

裂隙介质地下水水流 及溶质运移

谈叶飞 陈舟 沙海飞 周志芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

裂隙介质地下水水流 及溶质运移

谈叶飞 陈舟 沙海飞 周志芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书在详细论述单裂隙水流及溶质运移国内外研究进展的基础上,开展了单裂隙水流物理及数值模拟实验研究。重点研究了单裂隙水流及溶质运移实验中示踪剂浓度的图像识别方法、人工单裂隙实验、LBM/MMP 混合方法在模拟单裂隙水流中的应用以及非达西流条件下的实验方法及模拟技术等。

本书可供地下水科学与工程、地下水环境保护、地下水资源开发利用及岩土体渗流等领域的科技人员使用,也可作为上述专业高年级本科生、研究生和相关教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙介质地下水水流及溶质运移 / 谈叶飞等著. —
北京: 中国水利水电出版社, 2018.6
ISBN 978-7-5170-6618-7

I. ①裂… II. ①谈… III. ①裂隙介质—地下水—物质运输—研究 IV. ①P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第149404号

书 名	裂隙介质地下水水流及溶质运移
作 者	LIEXI JIEZHI DIXIASHUI SHUILIU JI RONGZHI YUNYI 谈叶飞 陈舟 沙海飞 周志芳 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 7.75印张 208千字 8插页
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

地下水是宝贵的水资源，直接参与地球水循环，是地球水圈的重要组成部分，与人类的生活密切相关。随着人类活动范围的扩大，人类加强了裂隙介质含水层的开发和利用，引发了与之相关的一系列环境方面的问题，如废料填埋的污水下渗、海水入渗、输油管道老化而引起的渗漏等。所有这些环境问题都和裂隙地下水及溶质运移有关，然而由于溶质运移是一个非常复杂的过程，再加上裂隙岩体本身的复杂性，使得这项问题的研究变得非常困难。因此在前人的基础上，加强此方面的理论及实验研究就显得十分迫切而必要。

本书作者进行了一系列的裂隙水流及溶质运移实验，利用数字图像识别技术对常用示踪剂高锰酸钾和亮蓝的吸附性进行了分析，为正确选择示踪剂提供了依据；在裂隙沟槽流现象的基础上，利用多孔介质的组合进行了裂隙概化模型的溶质运移实验，并对所得阶梯状不规则穿透曲线进行了分析拟合；对天然页岩进行劈裂，并用玻璃转模技术复制了该裂隙，进行了页岩裂隙和玻璃裂隙中水流及溶质运移实验，研究了材料对实验的影响以及污染物淤堵对裂隙流场的影响；利用 LBM/MMP 混合方法对粗糙裂隙水流及溶质运移进行了二维模拟，并提出了建立三维仿真裂隙的方法；对非达西流条件下的裂隙水流及溶质运移进行了物理及数值模拟。本书的主要内容如下：

(1) 考虑到溶质的吸附性，基于数字图像识别技术研究溶质运移规律。

(2) 在裂隙沟槽流本质的基础上,提出了带空腔结构的裂隙概化模型,进行了概化模型实验,对实验所得不规则穿透曲线进行了研究,并对空腔体对裂隙溶质运移所起作用进行了分析;利用透明玻璃材料复制页岩裂隙,使得对裂隙内部的观察更直观,同时也比较了不同材料对裂隙水流及溶质运移的影响;通过对粗糙裂隙中水流的模拟,发现前人研究中关于沟槽流理论的一些局限性。

(3) 在前人的研究基础上进一步用 LBM 推导了带速度项的 M 维对流弥散方程;将 LBM 和 MMP 结合模拟二维粗糙裂隙中水流及溶质运移,在一定程度上提高了模拟的稳定性并降低了对计算机硬件的要求;同时在三维 LBM 应用方面提出了用裂隙剖面分形维数生成适合 LBM 运算的粗糙仿真裂隙。

(4) 通过物理实验模拟了不同类型的粗糙单裂隙中的非达西流及溶质运移,并利用数值模型进行了模拟计算。

谈叶飞、周志芳、沙海飞负责本书第 1~4 章的编写及校正,陈舟负责第 5 章的编写及校正。本书的出版得到了南京水利科学研究院出版基金的资助以及中国水利水电出版社的支持,在此表示衷心的感谢。

