

伴随质量流失的破碎岩石 渗透性的加速试验研究

王路珍 孔海陵 著

非外借



科学出版社

伴随质量流失的破碎岩石 渗透性的加速试验研究

王路珍 孔海陵 著

科学出版社

内 容 简 介

本书对伴随质量流失的破碎岩石渗透性的加速试验进行研究,运用质量流失的观点解释了破碎岩体的渗流失稳现象。从溶蚀、冲蚀、磨蚀三方面分析了破碎岩体渗流过程中的质量流失率;基于遗传算法构建了破碎岩石加速渗透试验过程中渗透性参量和质量流失率的计算方法;描述了破碎岩体初始孔隙度、Talbot 幂指数、压力梯度等因素对质量流失率、孔隙度、渗透性参量及渗流失稳规律的影响;建立了考虑岩体质量流失效应的破碎岩体非 Darcy 渗流系统动力学模型,设计了相应的系统动力学响应算法,并开发了其计算程序;分析了破碎岩体非 Darcy 渗流场演化及失稳规律。本书内容可为煤矿隐伏陷落柱、断层突水灾害等事故的预测及防治方法研究提供参考,也可为隧道、堤坝等岩土工程中含堆积破碎岩体渗流失稳问题提供借鉴。

本书可供力学、采矿、岩土和地质等领域的广大科技工作者和高等学校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

伴随质量流失的破碎岩石渗透性的加速试验研究 / 王路珍, 孔海陵著.
—北京: 科学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-03-055221-1

I ①伴… II ①王… ②孔… III. ①溶蚀作用—渗透性介质—研究 IV. ①P512.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 274205 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 冯 钊 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 15

字数: 288 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

渗流力学是运用连续介质力学方法研究渗流现象的学科，它着眼于渗流的宏观过程，而不考虑渗透质的复杂空间结构及界面效应。在渗流力学创立的初期，人们忽略了渗透质的“挠性”，着重研究刚性多孔介质中液体/气体的流动行为。事实上，刚性的渗透质是不存在的，渗透质不仅具有挠性，而且质量常常发生迁移和流失。

在承压采煤过程中，随着工作面与陷落柱距离的减小，陷落柱及其附近岩体受到扰动后，应力场和渗流场发生变化，岩体裂隙网络和陷落柱内破碎岩体孔隙结构发生显著变化，形成水渗流通道。陷落柱充水将沿围岩裂隙向工作面渗透，并伴随颗粒介质与水之间的不断溶蚀、冲蚀和磨蚀作用，引起颗粒迁移、流失，颗粒介质持续地被溶蚀、冲蚀、磨蚀以及迁移将导致陷落柱围岩孔隙度增大、渗透性增强。当迁移质量达到一定程度，破碎岩体中形成区域性贯通的管流通道，水流模式由渗流转变为管流，陷落柱由于水的渗流失去稳定性，即渗流失稳，引发突水灾害。

本书以伴随质量流失的破碎岩石渗流研究为切入点，对含陷落柱等构造破碎带的突水机理作粗浅的探索。陷落柱突水前，经历了长时间的质量流失，加速渗透试验是模拟陷落柱质量迁移和流失的有效手段。需注意，水在破碎岩石中的渗流并不符合 Darcy 定律，而是服从 Forcheimer 关系。破碎岩石渗透性参量除了随时间变化之外，还随孔隙度、渗透压力、渗流速度和迁移质量的改变而变化。由于采动过程中陷落柱与外界之间存在质量交换（迁移），采动后渗流系统的边界属于时变边界，故水在陷落柱中的渗流是变质量的非线性动力学过程。

本书对伴随质量流失的破碎岩石的渗透性进行加速试验研究，从水的溶蚀、冲蚀、磨蚀三个方面分析了破碎岩石质量流失的机理，基于遗传算法构建了破碎岩石加速渗透试验过程中渗透性参量和质量流失率的计算方法，通过变质量破碎岩石水流形态转变试验建立了水流形态转变条件，运用质量流失的观点解释了破碎岩石渗流失稳的机理。全书共分为 11 章，第 1 章为绪论，第 2 章为破碎岩石渗透过程质量流失原因分析，第 3 章为伴随质量流失的破碎岩石渗透试验系统研制，第 4 章为伴随质量流失的破碎岩石加速渗透试验参数计算，第 5 章为伴随质量流失的破碎岩石加速渗透试验，第 6 章为伴随质量流失的破碎岩石渗流系统中参数间的关系，第 7 章为伴随质量流失的破碎岩石中水流形态转变试验，第 8 章为伴随质量流失的破碎岩体渗流系统动力学模型，第 9、10 章为伴随质量流失的

