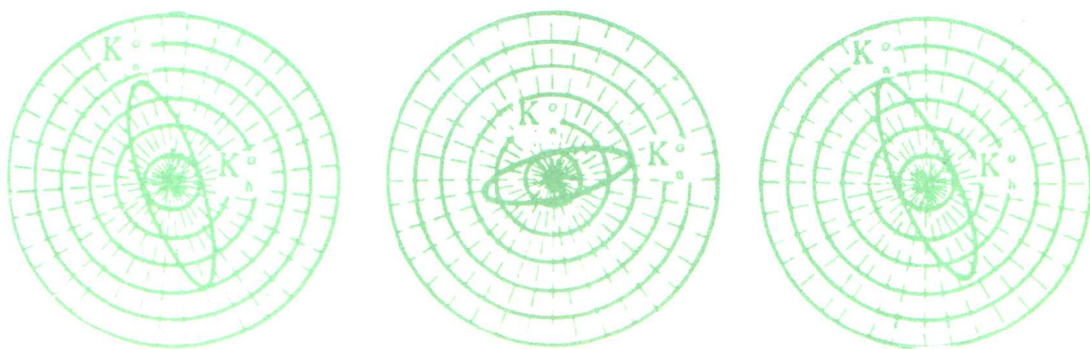


# 各向异性 裂隙介质渗透性的研究与评价

田开铭 万 力 著



学苑出版社

国家自然科学基金资助项目《变换岩石各向同性化  
的渗透系数为三维参数的理论和方法》中间成果

# 各 向 异 性

## 裂隙介质渗透性的研究与评价

田开铭 万 力 著

学 苑 出 版 社

**各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价 田开铭 万 力 著**

---

学苑出版社出版发行 社址：北京西四颁赏胡同四号

中国地质大学（北京）科研处印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张：12.31 字数：295 千字 印数：0001—1000 册

1989 年 9 月第一版 1989 年 9 月第一次印刷

---

ISBN 7-80060-652-x / P·3

定价：4.50 元

# 目 录

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 前 言 .....                    | (1)  |
| 第 一 章 绪论 .....               | (3)  |
| 第 二 章 裂隙介质的渗透张量 .....        | (7)  |
| 第一节 裂隙介质的渗透空间结构 .....        | (7)  |
| 第二节 流体在单个隙缝中运动的基本方程式 .....   | (8)  |
| 第三节 裂隙水的定向流动 .....           | (10) |
| 第四节 拓广了的达西公式 .....           | (10) |
| 第五节 裂隙介质的渗透张量 .....          | (11) |
| 第六节 渗透张量的改进模型 .....          | (14) |
| 第七节 渗透张量的计算 .....            | (16) |
| 第八节 渗透张量的应用和检验 .....         | (18) |
| 第 三 章 裂隙几何参数的野外观测和统计方法 ..... | (23) |
| 第一节 测量面积大小的确定 .....          | (23) |
| 第二节 裂隙系统的方位测量及其数据的统计处理 ..... | (25) |
| 第三节 裂隙隙宽的测量及统计方法 .....       | (33) |
| 第四节 隙间距的测量和统计方法 .....        | (35) |
| 第五节 关于裂隙切穿长度的观测 .....        | (39) |
| 第 四 章 占孔及岩心裂隙系统的观测 .....     | (45) |
| 第一节 占孔裂隙系统的观测 .....          | (45) |
| 第二节 定向岩心 .....               | (47) |
| 第三节 岩心裂隙系统的几何参数 .....        | (48) |
| 第四节 新型的占孔水文地质柱状图 .....       | (54) |
| 第 五 章 微裂隙几何参数的观测 .....       | (55) |
| 第一节 观测前期的准备工作 .....          | (55) |
| 第二节 微裂隙系统几何参数的观测 .....       | (57) |
| 第 六 章 岩石渗透性在地层剖面上的变化律 .....  | (61) |
| 第一节 控制裂隙发育的地层因素 .....        | (61) |
| 第二节 地层裂隙渗透张量柱状图 .....        | (65) |

