解决好岩粉、岩屑排出孔外的问题是实现快速、安全钻进的必要条件。据此,通过对水力排粉、风力排粉和长螺旋排粉三种排粉方式的计算、分析和实验,最终确定了利用螺旋钻杆钻进排粉是近水平救援钻孔成孔的最佳排粉方式。

宋元明等^[11]指出在实施煤矿救援时可采用钻探技术,即在人员被困区域勘查确定的基础上,可从人员被困区域的地表以车载钻机施救,也可以在井下应用坑道钻机由巷道壁向受灾区域钻进施救。同时,还进一步阐明了这两种快速救援方式必须具备的技术特点和使用条件。

1.2.3 岩石块体剪切滑移研究

针对岩石块体剪切滑移方面的研究,主要集中在破碎围岩、岩石块状堆积体如矸石山、坝体等方面。

左红伟^[12]在研究岩石块体滑动界面的剪切强度时,将滑动界面假设成一种具有黏滑抗剪强度的特殊界面,指出滑动面的抗剪强度介于初始抗剪强度和残余抗剪强度之间,并受其自身成分、力学特性及所处应力场的影响。在此基础之上,进行了大量的实验,建立了岩石滑动位移弱化抗剪时效公式,客观地描述了岩块的位移与受力之间的关系,同时,将其与用损耗理论推导的随位移摩擦抗剪强度公式进行了对照分析,得出了一些有益的结论。

韩文梅^[13]开展了影响岩石摩擦滑动的因素研究,从微细观层次对影响岩石摩擦滑动及其稳定性的机理进行了探讨。根据研究的需要,在自主研制相应实验台的基础上,针对石英岩、砂岩等十余种试样开展了大量的实验,获得了这些试样在不同含水率情况下岩块间的静摩擦系数、动摩擦系数以及岩块的滑动速度,确定了岩块组成、粒度、表面形态、节理裂隙分布等因素是影响块体间滑动的主要内因。与此同时,还得到了静摩擦系数与含水率之间的函数关系,以及块体间摩擦系数与节理裂隙发育程度和岩石粒度之间的关系。

王思敬等^[14]应用等效力学原理、位置矢量分析和虚功稳定性,对块体的力学性质和稳定性进行了初步的分析。

针对矸石山滑坡问题,李东升等^[15]对韦家沟煤矿堆矸区域地质情况和矸石山物质、结构特点进行研究,分析了水文地质特征、地质构造对韦家沟煤矿矸石山滑坡的影响,并对矸石山的稳定性进行了计算。通过分析矸石山的滑坡原因,得出卸矸冲水增大了堆矸体的重度、饱和度,降低了堆矸面的抗剪强度的结论。

董倩^[16]以典型矸石山为研究对象,对其矸石组成、成分、来源进行分析归纳,总结出堆积散体不同黏性的基本特征,并通过散体剪切实验,研究了应力状态、加载情况、孔隙率、散体力学性质和对抗剪强度的影响,得到载荷与散体位移之间的

对应关系,建立矸石山内部滑移塑性极限分析上限法,研究结果表明散体内摩擦角、坡面角比其它影响因素更为敏感。

王新民等^[17]以崩落矿岩散体局部本构关系为基础,应用统计学原理,通过主要的微观结构参量描述了影响散体力学特点的微观特征,建立了崩落矿岩散体的二维、三维本构模型,揭示了放矿过程中崩落矿岩散体的强度与流动本质,确定了颗粒接触点数目的变化以及颗粒之间空间位置的变化是影响崩落矿岩散体组构的一个重要因素。

贺可强等^[18]对大型堆积层滑坡剪出口实际受力条件进行了分析,最终得出大型堆积层滑坡剪出口的形成部位和条件可以根据斜坡的地质位移判据和剪出口形成的力学判据进行综合分析和预测。剪出口形成区的地表形变常为隆起形状,且有挤压破碎现象。对于平面滑移的剪出口,当坡角和坡体力学参数一定时,形成剪出口的极限下滑力大小主要由斜坡堆积层厚度决定,与厚度的平方成正比,由此可得到与实际情况吻合的滑坡面。

