

王环玲
徐卫亚 著

致密岩石渗透测试与 渗流力学特性



科学出版社

致密岩石渗透测试与 渗流力学特性

王环玲 徐卫亚 著

科学出版社

内 容 简 介

本书以致密岩石的渗流力学特性为主题,介绍致密岩石渗透特性的试验测试设备、技术、方法和理论。通过开展大量典型致密岩石在不同条件下(不同围压、不同渗压、循环加卸载、渗流应力耦合等)的渗流力学特性试验,建立围压、渗压与渗透率和孔隙度之间的变化规律。通过试验论证气体在致密岩石中流动时存在滑脱效应现象。建立变形、屈服和破坏过程中致密岩石的渗流演化规律和渗透率演化概念模型。通过宏观和微观试验,探讨致密岩石的渗透破坏机制。

本书适于水利水电、矿山、交通、环境、石油和核废料处置等行业从事岩石渗流力学和工程的科研人员使用,还可作为高等院校和科研院所相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

致密岩石渗透测试与渗流力学特性/王环玲,徐卫亚著. —北京:科学出版社,2015.

ISBN 978-7-03-042815-1

I. ①致… II. ①王…②徐… III. ①致密砂岩-渗流力学-特性-研究 IV. ①P588.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 301350 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:177 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

致密岩石结构致密,导致流体流动速率较小,流量难以精确计量和测定,又不能简化处理为不透水或隔水体。致密低渗透岩石日益受到关注的另一重要原因是:在低渗透岩石中,其渗流运动规律偏离了达西定律,表现出非线性渗流特征,而且介质渗透率越小,非线性渗流特征越明显。长期以来,致密低渗透岩石的渗流规律以及渗流应力耦合作用特性的研究一直是岩石力学的前沿和热点课题。

在工程实践中,致密低渗透岩石往往是地下石油和天然气储存、CO₂ 储存、核废料处置的主要介质和地质环境,也通常是水利水电、矿山、资源能源开发等工程建设中常见的复杂介质。致密低渗透岩石是能源储备、环境保护、资源开发等重大工程实践中迫切需要加强深入研究的对象,已成为岩石渗流力学和工程建设十分重要且亟待解决的重大挑战。

在地下石油、天然气、CO₂ 储存工程和地下核废料处置工程中,如果没有充分考虑及认识低渗透岩石的渗流特点以及应力耦合作用规律,就不能采取有效的应对方法和措施,设计和评估其因地下渗流导致的安全问题。过去几十年来,许多学者在多孔介质渗透研究领域取得了大量的成果,但主要是针对可渗透岩石或高中渗透的岩石,对储存地下石油、天然气、CO₂ 和危险核废物比较优越的低渗透致密岩石,其渗流特性和渗流力学规律方面的研究仍然很少,国内外研究虽取得了一些进展,但还远远不能满足能源储备、环境保护、资源开发等实际重大工程实践的需要。在我国此类研究尚处于起步阶段,亟须开展大量的试验测试技术和力学理论的系统研究。

我十分欣喜地关注到近十年来,王环玲博士等的研究团队,专注于岩石渗流力学理论的研究,针对致密低渗透岩石力学测试技术和理论开展了系统的深入研究,取得了一系列的重要创新成果,对推动岩石渗流力学理论的进步作出了重要贡献。

理论源于实践,创新的理论成果又服务于实践,并在实践中得到升华。《致密岩石渗透测试与渗流力学特性》是作者们近十年来在水利水电工程、石油洞库储存工程、能源开发工程等实践中应对解决低渗透致密岩石力学问题而进行的创新研究成果。在重大工程实践课题和国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国际科技合作项目等的支持下,作者们合作开发的基于惰性气体的低渗透致密岩石渗流特性测试技术渗透率量级已达 10^{-24} m^2 ,并形成了相应的知识产权;进行了大量的各类致密岩石渗流特性、基本物理特性的测试,获得了海量的测试数据,提出了