鉴于作者学识水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者不吝赐教。

作者

2017 年 11 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 单裂隙中水流及溶质运移问题的研究进展	3
1.2.1 单裂隙中水流问题研究进展	3
1.2.2 单裂隙中溶质运移问题的研究进展	10
1.3 已有研究基础和主要内容	17
第2章 溶质运移实验中示踪剂的性质对比及选择	18
2.1 概述	18
2.2 有色示踪剂在溶质运移实验中的数字图像识别和处理	19
2.2.1 数字图像基本概念	19
2.2.2 实验材料和方法	20
2.2.3 实验步骤及前期分析	20
2.2.4 数字图像的平滑处理	22
2.2.5 实验数据的处理及分析	23
2.3 有色示踪剂高锰酸钾和亮蓝的适用性对比	24
2.3.1 高锰酸钾和亮蓝的基本性质	24
2.3.2 实验材料和方法	24
2.3.3 实验结果及分析	27
第3章 人工单裂隙水流及溶质运移实验	31
3.1 概述	31
3.2 单裂隙水流及溶质运移实验	32
3.2.1 实验材料及步骤	32
3.2.2 裂隙特征分析及隙宽的获取	35

3.2.3 实验模拟及结果分析	40
3.3 分析和讨论	53
第4章 Lattice Boltzmann 方法在裂隙溶质运移模拟中的运用	54
4.1 概述	54
4.2 常速对流弥散方程的 LBM 推导	54
4.2.1 Lattice Boltzman 模型的建立	54
4.2.2 M 维常速 CDE 的 Boltzmann 推导	55
4.2.3 模型验证	57
4.2.4 分析及结论	59
4.3 LBM/MMP 混合法模拟仿真单裂隙中溶质运移	60
4.3.1 LBM/MMP 混合方法	60
4.3.2 单裂隙模型	63
4.4 天然裂隙中溶质运移的 LBM 模拟	66
4.4.1 二维裂隙模型的建立	66
4.4.2 裂隙图像分析	68
4.4.3 模型计算	69
4.4.4 参数估计及模型验证	70
4.4.5 小结	72
4.5 三维仿天然单裂隙模型的建立	72
4.5.1 三维格子裂隙面的生成原理	73
4.5.2 小结	76
第5章 裂隙水非达西流条件下的水流及溶质运移	77
5.1 概述	77
5.2 裂隙水非达西流水流及溶质运移实验	78
5.2.1 物理模型	78
5.2.2 模型主要参数及配件	79
5.2.3 水平单裂隙实验主要方法	80
5.2.4 成像技术应用	82
5.3 裂隙水非达西流数值模拟	84
5.3.1 控制方程	85
5.3.2 网格划分	85
5.3.3 边界条件设定	86
5.3.4 模型求解	86
5.3.5 裂隙水流场模拟	88

5.3.6 拟合结果分析	88
5.4 裂隙溶质运移模拟	93
5.4.1 示踪实验及 BTC 分析	93
5.4.2 水平裂隙 BTC 拟合分析	95
5.4.3 水平裂隙溶质运移纵向及横向弥散研究	99
参考文献	103

第 1 章

绪 论

1.1 概述

地下水是宝贵的水资源，直接参与地球水循环，是地球水圈的重要组成部分，与人类的生活密切相关（图 1.1）。18 世纪中叶，H. Darcy 通过实验总结出了著名的达西定律，一百多年来，基于达西定律建立的经典渗流理论发展迅速。然而，由于经典的渗流理论是以连续介质（土体）假定为基础的，众多的工程实例和科学研究表明，岩体渗流与土体渗流有着本质的区别。虽然苏联学者 Lomize 于 20 世纪 50 年代中期就系统地发表了一份具有开创性的关于裂隙岩体渗流的报告^[1]，但直到 1959 年 12 月，结构设计合理、施工质量精良的法国 Mallpaset 拱坝（坝高 60m）和意大利的 Vajont 拱坝（坝高 260m）的失事，岩体渗流才逐渐得到工程界的重视^[2,3]。这是因为裂隙渗流和多孔介质渗流相比，具有明显的各向异性特征，且其中水流往往不符合达西定律，如仍用多孔介质中的理论和方法，势必带来一系列不良后果。