阎宗岭^[19]从岩石的破碎机理出发,建立了堆石体粒径预测模型,研究了堆积体的含水率对其最大干密度的影响,确定了堆积体密度与碾压次数之间的关系。从堆石体的组构特征出发以数理统计、实验室实验和现场观测为手段,研究了不同黏性堆石体的剪切模量、变形模量等力学特性和堆积体渗透性以及渗流速度的影响因素,把渗透率、平均粒径和粒径分布函数联系起来,得到了堆积体的孔隙率随应力的升高而升高、堆积体的压缩模量随着竖向压力的升高而升高的特点。研究还得到了堆积体压缩系数的特点及其影响因素,其特点是数值较小,一般小于0.1 MPa,并且随着应力的升高而减小。以数理统计为工具,得出了颗粒接触力的概率分布,建立了堆积体平均应力和接触力之间关系式和堆积体的刚性接触模型。应用有限元法对散体的成拱机理进行了研究,并分析了构筑物对堆积体的影响。

陈聪^[20]以典型堆积体水库为对象,通过调研、实验分析了堆积体的结构特征,确定了影响堆积体稳定性的主要因素。通过实验对大型堆积体的物理力学性质进行了研究,同时对堆积体的渗透特性进行了分析。采用数值分析法对蓄水后堆积体的渗流场进行了分析,研究了堆积体岸坡失稳机制,得出了水位高度变化过程中堆积体的稳定状况。

徐安权等^[21]将数字图像处理技术应用到堆积体的数值模拟中,将图像信号转换为数字信号,再经过处理转换为模型,具有建模快速、准确的特点,同时运用随机统计分析法对堆积体力学参数进行研究,以此来减少实验工作量,节约研究成本。

马炜^[22]研究了大量散体材料的宏观力学性能,提出了基于里兹(Ritz)法构造连续波函数的方法,为散体介质的动力学研究提供了一种新的思路和方法。将能量定义的恢复系数引入多刚体动力学局部柔化模型中,解决了由于刚体模型所造

成的非协调性困难,在理论和算法上避免了含摩擦的多刚体动力学所产生的多解和无解难题。通过离散元分析总结出不同冲击速度下的承载原因和集中参数模型。

1.2.4 破碎岩体物理力学性质实验研究

破碎岩体的物理力学性质实验,主要集中在以具体工程问题为背景,以探讨参数或相关影响因素之间关系为目的,对块(散)体的堆积体进行加载,以求获得相关渗透特性、变形特性变化规律。

马占国等^[23]利用自制的破碎岩体多相耦合蠕变实验装置,研究了饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙的变化规律。通过对不同粒径的破碎泥岩在不同应力水平下的蠕变实验,得到了蠕变过程中的孔隙率与时间的函数关系。实验初期,散体间相对位移量较大,压密后,块体尺寸变小,孔隙率降低,堆积体密度增加,最后逐渐稳定。在水平应力相同的条件下,粒径越大,蠕变过程中的孔隙比变化越大;粒径越小,则孔隙率变化也越小。

马占国等^[24]针对不同含水率破碎岩石的变形特点进行了实验研究。首先选用不同强度的煤岩试样进行破碎,在常温下浸泡,使之达到饱和状态,然后进行实验。通过对实验结果进行线性回归分析,得出压实过程中的应力—应变关系,在压实过程中破碎岩石的应力与应变之间近似呈指数关系,同时确定了破碎岩石粒径的大小和含水率对应力—应变关系的影响。通过实验得到:试样粒径越大,应变增长率越大,反之则越小。含水率越高,试件应变量越大;含水率低,则试件应变小。在煤岩试样中,煤的软化较为明显,在相同的载荷下,其变形量也最大,其次是页岩,砂岩的软化程度较低,应变较小。

刘玉等^[25]利用岩石力学实验系统及破碎岩石渗透仪等设备,对散体进行测试,根据实验得到的数据,绘制出了散体研石压实过程中的应力—应变曲线,分析获知其压缩模量在压实的过程中呈现增加趋势,变化曲线接近线性;在蠕变加载过程中,低应力阶段的压缩模量随应力的变化呈负增长,压缩模量逐渐减小。