有关致密岩石的概化渗流特性、基本物理特性的建议值;在大量试验研究的基础上提出了致密岩石渗流机制,讨论了致密岩石气体渗流的滑脱效应;开展了循环加卸载条件下岩石渗透演化规律的试验研究,分析了其微观作用机理,系统研究了渗流应力耦合作用下致密岩石渗透演化规律。这些重要成果既可以作为解决重大工程实践问题的理论依据,又是岩石力学领域的重要创新。

该著作从岩石渗透测试技术、渗流力学特性、渗流机制到渗流应力耦合规律等涉及低渗透致密岩石渗流力学的主要问题,进行了系统的阐述,是岩石力学领域近年取得的重要理论成果,不仅具有重要的理论意义,相信也将有益于资源能源开发、重大工程建设的实践。

非常乐意推荐该著作的出版,谨此为序。

王恩敬

中国工程院院士

2014年12月于北京清华园

前 言

致密岩石是进行地下石油和天然气储存、CO₂ 储存、页岩气储存、核废料处置的主要介质和地质环境,也是水利水电、矿山和隧道等工程建设中常见的一种复杂介质。致密岩石的主要特征之一是结构致密,导致流体流动速率小,在一定程度上制约了其渗流规律的研究。致密岩石的渗透特性目前已成为能源储备、环境保护、资源开发等重大工程中迫切需要加强研究的对象。

致密岩石的研究日益成为学科研究的前沿和焦点的原因之一在于,学者们认为其渗流运动规律偏离了达西定律,表现出强烈的非线性渗流特征,而且介质渗透率越小,非线性渗流特征越明显,这一现象日益受到关注和重视。如果没有充分考虑和认识致密岩石的渗流特点以及与应力耦合作用规律,就不能采取有效的方法和措施,设计和评估因渗流导致的工程安全问题。

致密岩石被界定为孔隙度小、渗透率低、岩石平均孔隙半径小的结构致密的一类岩石。因而,此类岩石不仅关联其渗透行为,还和其孔隙大小和孔隙结构相关。孔隙度小于 10% 的岩石为低孔隙度岩石,孔隙喉道半径(简称孔喉半径)是以能够通过孔隙喉道的最大球体半径来衡量的,孔喉半径的大小受孔隙结构影响极大,若孔喉半径大,孔隙空间的连通性好,流体在孔隙系统中的渗流能力就强。渗透率低于多少可视为低渗透,不同的领域有不同的标准,地下水领域一般把低渗透系数的上界定为 $(100 \sim 1000) \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 低于该界限近似认为不渗透,石油工程领域,按照国际标准,渗透率小于 50mD¹⁾ 的油藏为低渗透,而在非均、低渗透、油质高黏度比较普遍的中国,把小于 1mD 的油藏称为超低渗透。核废料处理工程中,低渗透系数的上界限为 $(0.1 \sim 10) \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 。对致密岩石研究以及所涉及的试验测试、渗流以及渗流应力耦合问题的分析和认识,是随着岩体工程实践的发展而逐步发展起来的。

试验依然是研究致密岩石渗流特性的重要手段,渗流试验的关键依然是渗透率、渗流速度的测量方法、可靠性程度以及推求方法,主要应从增加渗流梯度、缩短试验时间、精确量取流体流量或者体积等方面入手。试验系统的稳定性、灵敏度和准确度也是需要关注的主要因素。

试验技术有气体测试和液体测试两种。液体测试时渗流试验需要的时间长,

1) 1D(达西) $\approx 0.986\ 923 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,下同。

且穿透能力有限,需要很长的时间才能达到稳定流速,对于有些致密岩石有时甚至无法进行试验,或者是难以测到可靠的流量和渗透率。气体测试方法则适用条件较宽,且能缩短渗透试验时间,可直接使用达西定律来计算其流量,在一定程度上提高了测量的精确性。因而,开发适用、可靠的试验测试技术和测试方法是研究致密岩石渗流特性的前提。