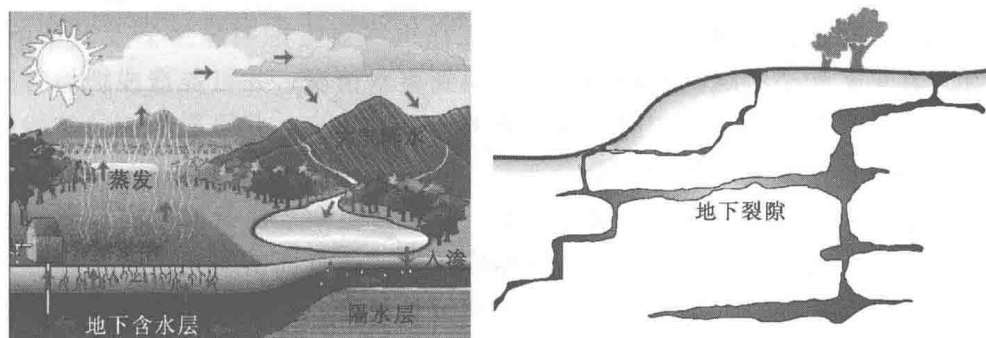


图 1.1 地下水：地球水圈的重要环节

随着人类活动日益向地下空间的深入，以裂隙岩体地下水及其相关的问题为主要对象的研究越来越重要。据统计，截至 2002 年年底，我国有 85288 座水库，其中有 36% 存在安全隐患，有安全问题的水库中，30% 是大中型水库，存在严重的水库渗漏问题，直接威胁人民群众的财产和生命安全，必须采取加固除险措施。近年来，我国的基础设施建设发展较快，水电站的建设

也正在蓬勃兴起,在建和已建的水利工程如三峡、龙滩、溪洛渡、锦屏、新安江、二滩、糯扎渡、紫坪铺、瀑布沟等,绝大多数分布在我国西部地区,其复杂的地质结构条件对水电站的安全建设是一个极大的挑战。该地区板块活动强烈,各种应力表现活跃,断层、节理和裂隙相当发育,特别是锦屏水电站,其左岸深裂缝相当发育,有的地方隙宽甚至达到20cm。因此,必须考虑坝基、坝肩、高边坡、地下厂房、引水隧洞等建筑物的渗透稳定性,即需要对裂隙岩体的渗流进行研究。这将有助于我们提出地下建筑物的防渗和排水、坝基和坝肩的稳定性方案,了解地下水对坝基混凝土和挡水建筑物的腐蚀性等^[2]。

溶质运移一直是国内外学者重点关注的问题之一。然而,由于溶质运移是一个非常复杂的过程,再加上裂隙岩体本身的复杂性,使得这项问题的研究变得非常困难。裂隙中溶质运移研究是从核工业发展起来以后,为了核废料的地下储存而开展起来的。近几十年来,在世界范围内,核能事业得到了快速发展,同时也带来了诸如核废料储存等一系列环境问题。将核废料封闭储存于基岩中仍是当前被广为采纳的方法之一,然而基岩中通常含有大量断层和节理,地下水及入渗雨水会沿着裂隙甚至在岩体基质中缓慢流动,为了不将核废料带入人类生活环境中,需要在核废料填埋地点进行裂隙水流和溶质运移实验或模拟。对核废物在基岩裂隙介质中进行地质处置是否可以确保安全,在相当程度上取决于裂隙岩体对废物的屏障功能和作为核废物迁移载体的裂隙水的运动特征,因此研究裂隙介质中污染物迁移问题,具有重要的理论意义和实际意义^[2,4-9]。

此外,在采矿、路桥建筑等行业,往往也需要考虑裂隙渗流及其影响。例如,在采矿和路桥隧洞开挖中,经常遇到突水情况,并可能造成坍塌等重大事故,即使在隧洞运营期间,也需要考虑裂隙渗流,并采取相应的防渗措施,以防止长期渗流而造成险情。

几十年来,在国内外学者的努力下,裂隙介质中水流及溶质运移研究已经取得了一定进展,许多研究成果也相应问世。这方面的研究主要可以分为两大类,即:①裂隙网络中的水流和溶质运移研究;②单裂隙中水流及溶质运移研究。在许多实际工程中,由于研究区域相对较广,裂隙数量庞大,一般采用连续介质模型,即将含有大量裂隙的裂隙介质等效成连续的多孔介质,从而大大简化了模型的计算。然而此模型具有一定的局限性,因为裂隙的分布本身具有一定的随机性,很多时候是以离散形式出现,此时仍采用连续介质模型,将使计算结果失真。作为研究裂隙水流和溶质运移问题的基础,单裂隙中水流及其相关问题的研究也受到众多学者及研究人员的重视。