破碎岩体渗流系统响应计算方法设计和计算实例,第11章总结了伴随质量流失的破碎岩石渗透性的加速试验研究得到的主要结论,并对后续拟开展的研究工作进行展望。

本书由王路珍和孔海陵共同执笔,统一校对。本书的第3、5、7章试验部分得到了王志飞、张公一和莘海德的协助,第4、6、9章的Fortran源程序编写和调试得到了陈占清教授的帮助。

本书的写作和出版得到了国家自然科学基金项目“伴随质量流失的胶结破碎岩体渗流失稳机理研究”(11502229)、江苏省自然科学基金项目“伴随质量迁移的破碎岩体渗流灾变机理研究”(BK20160433)、2016年度江苏省“青蓝工程”、2017年度江苏省政府留学奖学金、“盐城工学院青年拔尖人才”、盐城工学院学术专著出版基金等的资助。

本书得到了盐城工学院土木工程学院、盐城工学院科技处、盐城工学院人事处、中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室及中国矿业大学力学与土木工程学院等单位的大力支持和协作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳切希望同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2017年5月

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 研究内容	14
1.4 研究方法	15
第2章 破碎岩石渗透过程质量流失原因分析	17
2.1 破碎岩石之间的挤压碎化作用	17
2.2 水对破碎岩石的溶蚀作用	18
2.3 水对破碎岩石的冲蚀作用	20
2.4 细小颗粒对破碎岩石的磨蚀作用	21
2.5 渗流过程中破碎岩石质量流失机理分析	22
2.6 本章小结	23
第3章 伴随质量流失的破碎岩石渗透试验系统研制	25
3.1 研制背景及意义	25
3.2 功能及性能指标	26
3.3 试验系统的设计方案	28
3.4 试验系统的结构设计	35
3.5 试验系统的调试	42
3.6 试验系统改进的初步设想	42
3.7 本章小结	49
第4章 伴随质量流失的破碎岩石加速渗透试验参数计算	51
4.1 破碎岩样配比计算	51
4.2 孔隙度计算	52
4.3 流失质量计算	52
4.4 渗透性参量计算	53
4.5 伴随质量流失的破碎岩石渗透性参量计算程序	58
4.6 伴随质量流失的破碎岩石渗透性参量计算实例	78
4.7 本章小结	85

第5章 伴随质量流失的破碎岩石加速渗透试验	86
5.1 加速因子的确定	86
5.2 试验原理及方法	87
5.3 试样制备及试验方案	87
5.4 试验流程	90
5.5 试验结果及分析	91
5.6 试验的不足	115
5.7 本章小结	116
第6章 伴随质量流失的破碎岩石渗流系统中参数间的关系	118
6.1 质量流失率与孔隙度和时间的关系	118
6.2 破碎岩石质量流失率计算程序	121
6.3 破碎岩石质量流失率计算实例	132
6.4 渗透性参量与孔隙度的关系	141
6.5 本章小结	145
第7章 伴随质量流失的破碎岩石中水流形态转变试验	147
7.1 试验方案及流程	147
7.2 试验结果及分析	150
7.3 伴随质量流失的破碎岩石渗流失稳机理	171
7.4 本章小结	173
第8章 伴随质量流失的破碎岩体渗流系统动力学模型	175
8.1 破碎岩体渗流动力学模型概述	175
8.2 质量守恒方程	176
8.3 动量守恒方程	178
8.4 辅助方程	178
8.5 动力学模型	180
8.6 本章小结	182
第9章 伴随质量流失的破碎岩体渗流系统响应计算方法设计	183
9.1 变量间相互关系	183
9.2 计算流程	184
9.3 单元划分与物理量的表示方法	185
9.4 单元物理量计算方法	185
9.5 节点物理量计算方法	186
9.6 关于算法的几点说明	190
9.7 伴随质量流失的破碎岩体渗流系统动力响应计算程序	191

9.8 本章小结	202
第 10 章 伴随质量流失的破碎岩体渗流系统响应计算实例	203
10.1 定解条件	203
10.2 质量流失率的计算及分析	204
10.3 孔隙度的计算及分析	207
10.4 渗透性参量的计算及分析	208
10.5 渗流速度的计算及分析	212
10.6 压力的计算及分析	213
10.7 本章小结	214
第 11 章 结论与展望	215
参考文献	218