|        |                                  |       |
|--------|----------------------------------|-------|
| 第七章    | 岩石渗透性随埋深的变化律 .....               | (69)  |
| 第一节    | 裂隙几何参数随埋深的变化律 .....              | (69)  |
| 第二节    | 微裂隙几何参数随埋深的变化律 .....             | (73)  |
| 第三节    | 岩石渗透性随埋深的变化律 .....               | (75)  |
| 第四节    | 关于大裂隙系统与微裂隙系统渗透张量随埋深变化的相似性 ..... | (80)  |
| 第八章    | 岩石渗透性在各类构造中的变化律 .....            | (85)  |
| 第一节    | 岩石渗透性在褶皱构造中的变化律 .....            | (85)  |
| 第二节    | 岩石渗透性在断层破碎带内的变化律 .....           | (88)  |
| 第三节    | 各向异性岩石的渗透性在蓄水构造中的分布 .....        | (91)  |
| 第九章    | 岩石渗透性在卸荷裂隙带内的变化律 .....           | (103) |
| 第一节    | 隙宽在卸荷裂隙带内的变化律 .....              | (103) |
| 第二节    | 在卸荷裂隙带内裂隙密度的变化 .....             | (107) |
| 第三节    | 裂隙岩石的渗透张量在卸荷裂隙带内的变化律 .....       | (107) |
| 第十章    | 压水试验法确定渗透张量 .....                | (113) |
| 第一节    | 校正系数法 .....                      | (113) |
| 第二节    | 三段压水试验法 .....                    | (118) |
| 第三节    | 交叉孔压水试验法 .....                   | (122) |
| 第十一章   | 各向异性含水层中的抽水试验 .....              | (129) |
| 第一节    | 理论公式 .....                       | (129) |
| 第二节    | 反求参数方法 .....                     | (131) |
| 第三节    | 抽水试验和计算结果 .....                  | (137) |
| 第十二章   | 砂泥岩裂隙地层的等效渗透张量 .....             | (141) |
| 第一节    | 等效渗透张量 .....                     | (142) |
| 第二节    | 应用实例 .....                       | (145) |
| 参考文献   | .....                            | (147) |
| 附录     | .....                            | (155) |
| 附录 I   | 裂隙分类, 座标旋转, 绘极点图程序 .....         | (155) |
| 附录 II  | 裂隙分组后渗透张量计算程序 .....              | (168) |
| 附录 III | 顺层薄片微裂隙实际产状计算程序 .....            | (172) |
| 附录 IV  | 校正系数法求各向异性渗透张量程序 .....           | (174) |
| 附录 V   | 交叉孔压水试验计算程序 (I) .....            | (176) |

|        |                           |       |
|--------|---------------------------|-------|
|        | 交叉孔压水试验计算程序 (2) .....     | (179) |
| 附录 VI  | 各向异性越流承压含水层单纯形法调参程序 ..... | (182) |
| 附录 VII | 各向异性层状非均质岩层渗透张量计算程序 ..... | (188) |

## 前 言

裂隙岩石渗透性的基本特征和各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价方法是基岩水文地质学最重要的基础理论和应用技术，由于国外学者自六十年代起做了大量工作，已获得了迅速发展。

应该指出，尽管不少国外学者的工作对基岩水文地质学的基础理论和应用技术的发展与开拓起了极大的促进作用，但大多数成果毕竟是由数学家和力学家取得的，难免产生只适于在理想条件下应用的弱点，当解决具体的基岩水文地质实际问题时，远不能满足生产需要。

鉴于政治历史的缘故，我国在这方面的研究被贻误了几十年。从八十年代开始，在充分吸取国外学者已取得的学术精髓的同时，田开铭教授极力倡导并致力于将这类研究纳入地质学轨道，争取创造出具有我国特色的和符合我国国情的基岩水文地质学基础理论及应用技术。他曾率领研究生在我国城建、水利电力、煤炭和冶金等部门紧密结合与基岩地下水勘察及评价有关的生产课题，经过多年艰苦努力，逐步充实和完善了既有的基础理论和应用技术，终究把这类研究全面地提高到一个崭新的水平。

田开铭教授 1980 年撰写了第一篇论文“对裂隙岩石渗透性的初步探讨”，发表在武汉地质学院北京研究生部刊物《地质研究》第二期上；1983 年为中国力学学会主办的全国渗流力学学术会议撰写的论文“论裂隙岩石的水文地质模型”，发表在《勘察科学技术》1984 年第 3 期上；1986 年撰写了论文“渗透度张量”，发表在《水文地质工程地质论丛》第一期上。这篇论文获 1986 年地矿部科技成果四等奖。此外，他还为全国第二届岩溶水文地质会议撰写了论文“对疏干巨厚基岩含水层时双层水位形成机制的初步分析”，发表在《中国岩溶》1985 年第 1 期上。这篇论文与他撰写的英文论文“A way to avoid the surface subsidency among karstic regions covered with soil during mine drainage”共同获得 1986 年地矿部科技成果三等奖。作为 1988 年国际水文地质学家协会第 21 届会议的主旨发言之一，他撰写的论文“An almost developed technique of karst collapse prevention during mine drainage”发表在该会议的英文论文集中。后三篇论文阐述了他发现的各向异性裂隙介质渗透性随埋深的变化律，以及大裂隙系统与微裂隙系统在同一地质剖面上渗透张量随埋深变化的相似原理。