在渗流过程中,致密岩石渗透率和孔隙度随压力的变化规律,渗透率与孔隙度间的关系,也是掌握致密岩石渗透特性面对的问题。由于致密岩石的渗流特性在很大程度上依赖于其本身的孔隙微结构特征,开展致密岩石微细观孔隙结构特征分析,有助于认识和理解其渗流机理和规律。

岩石在变形和破坏过程中,岩石中的初始缺陷(裂隙、孔隙、杂质)会萌生、扩展、连通、成核,进而岩石的导流性质也将随之改变。岩石渗透率的大小是一个与细观裂隙的扩展、贯通以及宏观裂隙的形成密切相关的变化过程。致密岩石在渗流过程中存在着明显的渗流应力耦合效应,其耦合规律、耦合机理和耦合模型尚需系统地深入研究。

在分析现有致密岩石渗透测试技术、渗流特性、渗流应力耦合研究现状和发展趋势的基础上,结合近年来作者在此领域内取得的研究成果,本书重点论述致密岩石渗流测试技术、方法与原理;通过气体渗流试验研究,阐明典型致密岩石在应力状态变化过程中的渗流特征以及渗透率和孔隙度与围压的函数关系,提出了渗透率与孔隙度的关联方程;通过试验论证气体在致密岩石渗流过程中普遍存在滑脱效应现象,建立能真实反映致密岩石固有渗透属性的一种修正滑脱效应方法;开展致密岩石表面微结构的扫描电镜(SEM)分析和微裂纹的背散射电子(BSE)研究,讨论致密岩石的渗透机制;通过气体和液体渗流应力耦合试验研究,从应力、变形和渗透率关系曲线中阐述致密岩石的渗流演化规律,提出致密岩石在变形和破坏过程中渗透率演化概念模型,通过宏观破坏裂纹和微观断口 SEM 试验,探讨致密岩石的渗透破坏机制。

本书共 5 章。第 1 章为致密岩石气体渗透测试设备研发、测试技术方法和原理,其构成渗流研究的基础;第 2 章为致密岩石气体渗透特性试验研究,通过研究不同围压条件和不同应力路径下的渗透率和孔隙度变化规律,提出渗透率和孔隙度关联方程,讨论影响致密岩石渗流的机制;第 3 章为致密岩石气体渗流滑脱效应试验数据研究,论述滑脱效应产生的原因,研究气体滑脱效应对测量渗透率的影响,通过试验间接预测致密岩石平均孔隙半径;第 4 章为循环加卸载条件下渗透率演化规律试验研究,研究了循环加载和卸载过程中致密砂岩渗透率和孔隙度变化规律,提出渗透率和孔隙度随围压变化的函数关系,从微观结构 SEM 和微观裂纹 BSE 试验分析其渗透影响因素;第 5 章为渗流应力耦合作用下致密岩石渗流演化规律试验研究,研究耦合作用下的气体渗流和渗透破坏特征,重点阐述耦合

作用下液体渗流的应力应变和渗透率演化规律,提出了岩石变形和破坏过程中渗透率演化的概率模型,从宏观破坏裂纹和微观破坏断口 SEM 试验讨论渗流破坏特征。

本书的研究工作是近年来在国家和地方科技项目的资助下完成的,在此表示深深感谢。这些项目主要有:①国家“十二五”科技支撑计划项目:石油储备地下水封洞库工程安全技术(2012BAK03B04);②国家自然科学基金面上项目:低渗透岩石渗透特性测试及渗流应力耦合试验研究(11272113);③国家自然科学基金面上项目:岩石渗流应力耦合流变力学试验及本构模型研究(11172090);④国家自然科学基金青年基金项目:层状裂隙岩体流-固耦合作用下的变形机理与工程应用研究(51009052);⑤江苏省自然科学基金面上项目:低渗透岩石流-固耦合机理试验及数值模型研究(BK2012809)。