第1章 绪 论

在采矿工程领域,相似材料试验广泛用于模拟煤层开采过程中岩层的移动和破坏、露天矿边坡变形与滑动等过程。陷落柱突水过程也应采用相似材料试验(模型试验)来模拟,但由于如下原因,相似材料试验难以实现。

(1) 相似材料采用不同粒径的破碎岩石,颗粒之间的接触关系极其复杂,难以进行统计描述,岩石的应力无法计算,因此无法实现应力相似。

(2) 陷落柱颗粒之间存在或强或弱的胶结作用,而破碎岩石是松散结构,用松散体模拟胶结体是不妥的。

(3) 孔隙度和渗透性参量的量级相差甚远,陷落柱的孔隙度和渗透性参量分布极不均匀,而破碎岩石的孔隙度和渗透性参量的分布是近似均匀的。

加速试验是一种在保持失效机理不变的前提下,通过加大试验应力来缩短试验周期的试验方法,该方法提高了试验效率,降低了试验成本。在电子工业中,常用来测试产品的失效模式和寿命。

陷落柱从揭露到突水短则几天,长则几个月,在同等压力梯度下进行破碎岩石质量流失率和渗透性参量的测试,无论人力、财力或物力都无法令人接受,故开展加速渗透试验是非常必要的。

1.1 研究背景及意义

渗流力学是运用连续介质力学方法研究渗流现象的学科,它着眼于渗流的宏观过程,而不考虑渗透质的复杂空间结构及界面效应。在渗流力学创立的初期,人们忽略了渗透质的“挠性”,着重研究刚性多孔介质中液体/气体的流动行为。事实上,刚性的渗透质是不存在的,渗透质不仅具有挠性,而且质量常常发生迁移和流失。20世纪以来,人们开始关注变形对多孔介质渗透性的影响。近年来,少数学者和工程技术人员开始认识到质量迁移和流失对多孔介质孔隙度、渗透性参量及渗流场的影响。然而,究竟是什么原因造成了破碎岩石的质量流失,质量流失率与渗透剂、渗透质之间的物理、化学作用有何联系,这些基本的科学命题尚未引起关注。

破碎岩石渗流行为的研究因为解释陷落柱突水机理而兴起^[1]。陷落柱是华北煤田常见的地质构造,其内部含有大量不同尺寸的孔隙和不同发育程度的裂隙,渗透率较高。在渗透过程中,陷落柱中泥沙质细小颗粒随水迁移、流失,

这样陷落柱的孔隙度和渗透性参量随时间变化。质量流失过程持续到一定时间,水在陷落柱中的流动形态发生变化(即由渗流转变为管流),从而发生突水灾害。

目前,解释陷落柱突水机理的假说主要有两种:结构失稳说和渗流失稳说。结构失稳说认为陷落柱及其围岩结构破坏引发突水,渗流失稳说认为陷落柱内渗流失稳引发突水。

为了模拟陷落柱中水渗流的过程,人们开展了破碎岩石渗透性的实验室试验。一种值得注意的情况是,在现有的实验室渗透试验中,细小颗粒在几分钟内流失殆尽,而陷落柱从揭露到突水的过程长达几天甚至几个月。实验室试验的时间和陷落柱突水前经历的时间相差甚远,通常相差几千到几万倍,不具有加速试验的真正意义。只有将加速因子选择在恰当的范围内,破碎岩石渗透性的实验室试验才能为陷落柱突水灾害防治实践提供参考。

本书在分析破碎岩石质量迁移和流失机理的基础上,设计加速因子合理的伴随质量流失的破碎岩石渗透加速试验方法,并研制出相应的试验系统;通过Talbol 幂指数和初始孔隙度两个参量的合理选取,研究破碎岩石渗透过程中的质量迁移行为,从流动形态变化的视角解释陷落柱突水机理。本书的研究不仅对破碎岩石渗透试验技术的发展具有积极作用,对于促进采动岩体渗流理论在采矿工程中的应用和发展也有重要意义。

1.2 国内外研究现状

在破碎岩石的渗透过程中,原有细小颗粒和由于水的溶蚀、冲蚀和磨蚀作用新产生的细小颗粒在孔隙中迁移,并从边界处流失。质量流失造成岩石孔隙度、渗透性参量(渗透率、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数)发生变化,当质量流失发展到一定阶段,水在岩石中的流动形态发生变化,即由渗流转为管流,将发生渗流失稳。在保证质量流失机理不变的前提下,通过加速试验,在人力、物力和财力允许的条件下得到与实际相符或相近的质量迁移规律(即质量流失率、孔隙度、渗透率、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数的时变规律)、渗流场演化规律以及渗流失稳规律,这是本书的任务。为了完成此任务,需要掌握以下相关领域的研究进展:

- (1) 陷落柱突水机理研究和防治理论;
- (2) 破碎岩石渗透试验技术;
- (3) 破碎岩石渗透性影响因素和影响规律;
- (4) 水与破碎岩石相互作用;
- (5) 破碎岩石渗流非线性动力学行为;

- (6) 参量时变的微分方程（微分动力系统）的稳定性理论；
- (7) 动力系统响应计算方法。

1.2.1 陷落柱渗透特性及突水机理研究

陷落柱是在地下溶洞的基础上形成的，成因主要有石膏溶蚀说^[2,3]、重力塌陷说^[4-8]、真空吸蚀说^[9,10]和热液成因说^[11] 4种观点。可溶性岩层和良好的地下水通道是陷落柱形成的基本条件。

陷落柱的形态多样，按柱体中心轴线位置来区分，可分为直立型、弯曲线、歪斜型、扭转型等，其截面形状多为近圆形、椭圆形、弧形多边形等。陷落柱大小不一，直径最小的不到10m，直径最大的则超过了200m，高度也从几十米到几百米不等。陷落柱一般位于中奥陶统上部，与围岩的接触界面呈不规则的锯齿状。

陷落柱柱体内部混杂、堆积着各种大小不等的岩块，岩块表面有擦痕，有的岩块被磨光，并有泥质或硅质的薄膜。有些陷落柱内的破碎岩块被压实胶结，但都保持原有的岩性，松软岩层（如泥岩和煤等）都破碎成细小颗粒，呈粉末状或泥化；坚硬岩层（如砂岩和灰岩等）形成大小不一的岩块。破碎岩块都来自煤系地层或上覆其他地层，偶见陷落柱顶端有几米或十几米高的空穴^[12-15]。

与强含水层沟通、地下水有较大的水头压力和柱体内充填物压实胶结程度差是岩溶陷落柱导水的基本条件。

文献[16]将华北型煤田岩溶陷落柱划分为不导水或微弱导水型、导水型和强导水型；按突水特点区分，则可分为突发型、缓冲型和滞后型。

文献[7]将陷落柱从下到上依次分为奥灰岩块阻水段、“泥砾”堵水段、岩块碎屑盖压加强段。其中，奥灰岩块阻水段将向上的奥灰水的管道流变为岩块间的小股细流，削弱了动水能量；“泥砾”堵水段渗透率极低，抗渗厚度大，抗渗能力强，在陷落柱中充当“堵水塞”的作用；岩块碎屑盖压加强段在“泥砾”堵水段上方，对下方的“堵水塞”起到盖压增强的作用。

尹尚先等将陷落柱柱体从上到下分为空洞段、沉陷充填段、坠落充填段、弱富水段、石膏段、强富水段六段^[17]，并给出了不同层段的渗透系数。

岩溶陷落柱的突水特点可以概括为五点^[18]：①突水量大，来势凶猛，常冲破煤壁，溃入巷道，淹没矿井；②突出物量大，常淤堵巷道，冲出物的岩性有一定的分布规律；③突出物的岩性混杂，大小悬殊，突出物特征显著；④突水常引起周围奥陶系石灰岩水位大幅下降，发生地面塌陷；⑤突水时在突水区的奥陶系石灰岩水温有增高现象。

陷落柱突水时可根据不同的突水方式将突水通道分成三类^[18]：第一类，岩

溶陷落柱直接突水,故其本身就是突水通道;第二类,通过与岩溶陷落柱连通的小断层突水,即小断层为突水通道;第三类,通过与岩溶陷落柱连通的裂隙带突水,即裂隙带为突水通道。

陷落柱突水给煤矿生产带来重大安全隐患,其突水机理研究引起众多学者的重视。

理论方面,尹尚先等^[17-19]将富水陷落柱简化为无限大厚壁筒受均布压力,将陷落柱突水分爲顶底部突水模式(筒盖破坏)和侧壁突水模式(筒壁破坏),利用弹性力学薄板理论和结构力学剪切破坏理论等给出了富水陷落柱突水的理论判据。宋彦琦等^[20]建立了椭圆形厚壁筒模型,采用复变函数、弹塑性力学推导了陷落柱突水的临界判据。王家臣和李见波^[21]基于弹塑性力学、流体力学等相关理论,确定了陷落柱周边围岩受力以及弹塑性区域范围,给出了陷落柱的突水判据。许进鹏等^[22,23]运用极限平衡原理给出了陷落柱柱体活化导水的判据,分析了弱径流条件下柱体活化导水机理,并建立了相应的突水判据。Tang等^[24]建立了底板隐伏陷落柱突水的力学模型,运用厚板理论对底板隔水关键层进行了分析。