相对于饱和裂隙中水流及其相关问题,人们对于非饱和裂隙中水流问题

的研究起步稍晚,但在过去几十年间也开始受到广泛重视^[10-12]。此外,随着环境污染问题,特别是非水相化合物的污染问题的加重,人们对多相流的研究也越来越深入^[13-20]。

1.2 单裂隙中水流及溶质运移问题的研究进展

1.2.1 单裂隙中水流问题研究进展

1.2.1.1 单裂隙水流理论模型的发展

张开度远远小于其长宽尺寸的断裂称为裂隙。关于裂隙中水流问题的研究已经开展了几十年^[21,22],这些研究始终集中在四个基本方面^[23]:①建立裂隙概念模型;②建立模型解析解或数值解的方法;③对裂隙水力特征进行描述;④运用随机方法描述裂隙隙宽及水文地质参数。早期研究单裂隙时,通常把其简化成平直、光滑且隙宽处处相等,通常忽略裂隙基质本身的渗透性,因此在整个裂隙面上的渗透性是各向同性。等温条件下不可压缩牛顿流体 Navier-Stokes 方程如下

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{\lambda=x,y,z} u_\lambda \frac{\partial u_i}{\partial \lambda} \right) = \mu \sum_{\lambda=x,y,z} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial P}{\partial i} + \rho g_i \quad (i = x, y, z) \quad (1.1)$$

式中 ρ ——流体密度;

μ ——液体动力黏滞系数;

u_i ——流体在 i 方向上的速度分量;

P ——流体压力;

g_i ——方向 i 上的重力加速度分量。

对于稳定流,式(1.1)中左边项为0,于是得到

$$\mu \sum_{\lambda=x,y,z} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial P}{\partial i} + \rho g_i = 0 \quad (1.2)$$

式(1.2)也被称为 Stokes 方程,在平行板模型中,该方程的解如下

$$u(z) = -\frac{b^2}{8\mu} \frac{dP}{dx} \left(1 - \frac{4z^2}{b^2} \right) \quad (1.3)$$

式中 b ——裂隙宽度。

从式(1.3)中可以看出速度剖面呈抛物线形态,如图1.2所示。通常被称为泊肃叶流(Poiseuille's flow)。在宽度上对其积分可得

$$\int_{-b/2}^{b/2} u(z) dz = -\frac{b^2}{12\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1.4)$$

对其整理即可得到著名的裂隙水流立方定律

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J \quad (1.5)$$

式中 q ——单宽渗流量;

- J ——水力坡降；
 b ——裂隙宽度；
 g ——重力加速度；
 ν ——水流的运动黏滞系数。

运用立方定律求得的裂隙内部场流为层流且水流速度处处相等，而在紊流阶段或微裂隙中运用立方定律求得的结果往往不尽如人意^[24]。

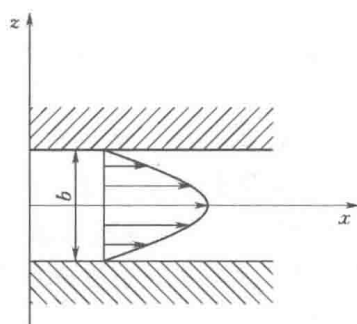


图 1.2 平行板间流速剖面图

理想裂隙在自然界是不存在的，天然裂隙面均为粗糙裂隙，其隙宽是沿程变化的。通常上下裂隙面会有一定程度的接触，而且其有效隙宽往往取决于隙面所受法向应力的。天然裂隙中水流在流动过程中遇到许多阻碍，即使对于裂隙中的纯粹泊肃叶流，其与裂隙面接触的占裂隙体积 10% 的区域只传递约 5% 的流量，Djik 和 Berkowitz^[25] 运用核磁共振技术，获得饱和粗糙裂隙中水流图像，其中水流速度剖面呈类似抛物线，但不完全对称，这种速度