在十余年的研究工作历程中,通过系列的研究,形成了一个从事岩石渗流力学试验和理论研究以及工程应用的研究创新团队,培养了一批硕士和博士研究生。书中的部分成果已发表在 *Materials Letters*、*Physica B: Condensed Matter* 和《水利学报》等杂志上。感谢由作者指导的历届研究生们,其中包括王欣、左婧、孔茜、贾朝军、闫龙,他们对本书所涉及的试验研究和技术开发做了大量工作,研究团队的吕军硕士也为本书付出了辛勤劳动。书中也包含了部分学生的学位论文的有关成果。同时也特别感谢中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司在工程试验和理论研究方面给予的支持。还要特别感谢法国国家科研中心里尔力学研究所、法国里尔科技大学及法国里尔中央理工大学的邵建富教授和 Frédéric Skoczylas 教授的科技合作,特别是在试验测试设备研发、测试技术开发等方面给予的帮助。特别感谢河海大学王伟副教授、王如宾副教授在试验测试方法方面给予的建议和帮助。本书呈现了研究团队近十年来的主要研究成果,为致密岩石渗流特性和渗流规律的研究提供参考。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,望读者批评指正。

目 录

序

前言

第1章 致密岩石气体渗透特性测试技术方法	1
1.1 概述	1
1.2 致密岩石气体渗透特性测试系统研发	2
1.3 致密岩石气体渗透率测试原理与方法	3
1.3.1 准静态法测试原理与方法	4
1.3.2 气体压力脉冲法测试原理与方法	6
1.3.3 气体流量法测试原理与方法	10
1.4 致密岩石有效孔隙度测试原理与方法	12
参考文献	14
第2章 致密岩石气体渗透特性试验研究	15
2.1 概述	15
2.2 致密岩石孔隙度与渗透率测试试验方案与程序	15
2.2.1 渗透率测试试验(方案一)	15
2.2.2 渗透率和孔隙度测试试验(方案二)	17
2.3 围压作用下致密岩石渗透率演化特征(方案一)	18
2.3.1 不同围压下的渗透率变化特征	18
2.3.2 加卸载过程对渗透率的影响	22
2.3.3 加载过程中渗透率与围压函数关系	25
2.4 围压作用下致密岩石孔隙度与渗透率演化特征(方案二)	29
2.4.1 不同围压下有效孔隙度与渗透率变化特征	29
2.4.2 加载过程中渗透率与围压函数关系	31
2.4.3 加载过程中有效孔隙度与围压函数关系	33
2.4.4 有效孔隙度与渗透率函数关系	36
2.5 致密岩石渗透率影响因素	38
2.5.1 微观结构排列	38
2.5.2 微裂纹分布	39
参考文献	42
第3章 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究	44

3.1	概述	44
3.2	滑脱效应产生原因	45
3.3	气体滑脱效应试验方案	46
3.4	气体滑脱效应影响	48
3.4.1	致密岩石气体流动特征	48
3.4.2	孔隙压力对滑脱效应的影响	49
3.4.3	气体滑脱效应对气测渗透率的贡献	55
3.4.4	滑脱因子与绝对渗透率函数关系	57
3.4.5	滑脱效应与克努森数	59
	参考文献	63
第4章	致密岩石循环加卸载条件下渗透率演化规律试验研究	65
4.1	概述	65
4.2	试验方案和试样材料	65
4.3	循环加卸载作用下有效孔隙度随围压演化规律	68
4.3.1	初次加卸载过程中有效孔隙度随围压变化关系	68
4.3.2	多次循环加卸载过程中有效孔隙度与围压变化关系	72
4.4	循环加卸载作用下渗透率随围压演化规律	75
4.4.1	初次加卸载过程中渗透率随围压变化关系	75
4.4.2	多次循环加卸载过程中渗透率随围压变化关系	79
4.5	循环加卸载作用下渗透率与有效孔隙度变化关系	83
4.5.1	初次加卸载过程中渗透率与有效孔隙度变化关系	83
4.5.2	循环加卸载过程中渗透率与有效孔隙度变化关系	87
4.6	循环荷载作用下致密岩石有效孔隙度与渗透率演化影响因素	88
	参考文献	93
第5章	致密岩石渗流应力耦合作用下渗流演化规律试验研究	94
5.1	概述	94
5.2	致密岩石渗流应力耦合作用下气体渗流演化规律	95
5.2.1	试验设备与试验方法	95
5.2.2	不同围压作用下致密岩石气体渗流规律	97
5.2.3	不同围压作用下致密岩石气体渗流破坏特征	98
5.3	致密岩石渗流应力耦合作用下液体渗流演化规律	100
5.3.1	试验设备	100
5.3.2	不同围压和不同渗压条件下的试验方案及试验材料(方案一)	101
5.3.3	不同渗压条件下的试验方案及试验材料(方案二)	102
5.4	致密岩石液体渗流演化规律(试验方案一)	104