李顺才等^[26]把工程中破碎岩体分为原位破碎岩体和堆积破碎岩体两种类型,当这些堆积体处于复杂应力状态时,其孔隙率、几何形状和尺寸等均呈现出明显的变化,并表现出一些新特征。针对这一特点,应用岩石力学实验系统结合破碎岩石渗透仪,对不同强度砂岩、灰岩、煤研石进行破碎,开展破碎岩石渗透特性测试。利用稳态渗透法及轴向位移控制法测定了不同粒径的破碎砂岩、煤研石及灰岩的渗透参数随孔隙率变化的曲线。实验表明:煤研石粒径越小,孔隙结构在水压作用下的重组效应越明显,随着孔隙率的减少,渗透率总体呈现减少趋势,同时颗粒的排列方式以及初始孔隙结构等对破碎岩体的渗透性也有一定的影响。

卜万奎^[27]对取自断层内的破碎灰岩、破碎砂岩、破碎泥岩,通过测试分别获得了其各自的渗透系数,并分析了轴向压力、岩样粒径、水流速度与渗透系数的关系曲线。当轴向压力小时,不同粒径的破碎岩石渗透系数差异很大,由此说明此时渗透系数的大小主要与颗粒尺寸和排列分布有关。随着轴压的增大,试样内粒径较大的颗粒岩石易于相互挤压变形、破裂,使原先的孔隙不断得到填充,各种粒径破碎岩石的渗透系数越来越接近,并趋于一个相对较小的数值。不同粒径的破碎岩石渗透系数与其压实状态密切相关,轴压增加后,三种破碎岩石的渗透系数均呈降低趋势。因此,断层内破碎岩石的渗透系数与岩样的粒度组构有关。断层内破碎岩石的渗透系数比同性的一般岩石要大1~3个数量级。在周边应力、块体粒径基本一致时,断层内破碎泥岩的渗透系数远小于灰岩、砂岩的渗透系数。

苏承东等^[28]利用自制装置对破碎砂岩、砂质泥岩和泥岩进行了压实实验,并分析了岩石强度、块径、压实应力对压实能量消耗的影响,以及岩石强度、块径、压实应力对碎石压实特性的影响。将碎石压实变形过程分为快速压实、缓慢压实和稳定压固三个阶段,碎胀系数随块径增大而增加,碎石压实后的残余碎胀系数与岩石强度、块径的关系不大,压实度是压实应力的函数,块径越大压实度变化也越明显,同时压实能耗随岩石强度增高而增大。

樊秀娟等^[29]针对无围压松散破碎岩石轴向承载后易发生横向流动的特点,设计了破碎岩石承压变形仪,利用摆锤杠杆式压力机提供载荷,对破碎砂岩做了相关蠕变实验,总结了蠕变变形与轴向载荷、破碎块径等之间的关系,得到相同块径岩样在不同载荷作用下的蠕变发展过程,以及不同载荷作用下不同块径岩样的稳定蠕变趋势。同时还得出了以下结论:在用金属缸筒进行实验时,试样不会出现加速蠕变阶段,大载荷破碎岩样的蠕变变形余量较小。在载荷较小时,随着载荷的增加,不同块径破碎岩样的稳定蠕变变形水平也逐渐接近。

黄先伍等^[30]利用实用新型专利——破碎岩石渗透实验附加装置与岩石力学实验系统,对取自徐州矿区的单轴抗压强度为57.5 MPa的砂岩试样进行了破碎砂岩的稳态渗透实验,得到了破碎岩石渗透特性的变化规律。实验结果表明:水在破碎砂岩中的渗流一般不服从达西(Darcy)定律,而服从福希海默(Forchheimer)关系;破碎岩石的渗透特性不仅与现今所处的应力状态有关,还要受加载历史影响。

孙明贵等^[31]利用MTS 815岩石力学实验系统进行了岩石的孔隙水压、渗透性等方面的研究,同时开发了一种破碎岩石与非固结多孔材料渗透实验附加装置。该装置可进行破碎岩石、混凝土和其它多孔材料的渗透实验,碎石的充填量和载荷可根据实验对象的性质确定,通过控制器采集和显示实验数据。此装置具有可靠性高、效率高、实验时渗流液体可随时排放等特点,同时还可以进行破碎岩石、混凝

土和其它多孔材料的压实实验以及蠕变实验。利用该装置,在常温时对不同尺寸的试件进行渗透实验,通过对所得数据进行回归分析,得到了试样渗透特性与载荷、颗粒直径之间的关系。