数值模拟方面,尹尚先和武强^[25]采用FLAC 3D模拟分析了陷落柱对煤层底板破坏形式的影响。宋彦琦等^[20]利用ANSYS验证了陷落柱受到均布力作用时应力分布的解析解。杨天鸿等^[26]、朱万成等^[27]利用COMSOL对陷落柱突水过程进行了模拟,分析了工作面突水通道的形成过程及演化规律。李连崇等^[28]利用RFPA研究了含隐伏陷落柱煤层底板在采动和高压水作用下突水的全过程,揭示了煤层底板下隐伏陷落柱的滞后突水机理。王家臣和杨胜利^[29]应用FLAC 3D对强充水、不充水和煤层底板中赋存陷落柱条件下的破坏过程进行了模拟,分析了陷落柱及其围岩应力、应变和塑性区的变化。

试验方面,王家臣等^[30]利用模拟突水的实验平台再现了底板和过煤层两种不同陷落柱的突水过程。研究表明,陷落柱周边的塑性区在采动时不断扩大,并逐渐与工作面前方形成的塑性区相互贯通,形成突水通道。项远法^[31]通过对华北地区强含水岩溶陷落柱突水事例的分析和实验室模拟试验,认为自然水力压裂效应是强含水岩溶陷落柱突水的重要原因。

以上研究将陷落柱突水与采动围岩相联系,忽略了陷落柱自身的结构特征。陷落柱柱体内主要是由破碎岩块及泥沙自然堆积,孔隙度高,孔隙及裂隙结构复杂多变,从陷落柱柱体本身渗透特性展开研究的报道鲜见。

1.2.2 破碎岩体非 Darcy 渗流研究

1856年,Darcy^[32]通过水在直立均质砂柱中的渗透实验,总结出了著名的Darcy定律

$$V = -KJ \quad (1-1)$$

式中, V 为渗流速度; K 为渗透系数; J 为水头梯度。

Darcy 定律描述的是线性渗流, 采矿工程和其他岩土工程中常常遇到非线性渗流问题。事实上, 自然界和工程结构中的渗流几乎都是非 Darcy 渗流, 这是因为客观世界本来就是非线性的, 线性只是一种近似^[33]。

破碎岩体是采矿工程中典型的多孔介质。国内外很多学者对破碎岩体的非 Darcy 渗流行为进行了深入的研究。

1) 堆石体非 Darcy 渗流研究

堆石体的骨架通常远大于砂砾, 其孔隙度也远大于砂体的孔隙度。试验表明, 仅当流速很小时, 堆石体中压力梯度和渗流速度才呈线性关系, 即服从 Darcy 定律。而实际中的堆石体, 在上下游水头差作用下, 其内水流具有一定的流速, 多数情况下, 压力梯度和渗流速度成非线性关系。因此, 在非承压状态下, 由于粒径和孔隙度较大, 堆石体渗流属于非 Darcy 渗流。

20 世纪初, 国外已有不少学者对堆石非 Darcy 流的渗透性进行了大量的试验研究, 以试验为基础, 总结归纳出非线性渗流的一系列计算公式。

P. H. Forchheimer 最早于 1901 年提出非 Darcy 渗流的基本公式为

$$J = aV + bV^2 \quad (1-2)$$

Lomize^[34]建立了平行毛管模型来模拟破碎岩体中的裂隙。此后, 包括瞬态法、稳态法等测试方法开始被应用于破碎岩石的渗透试验。

Polubarinova-Kochina^[35]在式 (1-2) 的基础上, 提出非稳定、非 Darcy 渗流的基本公式为

$$J = aV + bV^2 + c \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1-3)$$

式 (1-2) 和式 (1-3) 中, a 、 b 、 c 是与堆石块的形状、直径、孔隙度和流体性质等相关的函数。

根据试验效果, Winlkins^[36]和 Johnson^[37]则提出了非 Darcy 渗流的另一种形式:

$$\begin{cases} J = aV^m \\ V = KJ^b \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, K 、 b 为系数; m 为渗流指数, m 取 1 ~ 2。

不少学者致力于式 (1-2) ~ 式 (1-4) 中系数的研究, 先后给出了非 Darcy 渗流的各种经验公式^[38], 如 Scheidegger 方程^[39]、Ergun 方程^[40,41]、Burke 方程^[42]、Rumer 方程^[43]、Irmay 方程^[44,45]、Bachmat 方程^[46]、Blick 方程^[47]、Ahmad 方程^[48]、Carman 方程^[49]、Ward 方程^[50]等。