分布对其中水流的影响十分明显，因此人们开始怀疑立方定律是否一直有效。Hakami 和 Larsson^[26] 对瑞典 Äspö 地区采集的天然花岗岩裂隙进行了水力实验和隙宽测量，结果表明测量得到的平均隙宽是通过立方定律得到的水力隙宽的约 1.4 倍。随着研究的深入，人们逐渐认识到把裂隙简单地简化为平直光滑的平板模型还具有很多其他方面的局限性。例如，裂隙中局部水流密度和温度的改变都将对流场产生影响，而立方定律只考虑了裂隙的隙宽、尺寸和水的黏滞系数（动力黏滞系数或运动黏滞系数），虽然流体的黏滞系数和温度、密度密切相关，但是由温度/密度的不均导致的热对流/密度流却被忽略。除了温度、密度之外，裂隙压力也对其中的流场产生一定的影响。Witherspoon 和 Wang 通过室内实验证明，当平板裂隙压力超过 10MPa 时，用立方定律得出的结果和实际情况相差甚远^[27]。这说明只有在一定的压力范围内才能运用立方定律进行简化运算。

考虑到立方定律的局限性，众多学者对其进行了改进，该研究主要是为了揭示和定量分析传统立方定律在实际运用中的偏离情况。而改进的关键问题则在于隙宽的确定。一般来说，隙宽主要有三种定义^[28]，分别是平均隙宽 $\langle b \rangle$ 、机械隙宽 b_m 和等效水力隙宽 b_h 。平均隙宽 $\langle b \rangle$ 是指裂隙隙宽函数 $b(x, y)$ 的平均值；机械隙宽 b_m 为裂隙面发生的最大闭合变形量；等效水力隙宽 b_h 是为了应用立方定律于实际裂隙而提出的概念，即是将实验所得裂隙渗流量代入立方定律反求得到的裂隙宽度。对于光滑平行板裂隙，这三种隙

宽值是相等的；而对于实际粗糙裂隙，它们通常是不等的。

Lomize 通过一系列实验研究了粗糙裂隙对水流的影响，在此基础上引进了裂隙粗糙度的概念^[1]。Snow 将此粗糙度概念运用于天然裂隙的水流模拟中，并对传统立方定律进行了相应的评价^[29]。Lomize 和 Louis 在大量实验基础上提出的立方定律修正公式，见表 1.1 和表 1.2。

表 1.1 渗透定律表一 (Lomize, 1951^[1])

缝壁	状况	光滑	粗糙
水流状态	层流	$V_f = \frac{gb^2}{12\nu} J$ $q = \frac{gb^3}{12\nu} J$ $\lambda = \frac{6}{Re}$	$V_f = \frac{gb^2}{12\nu} J \frac{1}{1+6(\Delta/b)^{1.5}}$ $q = \frac{gb^3}{12\nu} J \frac{1}{1+6(\Delta/b)^{1.5}}$ $\lambda = \frac{6}{Re} \frac{1}{1+6(\Delta/b)^{1.5}}$
	紊流	$V_f = 4.7 \sqrt{\frac{g^4 b^5}{\nu}} J^4$ $q = 4.7b \sqrt{\frac{g^4 b^5}{\nu}} J^4$ $\lambda = 0.056 \frac{1}{Re^{0.25}}$	$V_f = \sqrt{gb} J [2.6 + 5.11g(b/2\Delta)]$ $q = b \sqrt{gb} J [2.6 + 5.11g(b/2\Delta)]$ $\lambda = \frac{1}{2.6 + 5.11g(b/2\Delta)}$
线性定律	上限适用	$(Re)_{kp} = 600$	$N_1 = 600 \times [1 - 0.96(\Delta/b)^{0.4}]^{1.5}$

表 1.2 渗透定律表二 (Louis, 1969^[30])

缝壁	状况	$\Delta/b \leq 0.033$	$\Delta/b > 0.033$
水流状态	层流	$V_f = \frac{gb_h^2}{12\nu} J$ $q = \frac{gb^3}{12\nu} J$	$V_f = \frac{gb_h^2}{12\nu} J$ $q = \frac{gb^3}{12\nu} J \frac{1}{1+8.8(\Delta/b)^{1.5}}$
	紊流	$V_f^{1.75} = K'_f J$ $q = \frac{g}{0.079} \left(\frac{2}{\nu} \right)^{0.25} b^3 J$ $-V_f^2 = K'_f J$ $q = 4g^{0.5} \left(\lg \frac{3.7}{\Delta b} \right) b^{1.5} J^{0.5}$	$V_f^2 = K'_f J$ $q = 4g^{0.5} \left(\lg \frac{1.9}{\Delta b} \right) b^{1.5} J^{0.5}$