5.4.1	不同围压和渗压作用下的岩石应力-应变特征	104
5.4.2	不同围压下的轴向应力-应变与渗透率变化关系	107
5.4.3	不同围压下的体积应力-应变与渗透率变化关系	108
5.4.4	渗压对岩石强度参数的影响	110
5.4.5	不同围压和渗压作用下的岩石渗流破坏特征	111
5.5	致密岩石液体渗流演化规律(试验方案二)	114
5.5.1	不同渗压作用下砂岩应力-应变特征	114
5.5.2	不同渗压作用下砂岩渗流特征	116
5.5.3	渗透率演化规律和概念模型	120
5.5.4	不同渗压作用下的渗透破坏特征	122
参考文献		124
附录	常见致密岩石气体渗透测试结果	127

第1章 致密岩石气体渗透特性测试技术方法

1.1 概 述

致密岩石渗透特性测试是研究其渗流特性的前提。标准常规的测试岩石渗透特性的方法有液体测量法和气体测量法,两种方法都是基于达西定律,采用稳流技术(Jones et al., 1980; Zeynaly-Andabily et al., 1995; Dana et al., 1999; Davy et al., 2007)。液体稳流技术测量法的适用有一定的范围,当岩石的结构致密,液体流动速率小,通过岩样微小流量需要很长的时间才能达到稳定流速,长时间的试验过程增大了测量误差,也制约了致密岩石渗流规律以及渗流应力耦合规律的研究。1968年,Brace等首次提出了应用瞬时压力脉冲法测量Westerly花岗岩渗透率的测量方法,由于试验过程中监测的是压力而不是流量,高精度的压力测量比流量测量容易实现,同时压力可以实时测量,这一技术节约了不少试验时间,因此瞬时压力脉冲法后来被广泛应用于致密岩石渗透率的测量中(Brace, 1980; Bourbie, 1982; Jones, 1997)。

西南石油学院研究和发展了这种技术,并建立了瞬时脉冲试验装置(高家碧等, 1991),所得测试结果与美国岩芯公司的常规气体渗透率测试仪的测试结果比较接近,说明了使用这一技术可测试渗透率低于 10^{-17} m^2 的致密岩石。为了缩短渗透试验时间,并提高测量的准确性,开发研制了定水位法、定流量法和压力脉冲法进行测量的通用渗透试验装置(Zhang et al., 2000; 张铭, 2003)。但这些方法的测试精度如何,其测试结果与真实值的误差有多大,一直为人们所关注,尤其是当使用液体作为渗透介质,在致密岩石中需要很长的时间才能达到稳定流速,长时间的试验过程增大了测量误差。

由于液体稳流测试法的种种局限和弊端,实验室和现场试验进而采用气体测试法。使用气体测试,其优点为:①使用惰性气体,渗透介质不与岩石固体骨架发生化学作用,岩石能够保持其原有的物理化学特性;②气体渗透速度快,试验时间较短,避免了长时间的试验引起泄露、温度变化等带来的测量误差;③可以直接使用达西定律来计算其流量;④在一定试验条件下,可以完成不同饱和度岩石的渗透率测定。要解决致密岩石渗透测试问题,除了需要一套适用于致密岩石渗透特性测量仪器,还需要掌握合理的测试方法和对测试结果准确性的校正,才能得到相对精确的致密岩石渗透属性(王欣, 2013)。