除了非 Darcy 渗流表达式的研究外,学者还进行了堆石中渗流状态的研究。

Kogure^[51]利用常水头渗透仪进行了不同水力梯度下破碎岩石渗透试验,发现堆石体渗流由层流状态转入紊流状态存在某一临界水力梯度,并给出临界水利梯度和有效粒径的关系式。Zoback 和 Byerlee^[52]对地震产生的高度破碎的方解石变形行为及渗透特性进行了试验研究。Mc Corquodale 等^[53]对大范围粒径的破碎岩石和卵石进行了 1000 多次的渗透试验,得到各组粒径的破碎岩石渗透的水力传导系数(渗透系数)的无因次方程。Stephenson^[54]进行大量试验,定义堆石体渗流雷诺数为

$$Re = \frac{Vd}{\varphi\mu_0} \quad (1-5)$$

式中, V 为渗流速度; d 为石块尺寸; φ 为孔隙度; μ_0 为流体运动黏性系数。通过试验总结得出在雷诺数较大的情况下,水力梯度与流速的平方成正比;在雷诺数较小时,水头损失与流速的 1.85 次方成正比。

Martins^[55]、Nicholas 和 Catalino^[56]、Leps^[57]计算了堆石结构在雷诺数大于 300 时紊流的平均流速,研究了颗粒尺寸、级配、渗流截面对堆石渗流的影响,并对渗流时的稳定性等进行了评价。

Kumar 和 Vankataraman^[58]借助渗透仪装置研究了粗颗粒破碎岩石非 Darcy 流动的收敛速度(达到稳态流动所需的时间)。

Legrand^[59]通过试验得到了破碎岩石渗流过程中的压差,并利用毛细管模型和一个特征长度为渗透率平方根的模型进行了分析,通过对比,得到了模型之间结构参数、雷诺数、摩擦因子的关系式。

理论方面, Hansen 等^[60]应用一维非 Darcy 渗流方程分析了堆石坝的二维渗流问题。Izbash 和 Leleeva^[61]研究了不同渗流条件下水渗流的特性及低堆石坡的渗流阻力。数值计算方面, Nakagawa 等^[62]开发了一个实用程序来预测堆石坝在建设和蓄水期间的墙内孔隙压力。Mc Corquodale 和 Nasser^[63]对堆石非稳态、非 Darcy 流动的各种数值计算方法结果进行了比较。Volker^[64]用有限元法计算了堆石二维非 Darcy 渗流问题。

中国学者考虑堆石体颗粒尺寸、孔隙结构及含水饱和度等因素,对堆石体的渗透性进行了研究。徐天有等^[65]对粒径 5 ~ 80mm 的碎石进行试验,研究了孔隙率、颗粒几何尺寸和流动状态的关系。邱贤德等^[66,67]研究了粒径对碎石渗透特性的影响。高玉峰和王勇^[68]对不同饱和方式与泥岩含量的堆石料进行渗透试验,得到泥岩含量、饱和方式与渗透系数的关系。Wang 等^[69,70]通过对含水量为 0.12% ~ 4.72% 的破碎盐岩进行低压和高压下的固结实验发现:在一定的压力和温度作用下,破碎盐岩在某一含水率(称为最佳含水率)下固结最快。胡去劣^[71]研究过水堆石体渗流问题时,把堆石体的孔隙通道近似地看作管道,并根据水流在该管道内的作用力与所受阻力平衡的条件,得到了水流在孔隙通道内的

堆石体颗粒雷诺数与渗流阻力系数之间的关系。郭庆国^[72]对粗粒土石混合料的工程特性和应用做了大量研究,分析得到破碎岩体的渗流规律符合 $v = KJ^m$ 关系式。李广悦等^[73]、丁德馨等^[74]选配了7组不同级配的铀矿堆石,建立了渗透率和流态指数的 ANFIS 模型。

此外,堆石体原位渗透试验及高压条件下管涌现象研究引起了学者的注意。赵海斌等^[75]采用原位试验法研究了坝基破碎岩石高压渗透特性,给出了管涌渗透破坏时的临界水力坡降的基本判据。数值方面,于留谦和许国安^[76]用有限元法计算了堆石三维非 Darcy 渗流问题。

以上关于堆石体的非 Darcy 渗流研究,多是在低轴压、小围压或轴压、围压不考虑的情况下,即基于固体颗粒为刚性^[77]或假设破碎岩石孔隙度不变的前提条件,研究对象处于非承压状态下,且没有明确涉及堆石体(破碎岩体)孔隙度的变化。