表 1.1 和表 1.2 中 K'_f 为紊流时裂隙渗透系数， V_f 为裂隙水流平均速度， Δ 为裂隙绝对糙率。由于天然裂隙中粗糙颗粒分布不均且凸起高度差异较大，因此在实际情况中仍无法确定 Δ 的值。紊流时，水头损失与流速呈非线性关系，可用 $V^m = -K'_f J$ 表示，式中 m 为紊流时的非线性指数，其变化范围为 $1 \sim 2$ ^[2]。光滑裂隙中紊流公式为 $q^m = V_f^m b^m = K'_f J b^m$ ，由此可得

$$\lg J = \lg \frac{1}{K'_1 b^m} + m \lg q \quad (1.6)$$

通过室内实验可以得到 $\lg J$ 和 $\lg q$ 之间的关系直线, 其斜率即为 m 。

Barton 等首次提出将岩石节理粗糙系数 JRC 运用于裂隙水力隙宽的求解, 提出水力隙宽、机械隙宽和 JRC 之间的关系式^[31]

$$b_h = \frac{b_m^2}{JRC^{2.5}} \quad (1.7)$$

于是立方定律修正为

$$q = \frac{1}{JRC^{7.5}} \frac{g b_m^6}{12\nu} J \quad (1.8)$$

上式中的难点在于 JRC 的确定, 虽然很多学者提出一系列 JRC 的测量方法^[32-35], 然而由于其尺度效应^[36]及粗糙度的各向异性等条件限制, 使得测量准确度仍有待提高。

Iwai 通过大量单裂隙水流实验发现裂隙的面积接触率 ω (裂隙面接触面积与总面积之比) 与水流规律存在一定的联系^[37]。据此得出的理想裂隙模型中, 沿水流法向方向, 裂隙开度连续变化; 而在沿水流方向, 裂隙开度不变。进而 Walsh^[38]和周创兵等^[39]分别推导出如下公式

$$q = \frac{g b_{\max}^3 (1 - \omega)}{12\nu (1 + \kappa\omega)} J \quad (1.9)$$

式中 κ ——经验系数, Walsh 建议 $\kappa=1$, 周创兵等建议 $\kappa=0$ 。

Amadei 等则提出如下的修正公式^[40]

$$\left. \begin{aligned} q &= \Gamma \frac{g \langle b \rangle^3}{12\nu} J \\ \Gamma &= \frac{1}{1 + 0.6 \left(\frac{\sigma_b}{\langle b \rangle} \right)^{1.2}} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

式中 σ_b ——隙宽均方差。

Nolte 对等石英二长岩芯试样进行渗流实验, 3 个试样的成果整理发现, 隙宽指数 n 远远大于 3, 随隙宽增大分别为 7.6、8.3 和 9.8^[41]。张有天等采用计算机生成人工裂隙和有限元数值计算方法, 经分析认为, 单宽流量 q 与 b_m 也不是 3 次方关系, n 均大于 3, 并随裂隙粗糙程度的增加而增大^[42]。耿克勤根据人工、天然光滑和粗糙裂隙的实验结果分析得到, 对于小开度裂隙层流而言, $1.7 \leq n \leq 3.0$, 裂隙面几何形态越光滑 n 值越大; 对于中开度过渡状态, $0.8 \leq n \leq 1.4$; 对于大开度裂隙, $0.3 \leq n \leq 0.48$ ^[43]。在此基础上, 许光祥等进行了归纳总结, 提出了次立方定律和超立方定律的概念, 并通过试验进行了验证^[44]。

Neuzil 和 Tracy 模拟了由一系列不同隙宽的平行板模型组成的裂隙, 这些平行板模型的隙宽分布符合对数正态分布。模拟结果显示, 此裂隙中的水流主要通过隙宽较大的路径, 裂隙中水流存在优势流^[45]。