1.2 致密岩石气体渗透特性测试系统研发

致密岩石惰性气体渗透测试试验系统由河海大学岩石力学实验室与法国国家科研中心里尔力学研究所共同开发研制。试验主体装置如图 1.1 所示。该试验装置围压的施加范围为 $0\sim 60\text{MPa}$, 高精度气体流量计的测量精度为 10^{-4}MPa , 渗透率测量有效值可达到 10^{-24}m^2 。

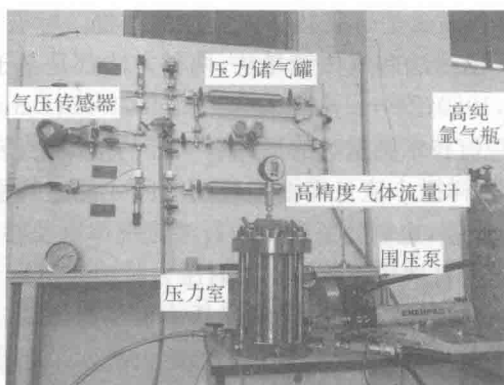


图 1.1 致密岩石惰性气体渗透测试装置

该试验装置由七部分组成, 结构示意图如图 1.2 所示。试验装置主要包括: 围压加载系统(1)、岩样压力室(2)、气体控制面板(3、4)、气压加载系统(5)、气压传感器(6、7、8)及高精度气体压力计(见图 1.3)。其中气体控制面板又由上游(4)和下游(3)压力储气罐、气体管道和阀门组成。通过调节围压加载系统(1)控制岩样所受围压。气压加载系统(5)可调节整个气体通道内的气压。

通过调节气体控制面板控制岩样上、下端面所受气体压力, 进而调节岩样所受孔隙压力。通过数据采集仪器可自动记录岩样上、下端面所受气体压力, 其中上、下游气体管道内体积分别为 0.2L , 上、下游压力储气罐体积分别为 0.5L 。高精度压力计可连接至岩样压力室上游出气端, 测量出气端微小的气体压力变化, 其精度达 $1\times 10^{-4}\text{MPa}$ 。

测试装置使用氩气为渗流介质, 氩气为惰性气体, 不与岩石固体骨架发生化学作用, 使得测量值能够保持岩样原有的物理化学特性。

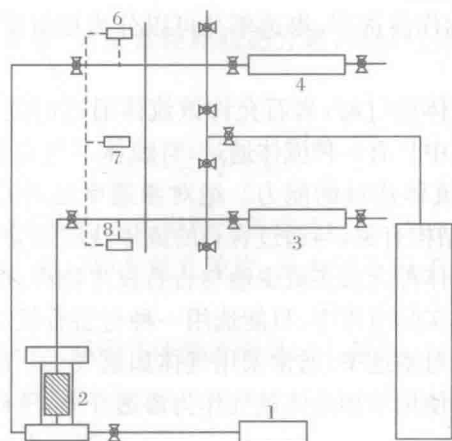


图 1.2 致密岩石惰性气体渗透测试结构图

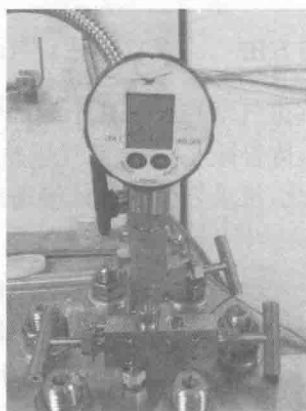


图 1.3 高精度气体压力计

1.3 致密岩石气体渗透率测试原理与方法

渗透率是多孔介质的一个重要特征参数,依据达西定律定义有

$$Q=KA \frac{h_1-h_2}{L}=\frac{k}{\mu} A \frac{h_1-h_2}{L} \quad (1.1)$$

式中, Q 为多孔介质过水断面流量(m^3/s); A 为多孔介质过水断面面积(m^2); h_1-h_2 为多孔介质上下游过水断面水头(m); L 为流体渗流路径长度(m); K 为多孔介质渗透系数(m/s); k 为多孔介质渗透率(m^2); μ 为流体黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