刘卫群等^[32]为了准确测定松散破碎岩体的渗透性,设计了气体渗透仪和测试系统,具有渗透功能的容器(高度 260 mm,筒外径 260 mm)上端有位移控制压头,其中心开有气流通道,底座中心也有弯曲通道,缸筒和底座间可进行拆卸,缸筒四周开有小孔,可通过换向阀切换气流通道。渗透仪设计最大孔隙气压为 10 MPa,最大加载轴压为 60 MPa。实验选取了特定单轴抗压强度和渗透率的砂岩岩样进行破碎,之后进行筛分。通过压力机控制载荷和位移,取四种粒径进行三次实验,实验测试数据主要有轴压、轴向位移和进出口压力。通过对实验结果的对比分析得到破碎砂岩的气体渗透率与完整岩体之间的关系,且在粒径尺寸相同时渗透率随压力增加而减小,近似呈负指数变化规律。在同一压力水平下,破碎砂岩的气体渗透率随粒径的增加有升高的趋势。与破碎砂岩的水渗透率相比,气体渗透率随压力的变化略显缓和。

肖勤学^[33]以四川华蓥山矿务局李子垭煤矿井口碎散高填方涵洞为工程背景,采用相似材料模拟方法研究了煤矿开采过程中的煤矸石堆积而成的高填方涵洞。首先制作模型,然后进行加载,并测量其内部变形和内力,观察碎散体的自然成拱情况和压力重新分布情况。在逐渐堆积过程中,随填方层高度的增加涵洞拱上压力增大,在不同埋深条件下,同一标高时拱上压力与两侧压基本相等;在缓慢堆积加载过程中,靠近涵洞顶处压力增长速度较小,在碎散体高填方层的表面修建多层建筑对涵洞的稳定性不会造成威胁。当涵洞拱顶的填方层厚度超过 5 倍涵洞宽度之后,能够形成自然平衡拱。

刘卫群等^[34]依靠自行设计的破碎岩石压实渗透仪,配合实验机,针对已知实验岩样的强度,确定合理的加载方案,对破碎砂岩进行了高压下的渗透测试实验,通过实验得到轴向载荷、轴向位移、水槽活塞位移、孔隙压等数据。对数据进行分析得出破碎岩体的渗透性特征,在相同压力状态下,粒径越小渗透系数越小,且随轴向压力增加而下降,同粒径混合状态的渗透系数最小。

陈占清等^[35]利用一种破碎岩石渗透特性实验系统,进行了饱和含水状态下石灰岩散体的蠕变—渗透耦合特性测试,先确定散体初装后的初始孔隙率,之后对岩样进行水饱和,逐级施加轴向载荷到设定值,计算出各采样时刻的孔隙率变化率,最后通过回归分析,得到了蠕变过程中孔隙率的变化率与当前孔隙率、应力水平之间的关系。研究表明:当前孔隙率越大,应力水平越高,孔隙率的变化率就越大。在不同应力状态下,关系函数中的各项系数取决于轴向应力与试样单轴抗压强度的比值。

孙国亮等^[36]使用新研制的堆石料风化实验仪,对某泥质粉砂岩堆石料进行了干湿循环、冷热循环、湿冷—干热耦合变化三种环境条件下的长期变形特性实验研究,探讨了堆石料长期劣化变形的机制。该实验是在压缩仪和直剪仪的基础上,增加温度和湿度控制器,通过冷热循环系统实现试件的加热与降温,通过干湿循环控制系统来改变实验的湿度条件。通过对实验结果进行分析,获得了干湿循环实验、湿冷—干热耦合循环均可以导致堆石体产生较大幅度的变形,干湿循环、冷热循环和湿冷—干热耦合循环都会引起堆石料的劣化变形的结论。研究结果表明:环境变化是导致高土石坝后期变形的重要原因。