Tsang 等利用电阻代替水流发现裂隙的曲折程度对其中的水流有着较为明显的影响, 而且隙宽越小, 曲折度的影响越明显。和普通的光滑平行板模型相比, 裂隙曲折度和隙面粗糙度对水流产生的阻滞影响可以将水流速度降低 3 个数量级以上^[46]。Brown 详细研究了裂隙粗糙度对水流的影响^[47], 他利用分形方法生成的粗糙裂隙, 模拟了其中的水流状态。他认为, 在隙宽较小的情况下, 裂隙的曲折度对其中的水流有着十分明显的影响, 这也进一步证明了 Tsang 的结论。

Rasmason 和 Neretnieks 历时 3 年在瑞典一个废弃的 Stripa 矿里进行了现场实验^[48], 通常称这个实验为 Stripa-3D 实验, 它揭示了裂隙岩体中水流和运移的主要特征。Heath^[48]和 Bourke^[49]也在康沃尔做了现场实验, 他们的研究发现, 水流很大程度上在裂隙岩体中被隔离的管道流里面流动, 并没有大面积的水流发生, 水流仅仅在 5%~20% 的裂隙面内流动。在加拿大安大略的白垩纪石灰岩和美国伊利诺伊州东北部的志留纪白云岩中, Novakowski^[50]、Raven^[51]和 Shapiro^[52]分别进行了现场示踪剂实验, 发现通过裂隙隙宽估计的水力传导系数和溶质的迁移规律与现场观测的不一致, 如果裂隙隙宽的变化很小, 则与实际观测吻合得较好。因此, 上述的现场实验提供给我们这样一个事实: 裂隙面的平行板模型假定并不适用, 水流和溶质运移只在裂隙形成的管道或沟槽中发生。

Pyrak^[53]等在不同压力条件下, 将熔化的金属代替水流注入裂隙中, 冷却后打开, 发现液体在其中的流动路径是曲折的, 沿一定的路径流动, 具有优势流和沟槽流的特征。为了有效地模拟裂隙中的沟槽流, Y. W. Tsang 和 C. F. Tsang^[46, 54]提出了一种新的概念模型。他们运用对数正态分布函数并在平均、差异和空间相关长度基础上生成隙宽统计分布, 进行了水流和溶质运移数值模拟, 预测了其中的穿透曲线, 预测的结果和 Moreno 等^[55]提供的的数据能很好地吻合。

1.2.1.2 单裂隙物理模型实验

由于现场水文地质条件以及岩体的复杂性, 开展现场实验工作需要大量的人力和物力, 测试方法和测试装置的不同, 所得到的结果也不一定完全一致^[56]。室内实验相对来说花费较少而且有较精确的测试方法, 因此大部分实验通过室内的小尺度模型进行。

研究者最初是利用两块光滑平板, 通过控制两块平行板之间的距离来模拟不同隙宽的裂隙, 这类装置较为简单, 使用的平行板通常为有机玻璃板或

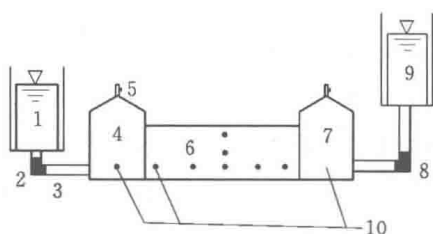


图 1.3 光滑平行板模型^[24]

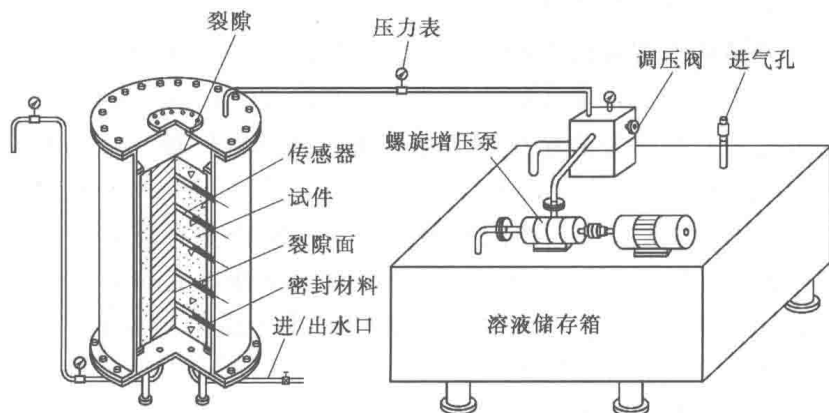
- 1—下游稳流箱；2—下游流量计；3—导流管；4—模型下游连接水箱；5—排气阀；6—模型；7—模型上游连接水箱；8—上游流量计；9—上游稳流水箱；10—测压管嘴