在一定的压差下,岩石允许流体通过的性质称为岩石的渗透性。从数量上度

量岩石渗透性的参数称作渗透率,渗透率又可以分为相对渗透率、绝对渗透率和单相渗透率。

岩石中只有一种流体通过时,岩石允许该流体通过的能力称为单相渗透率。绝对渗透率是指当岩石中只有一种流体通过,且流体不与岩石发生任何物理和化学反应时,岩石允许该流体通过的能力。绝对渗透率是岩石本身具有的固有性质,它只与岩石的孔隙结构有关,与通过岩石的流体性质无关。

实质上任何一种流体都会或多或少地与岩石发生物理和化学反应,绝对渗透率只是一个理论值。在实际应用中,只能选用一种与岩石反应非常少的流体的单相渗透率来近似代替绝对渗透率,通常采用气体如氩气、氮气、空气的渗透率作为绝对渗透率。试验系统使用单相流体氩气作为渗透介质,所研究的即为岩石的绝对渗透率。

依据研发的致密岩石惰性气体渗透测试系统,提出三种使用气体作为渗流介质测量岩石绝对渗透率的方法,分别是准静态法、压力脉冲法、气体流量法。

1.3.1 准静态法测试原理与方法

准静态法,即通过压力室进气端控制岩样下端面气体压力,而压力室出气端(即岩样上端面)与大气相连,待岩样上、下端面气压差形成稳态渗流后,通过记录进气端气体压力随时间的变化,推求岩试的气体渗透率。其原理示意图如图 1.4 所示。

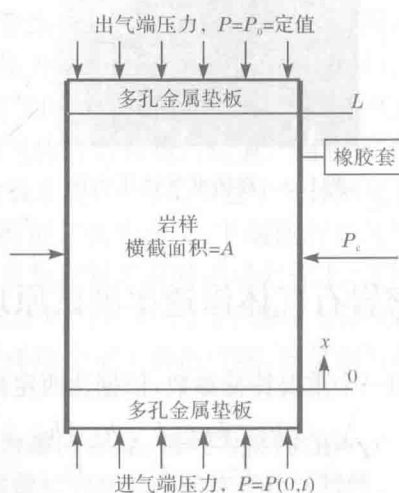


图 1.4 准静态法示意图

P_0 , 标准大气压; P , 进气口气体压力; P_e , 围压

准静态法试验技术原理如下(王欣, 2013):

由气体的连续性方程、动量方程和状态方程,得到气体渗流偏微分方程的一般形式:

$$\nabla \left(\delta \frac{k}{\mu} \frac{P}{Z} \nabla P \right) = \frac{\partial \left(\varphi \frac{P}{Z} \right)}{\partial t} \quad (1.2)$$

式中, δ 为惯性-湍流修正系数; k 为岩样气体渗透率(m^2); μ 为气体的黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$); P 为气体压力(MPa); φ 为岩样有效孔隙度; Z 为偏差因子,理想气体状态方程的修正量; t 为渗流时间(s)。

准静态法试验过程中,假设气体渗流满足以下条件:

(1) 达西定律成立,即 $\delta=1$ 。

(2) 渗流气体为理想气体。

简化式(1.2)得到一维的气体渗流方程:

$$\frac{K}{2\mu} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} = \varphi \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1.3)$$

试验时,方程满足初始条件: $t=0$ 时, $P|_{x=0}=P_1$ 。

边界条件: $t \geq 0$ 时, $P|_{x=L}=P_0$ 。

当岩石的渗透率 $< 10^{-17} \text{m}^2$, 近似地有 $\varphi \approx 0$ (Skoczylas, 1996)。由此可以解出式(1.3), 得到压力室内气体压力的表达式为

$$P(x) = \sqrt{P_1^2 \left(1 - \frac{x}{L} \right) + P_0^2 \left(\frac{x}{L} \right)}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (1.4)$$

式中, P_1 为压力室进气端压力(MPa); P_0 为大气压力(0.1MPa); x 为岩样内任一点处横截面到进气端岩样横截面的距离(m); L 为岩样长度(m)。