田开铭教授与他的学生夏日元硕士合作，在1989年完成了专著《用人工双层水位方法防止矿井排水引起的地面岩溶塌陷的研究》，将某些有关的基础理论及技术方法概括到这本书里。经国家教委授权中国地质大学(北京)组织的评审，认为该成果在学术上已达到世界领先水平。

在田开铭教授指导下：

1) 杨立中 1982 年完成了题为“榆次地区裂隙含水系统特性的分析及其研究方法的探讨”的硕士论文；

2) 董岳泰 1984 年完成了题为“裂隙岩石渗透性随埋深变化规律及其研究方法的探讨”的硕士论文；

3) 王建华 1987 年完成了题为“黄河小浪底水库北侧狭窄山脊卸荷裂隙渗透张量变化规律及其某些应用”的硕士论文；

4) 夏日元 1988 年完成了题为“南方岩溶矿区利用双层水位开采方法探讨”的硕士论文”；

5) 代群力 1988 年完成了题为“湖南辰溪孝坪煤矿水文地质条件分析及防治水方法的探讨”的硕士论文；

6) 王建荣 1988 年完成了题为“大口径井流试验研究——以黄河小浪底水库单薄分水岭 J107 竖井注水试验为例”的硕士论文；

7) 万力 1988 年完成了题为“砂岩及砂泥岩裂隙地层各向异性渗透张量确定方法研究”的博士论文。

田开铭教授以自己的学术观点和独创的理论为基础，综合了国内外学者的某些主要成就和上述各研究生学位论文中的丰硕成果，撰写成本书第一章至第九章。万力博士继承导师田开铭教授的学术思想，做了很多有益的开拓性工作。本书最后三章是从他的学位论文中摘出的。附录中，除附录Ⅱ的计算程序由夏日元编写外，其余的计算程序全部由万力完成。

在裂隙岩石渗透性的这个研究领域里，这本书在我国算得上是一本首次问世的新著。我们谨向读者奉献此书的目的，在于唤起同行们的广泛兴趣，一齐应用张量理论和方法，去创造能实际测定各向异性裂隙介质渗透性的多种方法，去揭示各向异性裂隙介质渗透性特征的许多奥秘，共同把基岩水文地质学的理论研究及有关的生产实践提高到一个更新的水平。

书内新颖的观点和方法很多，但荒谬和缺点肯定不少，希读者指正。



# 第一章

## 绪 论

裂隙岩石发育有由定向展布的方向裂隙组所构成的不均一裂隙网络，与由松散颗粒成份组成的孔隙岩石比较，两者的渗透空间结构绝然不同，因而这两类不同导水介质的渗透性具有本质区别。裂隙岩石的渗透性常常以明显的各向异性和非均质性为特点。

单纯依靠抽水、压水和注水等水文地质实验手段确定基岩渗透性，除技术复杂外，工期长，耗资大。不仅从少量占孔获取的参数难免随机性和局限性缺点，就是获得的参数一般也只是各向同性的。对渗透性既不均质又各向异性的基岩来说，这种传统的水文地质调查方法，已不能满足日益发展的实际需要了。

本世纪六十年代中期，美国学者斯诺（Snow D.T.）、苏联学者罗姆（Pomm.E.C.）、法国学者路易斯（Louis C.）等为评价裂隙岩石的渗透性，都先后应用张量方法提出了描述各向异性裂隙介质渗透性的数学模型。从我国对外科技信息完全闭塞的七十年代初期开始，我们亦独立地进行了渗透张量理论及裂隙岩石渗透张量模型的研究。我们的研究成果，不但物理概念清晰，数学推演简明，在理论上胜过国外学者的工作；而且把这种沿用经典的数理方法从理想的岩石基元中导出的岩石渗透张量，纳入地质学研究的轨道。我们建立了包含有裂隙系统连通性和切穿性参量的渗透张量模型，把包含有裂隙系统方位、密度和宽度的岩石渗透张量完善为能反映导水裂隙网络展布特征的岩层渗透张量，使渗透张量更符合地质实际。我们还研制出用偏流因子表征裂隙水偏流效应的新方法，以及用等面积层面上统计裂隙系统链系数均值和在剖面上统计切穿隐距均值的新方法替代实际上不能直接测量的裂隙切穿长度，使渗透张量的理论模型发展成为实用模型。

我们在一些水文地质单元内，广泛应用岩石渗透张量，系统地研究了岩石渗透性在地层剖面上的变化律和随埋藏深度的变化律，同时还查明岩石渗透性在各类构造中的变化及分布，从而为我们解决与裂隙水运动特殊规律有关的重大生产课题，奠定了基础。

测量基岩可见裂隙系统的各种几何参数，短期内就能获得大量廉价的计算基岩渗透张量的有用数据，这是在基岩山区的水文地质调查工作中推广张量法确定基岩各向异性三维渗透参数的有利条件。但表生作用对岩石裂隙系统的几何参数有显著影响。如何测定地面以下不受表生作用影响的岩石渗透张量则是广泛应用张量法求三维渗透参数的主要障碍。