玻璃板，国内外众多学者都做过类似的实验^[1,24,30]，图 1.3 为速宝玉等制作的光滑裂隙水流实验装置。在此基础上进一步发展，人们开始在平行板上粘贴粗糙颗粒来模仿粗糙裂隙，大多数此类实验都是利用标准粒径的砂粒来充当粗糙颗粒^[57-59]，并通过粘贴不同粒径的砂粒和控制平行板之间的距离来获得不同的粗糙裂隙。也有研究者利用机械加工后的钢板来模拟粗糙裂隙。许光祥等^[44]为了验证其理论，加工了包括光滑裂隙在内的 5 种不同形态的裂隙进行水流实验，

如图 1.4 所示。由于粘贴的砂粒粒径或机械加工出的粗糙颗粒都比较均匀，虽然获得了粗糙的裂隙，但和实际情况仍相距甚远。于是研究者开始利用混凝土来获得仿真裂隙^[56,60-62]并进行水流及溶质运移实验（图 1.5）。这在一定程度上让研究者获得更为接近实际的实验数据，但是混凝土和天然岩体在材料特性上存在较大差别，如透水性、表面可湿性等，都对其内部水流及裂隙本身形态产生影响，于是一些学者开始利用岩芯中的天然裂隙^[63]，或者利用

试件名称	试件裂隙纵剖面	说 明
平板		光滑平行板
吻三		上下两隙面完全吻合
平三		下隙面吻三试件下隙面完全相同，上隙面为平板
平矩		下隙面凹下面积与吻三试件完全相同，上隙面为平板
吻曲		上下两隙面曲线随机生成，上下两隙面完全吻合

图 1.4 机械加工的不同形态裂隙^[44]（单位：mm）
（实验面加工精度 $<\pm 0.01\text{mm}$ ）

图 1.5 利用混凝土制作的仿天然裂隙^[56,61]

天然岩样制作人工裂隙,如图 1.6 所示。也有直接在野外进行较大尺度的单裂隙水流实验^[64]。在过去的几十年中,研究人员逐渐开始运用诸如裂隙粗糙面剖面测量、低熔点金属注入和树脂铸造等技术来获得更加接近真实裂隙的模型来进行相关的模拟^[46,47,53,65],这些模型考虑了裂隙隙宽变化及其对水流影响的实际情况,对研究变隙宽裂隙中的水流运动提供了极大的帮助。

1.2.1.3 裂隙水流问题的数值模拟

对于某些复杂问题,如在寻求裂隙的渗透性质与影响溶质运移的控制因素的关系时,现场实验和室内实验的测试手段都不完美,这就需求助于数值模拟,对于这些复杂问题,数值模拟是一种比较方便且精度较高的方法。一些室内实验无法模拟的现象通过数值模拟得到了较好的解决^[56]。

自 20 世纪 60 年代末期以来,关于裂隙中水流等相关问题的数值模拟已经发展了 40 多年^[66]。据统计,截至 1994 年,已经出现至少 30 余种求解此类相关问题的专门软件^[67]。Streltsova - Adams^[68]在求解混合含水层井流问题时描述了几种求解裂隙水流的解析法。Elsworth^[69]提出了求解具有特定几何形状层流或紊流问题的解析方法,由于对问题中水流的形状有特定要求,因此其应用受到了限制。Amadei 和 Illangasekare^[70]运用积分变换得到矩形裂隙中流体势能场的连续表达式。这个方法可以在裂隙隙宽和粗糙度各向异性的情况下使用,同时也可以为进一步研究立方定律提供依据。由于积分变换的运用,不需要再对裂隙进行离散,但是裂隙的几何形态不能过于复杂,运用仅

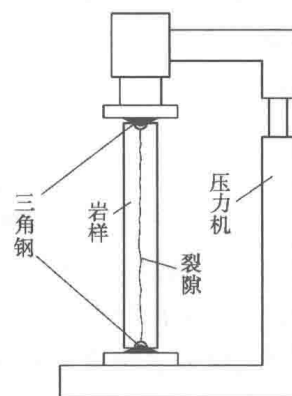


图 1.6 利用压力机对岩样施压来产生裂隙