根据前述假设(1), 试验中气体渗流满足达西定律, 即

$$Q = - \frac{kA}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.5)$$

式中, Q 为气体流量(m^3/s)。

将式(1.5)代入式(1.4), 并令 $x=0$, 得到压力室进气端气体流量的表达式为

$$Q_1 = \frac{kA(P_0^2 - P_1^2)}{2\mu L P_1} \quad (1.6)$$

记 $t=0$ 时刻进气端压力为 P_1 , $t=\Delta t$ 时刻进气端压力为 $P_1 - \Delta P_1$, 平均值记为 $P_{\text{moy}} = P_1 - \frac{\Delta P_1}{2}$, 其中 ΔP_1 为进气端气压变化量。 Δt 时间段内, 记压力室内气体质量变化为 $\Delta m = V \Delta \rho_1$ 。根据前述假设(2), 由理想气体状态方程 $\frac{P}{\rho} = \text{常数}$, 进而得到

$$\Delta m = V \frac{\rho_1 \Delta P_1}{P_1} \quad (1.7)$$

$$\Delta m = \rho_{\text{moy}} Q_{\text{moy}} \Delta t \quad (1.8)$$

$$Q_{\text{moy}} = \frac{V \Delta P_1}{P_{\text{moy}} \Delta t} \quad (1.9)$$

式中, ρ_{moy} 为 Δt 时间段内, 压力室内的平均气体密度 (kg/m^3); Q_{moy} 为 Δt 时间段内, 压力室进气端平均气体流量 (m^3/s)。

结合式(1.4)和式(1.9)即可得到岩样气体渗透率的表达式:

$$k = \frac{2\mu LV \Delta P_1}{A(P_{\text{moy}}^2 - P_0^2) \Delta t} \quad (1.10)$$

式中, A 为岩样的横截面面积 (m^2); V 为岩样体积 (m^3)。

准静态法具体操作步骤如下:

(1) 取岩样, 使用游标卡尺测量岩样直径(上、下端面各 3 次)和高度(每旋转 90° 测量 1 次, 共 3 次), 取平均值。

(2) 将岩样用高性能橡胶套装好, 上、端面分别依次放上滤纸和多孔金属垫板, 然后放入低渗透测试仪压力室中, 调整岩样位置, 使岩样轴向与压力室底盘垂直, 避免由于岩样不平导致围压不能充分作用。

(3) 将围压泵通过橡胶软管连接到压力室后(如图 1.2 中将 1 和 2 相连), 将气体面板上游气路同压力室下游进气端相连(如图 1.2 中将 4 和 2 相连), 同时保证压力室上游进气端与大气连通。

(4) 通过围压泵施加围压至预定值, 关闭围压泵阀门, 使围压稳定在预定值。

(5) 围压稳定后, 打开进气端阀门, 通过上端压力储气罐(如图 1.2 中 4)施加一进气端压力, 采用高精度氩气检测仪检测各连接点处仪器气密性, 保证试验过程中无气体泄漏。

(6) 为加快试验速度, 避免因长时间试验带来的误差, 在试验过程中上游气路只使用金属管道内气体压力, 关闭气体缓冲容器。保证无气体泄漏后, 将进气端压力升高至略大于 1MPa , 观察压力表读数, 当压力下降速度趋于稳定后, 从 1MPa 处开始计时, 记录某一时间段(例如 5min 左右)内压力变化量, 记录点不少于 6 个。

(7) 试验结束后, 首先关闭压力室进气气压阀, 增加到下一级围压后, 重新施加渗压。

(8) 重复步骤(6)、(7), 进行各试验条件下的渗透率测试。

(9) 待一组试验完成后, 关闭所有气体压力阀门, 逐级卸载围压至 0MPa 。试验结束后拆样, 整理数据。

1.3.2 气体压力脉冲法测试原理与方法

压力脉冲法与准静态法相比, 具有操作简单、测试速度快等优点。因此, 压力