2) 承压破碎岩体渗流研究

在采矿工程中,随着煤炭资源开采不断向深部发展,破碎岩体作为承载结构往往承受较高的围压或轴压,在载荷作用下破碎岩体被逐渐压实。一方面,块石颗粒在外载荷作用下,克服颗粒间的摩擦阻力,产生滑动和滚动后移位到更稳定的平衡位置,孔隙体积压缩,岩体更加密实;另一方面,散体接触多为点接触,在外载荷作用下,触点应力很高,岩体棱角极易破碎,导致小颗粒充填孔隙,也使岩体更加密实^[78]。破碎岩体在压实过程中孔隙结构随之调整,孔隙度发生变化,孔隙度的变化直接影响破碎岩体的渗透特性,因此研究承压破碎岩石的渗流变化规律逐渐被重视,并取得了一些研究成果^[79]。

在试验方法和设备研究方面,刘玉庆等^[80]以 MTS815.02 型岩石力学试验系统为平台,设计了一种破碎岩石渗透试验系统,并介绍了试验原理。目前,基于该试验系统,完成的渗透特性测试中,可概括为两种方法,即载荷控制和孔隙度控制。前者在轴向载荷保持恒定的条件下测试不同渗流速度下的渗透性,后者是在孔隙度恒定的条件下测试不同渗流速度下的渗透特性(渗透率 k 、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数)。

孙明贵等^[81]利用载荷控制法测试了四种颗粒直径的破碎砂岩的渗透特性,采用二元九参数回归法得到渗透率 k 和非 Darcy 流 β 因子与轴向应力 σ 、颗粒直径 d 的关系,回归结果为

$$\mu/k = 0.242 + 1.18 \times 10^{-5} \sigma - 7.93 \times 10^{-3} \sigma^2 + 4.98 \times 10^{-4} (1/d) + 1.85 \times 10^{-6} (1/d)^2 + 1.65 (\sigma/d) \quad (1-6)$$

$$\rho\beta = -0.127 (\sigma d) + 1.43 \times 10^{-2} (\sigma d^2) + 4.17 \times 10^{-3} (\sigma^2 d) + 1.61 \times 10^{-4} (\sigma d)^2 \quad (1-7)$$

式中, μ 为流体的动力黏度; ρ 为流体质量密度。

刘卫群等^[82]、马占国等^[83-85]同样用载荷控制的方法测定了不同粒径破碎砂岩和煤在不同轴向应力下的渗透性, 分别给出了渗透系数随时间变化和随轴向应力变化的曲线, 并回归出渗透系数 K 与轴向应力 σ 的函数关系

$$K = a \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + b \quad (1-8)$$

式中, σ_0 取 1MPa; a 、 b 是与破碎岩体的块度有关的系数。

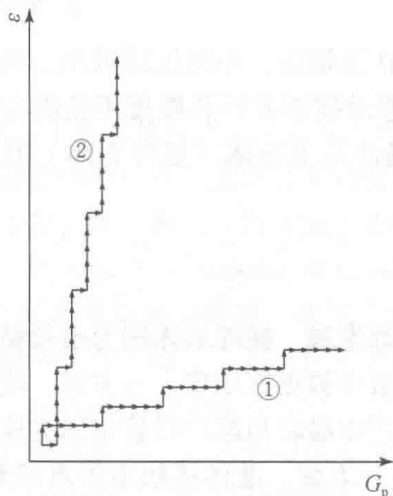


图 1-1 两种加载路径

黄先伍等^[86]、李顺才等^[87]、黄伟^[88]利用轴向位移控制(孔隙度控制)的方法测定不同粒径破碎砂岩、泥岩、灰岩、煤和煤矸石在不同孔隙度下的渗透特性, 并给出了破碎岩石的渗透特性随孔隙度(孔隙率)变化的曲线, 随着孔隙率的减少, 渗透率 k 的量级减少, 而 Darcy 流偏离因子 b 的绝对值量级增加。

王路珍等^[89]考虑了加载路径对破碎煤样渗透性参量的影响, 按路径①加载, 渗透率与孔隙度的关系宜用幂函数拟合; 按路径②加载, 渗透率与孔隙度的关系宜用指数函数拟合, 如图 1-1 所示。