1.2.5 破碎围岩巷道稳定性研究

李利平等^[37]研制了大型三维均匀梯度加载地质力学模型均匀梯度加载实验系统,该系统由三维组合式钢结构台架、均匀加载液压控制系统、多元信息监测系统部分组成。他们利用均匀梯度加载实验系统,以兰渝线两水隧道为工程背景,通过现场监测数据位移反分析及确定实验段及其围岩参数,采用光纤光栅传感器、压力盒等设备观测实验模型的受力和变形情况,进行了大跨度隧道采用全断面和台阶法开挖时围岩变形破坏特点研究。相似模拟结果表明:在超载过程中,围岩破坏区域呈渐进扩大趋势,在埋深增加过程中,支护段围岩位移增长率大于无支护段,应力和荷载增长率则相反。另外,还进一步研究了随着埋深的增加破碎围岩空间的变形机制和荷载释放演化规律^[38]。研究结果表明:软弱破碎围岩的低强度、流变性使围岩变形具有更强的时空效应;台阶法开挖对围岩扰动范围最小,全断面时扰动范围较大;无论采用哪种开挖方式,采用长距离推进时极易产生围岩坍塌。与此同时,实验表明:台阶法与大断面开挖法相比,更有利于控制收敛变形,而沉降变形相差不明显,从应力释放的角度来看,在上台阶开挖的过程中,拱部围岩垂向荷载急剧释放,而下台阶开挖过程中,边墙围岩的水平荷载产生了急剧释放。从扰动范围来分析,采用台阶法支护时,开挖掌子面前方 0.5~1.0 倍洞径范围内的围岩将受到扰动,而且大多属于荷载集聚区,是围岩稳定加固的重点区域。隧道围岩开挖过程中,断面荷载释放分为三个变化区,即掌子面附近荷载集聚区、掌子面前方荷载弱集聚区以及后方荷载释放区。同时指出,实施及时支护有利于掌子面及其附近围岩整体稳定。

肖同强等^[39]采用快速拉格朗日分析法(FLAC)数值模拟软件,针对与断层平行的回采巷道围岩破碎的工况,建立了计算模型,对含破碎围岩的巷道稳定机理进行了研究,并且对围岩应力状态的变化及分布形态进行了分析,结果表明:采用锚杆支护的方式能减少围岩应力降低速度,可以有效改善两帮及顶底板的应力状态,增强了破碎围岩残余强度,同时增加了围岩稳定性,提高了支护体的抗剪能力,对

近断层煤帮加强支护有利于控制围岩的稳定性。

邓超荣^[40]以破石界Ⅱ号隧道工程地质条件为基础,运用有限元软件从小间距隧道围岩稳定性及滑坡影响等方面进行研究,分析了环核心土开挖方法各施工步围岩应力、位移场变化特点,破碎围岩条件下小间距隧道之间的相互影响。研究结果表明:留核心土开挖方法可以有效地改善隧道底部围岩应力分布,拱顶沉降主要是由上部环核心土的开挖造成的,下部围岩开挖对拱顶影响较小;隧道间距越小,各自拱顶竖向位移越大;洞口滑坡体在隧道开挖过程中滑坡位移量不大;采用交叉中隔壁(CRD)法能及时对开挖部分进行初期支护,可以减少围岩的变形量,有效地控制拱顶的位移;受滑坡影响,初期支护承受很大的纵向拉应力,拱顶和拱底处出现应力集中。

顾铁凤等^[41]应用关键块体的力学基础理论,研究了顶板破碎岩体常见的“楔形块体”和“六面体块体”失稳准则、裂隙切割形成的块体属性岩体巷道的顶板失稳问题。为了研究方便,假设裂隙面为平面,裂隙面贯穿整个岩体,结构体为刚体,岩体失稳时沿结构面将产生剪切滑动。在以上假设基础上开展了裂隙围岩体巷道顶板可动性的赤平投影判别,以及裂隙围岩体巷道顶板块体的运动形式及关键块体的判别,给出了顶板关键块体的净滑动力、巷道失稳判据以及巷道支护强度设计公式。

李立波等^[42]通过多种手段实地测量和分析了破碎围岩环境下煤岩非对称变形特征。在破碎围岩条件下,巷道变形以受拉破坏为主,同时存在剪切破坏,拉破坏区域主要位于巷道顶部和底部,剪破坏区域位于巷道两帮,具有明显的非对称特征。当受到开采影响时,围岩内部裂隙发育,并以纵向和斜向裂隙的形式存在,定量确定了巷道松动范围、塑性区范围,并指出应对应力集中区域进行加强支护,防止应力集中部位变形量过大引起的围岩变形失稳。