缪协兴等^[90]讨论了 Forchheimer 型非 Darcy 渗流系统的分岔行为, 建立了系统失稳条件:

$$1 + \frac{4\beta k^2 \rho_0 G_p}{\mu^2} < 0 \quad (1-9)$$

式中, G_p 为水压梯度; μ 为流体的动力黏度; ρ_0 为流体的质量密度; k 为岩石的渗透率; β 为非 Darcy 流因子。

根据式 (1-9), Forchheimer 型非 Darcy 渗流系统失稳的必要条件是非 Darcy 流 β 因子小于零。因此, 非 Darcy 流 β 因子能否小于零成为评判渗流失稳理论的焦点。李顺才^[91]和李天珍等^[92]对破碎岩石非 Darcy 流 β 因子的正负号展开了讨论。Wang 等^[89]在考虑加载路径对破碎煤样渗透性影响时, 试验结果中也出现了非 Darcy 流 β 因子小于零的情况。这些讨论局限于岩性、孔隙度大小、颗粒尺寸和加载路径的影响, 未认识到孔隙结构的“挠性”和质量变化对破碎岩石渗透性和渗流场的影响。对于刚性骨架, 非 Darcy 流 β 因子没有理由出现负值, 但是在多次渗透过程中, 破碎岩石的孔隙结构发生变化, 非 Darcy 流 β 因子出现负值的可能性不可轻易否定。

Wang 等^[93]认为渗流失稳是流动形态的变化(渗流转变为管流), 利用自行

设计的渗透试验系统,进行了煤样的“液压击穿”试验,并给出了液压击穿时煤样中压力梯度 G_p^* 与孔隙度 φ 、粒径 d_g 的关系

$$G_p^* = (23.24d_g + 46.51)e^{-(0.0821d_g + 3.753)\varphi} \quad (1-10)$$

文献 [93] 还阐述了液压击穿与管涌的差别,认为液压击穿是柱状区域中固体材料瞬间被整体抛射出来,而管涌是由于固体颗粒被液体连续搬运造成孔隙连续增大直到形成连贯的通路。因此,管涌是渐变或缓变的过程,而液压击穿是突变过程(灾变过程)。由于流动形态的变化过程极其短暂,没有手段描述击穿前的质量流失的详细情况,故文献 [93] 未建立质量流失率、孔隙度、渗透率、非 Darcy 流 β 因子之间的关系。

3) 伴随质量流失的破碎岩石渗流研究

采矿工程实践表明,陷落柱突水前有少量泥沙涌出。泥沙的涌出意味着陷落柱细小颗粒的迁移和质量流失,故水在陷落柱内运移是伴随质量流失的渗流过程。这种现象启发人们开展伴随质量流失的破碎岩石渗流的研究。

白海波^[94]在研究陷落柱突水机理时提出了一种“塞子模型”。在这种模型中,破碎岩体孔隙度因为质量交换而变化,并给出了质量变化率的变化规律:

$$q_p = \begin{cases} \eta \frac{m_0(\varphi_0 - \varphi_c)}{T} & t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (1-11)$$

式中, q_p 为质量变化率; T 为质量变化的时间; m_0 为开始时刻的质量密度; φ_0 为初始时刻的孔隙度; φ_c 为破碎岩石颗粒的孔隙度(致密岩石的孔隙度); η 为反映总质量变化量的无量纲量。 $\eta = 0$ 表示破碎岩体与外界没有质量交换; $\eta < 0$ 表示质量从破碎岩体分离到外界; $\eta > 0$ 表示外界质量并入破碎岩体中; $\eta = 1$ 表示外界并入的质量使得塞子的孔隙度达到致密岩石的孔隙度。

姚邦华^[95]注意到了岩溶陷落柱由于溶蚀作用而产生的质量流失现象,研究了水对破碎岩石的溶蚀作用和水对破碎岩石中细小颗粒的搬运机制,根据试验结果给出了孔隙度演化方程以及渗透率随孔隙度变化的关系式:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \lambda (\varphi_{\max} - \varphi) Y q_l \quad (1-12)$$

$$k = k_0 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 \left(\frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi} \right)^2 \quad (1-13)$$

式中, λ 为比例系数; Y 为溶液中固体颗粒的体积分数; $\varphi_{\max}$ 为孔隙度极限。该文献中建立的动力学模型忽略了扩散作用,并且认为溶液的渗流服从 Darcy 定律。在岩样制作时,颗粒分为骨架和充填物 2 种,配比设置为 4 种,轴向压力设置为三级,根据渗透试验现象和试验结果,解释了破碎岩石渗流突变机制。

马丹^[96]对文献 [95] 的破碎岩石渗透试验系统进行了局部改进,选取 5 种