刘小军等^[43]通过工程实例分析及隧道三维数值模拟分析结果,提出了浅埋偏压隧道破碎围岩的破坏模式。破碎围岩浅埋偏压隧道浅埋侧支护承受被动土压力,将隧道开挖后围岩分为滑塌区和被动区,在此基础上利用极限平衡法推导出了衬砌荷载的计算公式。

吕兆海^[44]通过工程调查法分析了破碎围岩环境下巷道的工程地质特征,采用理论分析法和物理模拟法研究围岩岩石力学性质,应用物理数值模拟分析研究了锚杆支护巷道的顶板稳定性。研究揭示了煤样从微观破裂孕育、产生、演化直至宏观失稳的过程,定量分析了采动影响条件下煤柱局部化损伤、变形与破坏情况。分析了羊场湾煤矿工作面的初次来压步距和周期来压步距,得出顶板软弱岩层厚度和强度对顶板下沉和破坏的影响也比较明显的结论,并给出了它们之间的关系。

刘钦^[45]针对天平山软弱破碎围岩大变形问题,深入研究了此类隧道的大变形

机理,并提出了相应的大变形综合控制技术。分析了软弱破碎围岩的力学特性,建立了蠕变本构模型,确定了蠕变参数,探明了超大断面隧道软弱破碎围岩施工过程中位移变化规律。同时,开展了软弱破碎岩体隧道施工过程的模型实验,进一步研究了隧道施工过程中掌子面挤出变形规律,并提出了软弱破碎围岩的累进性扩展和时间效应两大主要特征。

王俊光等^[46]通过现场调查、实验室实验和理论分析等途径研究了油页岩开采破碎围岩的变形破坏特征。

周进峰^[47]对如何识别地下断层破碎带,如何进行断层破碎带结构特征分析进行了研究,把断层破碎带露头模式分为派生裂缝、断面充填物、派生裂缝和断面充填物、上下对称的派生裂缝和断面充填物四种模式。得出断层破碎带地下四种类型,分别是派生裂缝—断面充填物—派生裂缝组成的对称结构断层破碎带、派生裂缝—断面充填物组成的非对称断层破碎带、不完整的断层破碎带、结构复杂的断层破碎带。

李少华等^[48]提出了一种新的断层破碎带建模方法,建模时以断层面的位置和断层破碎带的结构组合形式确定其处理方式。当断层面都在断层破碎带中间时,将含有破碎带的整个区域都表示为断层破碎带;当断层为不完整结构且断层面与上盘相连而断层破碎带边界与下盘相连时,可将与下盘相连的破碎带区域当作断层破碎带处理;当断层面具有完整不对称破碎带且断层面与下盘相连而断层破碎带边界与上盘相连时,可以将与上盘相连的破碎带区域当作断层破碎带处理。此方法能较好地描述断层破碎带的内部结构,提高预测的精度。

缪协兴^[49]把自然平衡拱看作维持巷道围岩稳定的主要因素,分析了任意介质中自然平衡拱的形态,研究了松散介质中巷道周边的稳定性,通过理论研究,得出了松散介质中的拱高计算公式,并合理地解释了自然平衡拱的存在和形成机理。

赵彭年^[50]认为井巷掘进后,由于顶板会形成拱形稳定结构,因此围岩的变形会趋于稳定,利用自然平衡拱状态可以大大节约支架材料。当考虑岩层构造应力时,自然平衡拱是椭圆的一部分,且自然平衡拱有两个形态,分别是低形态自然平衡拱和高形态自然平衡拱,对于矢高最小的拱,如果它能够处于平衡状态,那么对于其它较大矢高的拱也自然能够处于平衡状态。

范文田^[51]认为山体压力是隧洞衬砌上的主要荷载之一,其大小不但与岩石本身的物理力学性质及其构造有关,还与隧洞埋藏深度、断面尺寸及施工方法等有关。

方新主^[52]在普氏卸荷拱理论的基础上,提出了基底标高越高,则覆盖层厚度增大,洞室所形成卸荷拱的可能性加大,土的内摩擦角越大,则卸荷拱高度趋小,卸荷拱平均跨度变小,且自重变小,而土的极限抗压强度增大,则卸荷拱的承载力增