为此，我们开创了一整套测定定向岩样中微裂隙系统各种几何参数的专门技术和方法，这些岩样是从占孔或坑道中采得的。同时开展了同一地质剖面上基岩大裂隙系统与微裂隙系统在几何参数及渗透张量之间的相似性研究。我们发现并提出了“基岩宏观裂隙系统与微裂隙系统的渗透张量随埋深的变化律在同一地质剖面上相似”的原理。遵照这个相似原理，不仅在基岩露头上，而且在缺少基岩露头的地区，利用勘探钻孔的定向岩心在费氏旋转台上观测微裂隙系统的各种几何参数，也可以间接求得各个深度上的岩石宏观裂隙系统的渗透张量。依据这个相似原理，还可以将从地表测得的基岩渗透张量，推算出含水层在任意深度上不受表生作用影响的岩石渗透张量。利用这个相似原理，甚至还可以将同一钻孔按传统水文地质方法早先已经求得的和即将求得的岩石各向同性的渗透参数，换算成表征岩石各向异性特征的渗透张量。显然，这个理论上新的发展，克服了张量法迄今在国内外不能被广泛应用的主要障碍，在建立基岩含水层渗透张量场的研究上取得了重大突破。

七十年代加拿大学者帕森斯（Parsons M.L.）首次应用渗透张量法确定爱德华太子岛区域裂隙的渗透性，并试图解决该岛地下水资源的评价问题。自八十年代初开始，我们为评价山西榆次地区裂隙水资源进行了三迭纪长石砂岩非均质各向异性特性的研究；为阐明山东金岭铁矿的双层水位形成机制，测定了中奥陶纪灰岩各向异性渗透率随埋深的变化律；为评价黄河小浪底大型水库单薄分水岭的边坡稳定性及预测库水位骤降时该分水岭中裂隙水压力的分布，系统地测定了三迭纪砂页岩系的渗透张量场。目前我们还为利用人工双层水位方法安全开采华北煤田下三层煤的可行性和为利用人工双层水位方法防治矿井疏干引起的地面岩溶塌陷，分别在河南焦作煤田对中奥陶纪灰岩和在湖南辰溪煤田对二迭、三迭纪灰岩测定各向异性渗透率随埋藏深度的变化律。在上述各项工作中，我们积极采用了渗透张量方法和相似原理，都取得了满意的成果。

在水文地质勘察中，迄今缺少能实际测定岩石渗透张量的现场试验技术和方法。从60年代以来，国外学者提出过不少理论和方法，但都由于技术复杂或技术缺陷而难于推广应用。通过在黄河小浪底水利水电枢纽工程的勘察实践，我们在测定岩石渗透张量的现场试验技术和方法上，取得了下列主要成果：（一）在斯诺（Snow D.T.）和罗克哈（Rocha M.）工作的基础上，提出了利用单栓塞常规压水试验资料计算岩石渗透张量的方法，并修改了罗克哈的校正系数计算公式。（二）依据路易斯三段压水试验法的基本原理，与合作单位共同研制了三段压水试验器，并给出了试验和计算方法。（三）应用谢（Hsieh P. A.）的交叉孔压水试验方法，并根据具体地质条件简化了他的公式，提出了考虑压水段和观测段长度的渗透张量计算方法和公式。（四）在裂隙含水层中进行了以求各向异性渗透张量为目的的抽水试验，并在理论上用单纯形法求解非稳定流不完整井各向异性越流承压含水层中的井流公式，取得了良好的效果。当然，研究测定岩石渗透张量的现场试验技术和方法还必须大力加强，现有的试验技术和方法还有待继续改进和完善，但是我们毕竟在国内首次闯入了这个新的研究领域，并取得了相当丰硕的成果。我们把这些成果撰写出来，供同行们参阅和借鉴。

应该指出，在渗透张量计算公式中，把裂隙当作均一、光滑、无限延伸、规则排列的理想窄缝，这些理想条件实际上是不存在的。尽管我们建立了渗透张量的改进模型，提高了渗透张量计算的准确性和可靠性，还不能把它当作岩石参数直接应用到水文地质计算中去。即使渗透张量方法具有上述缺陷，但这个方法具有简便、经济、灵活的特点，所得

结果具有一定的统计意义，对于初步了解基岩方向渗透性规律及确定裂隙岩层相对的各向异性渗透特征，仍是一种行之有效的方法。克服上述缺陷的一个途径则是把统计测量求得的岩石渗透张量(普遍的)与现场试验方法求得的岩石渗透张量(典型的)进行对照和校正。将两种方法结合起来，发挥各自的优点，相互补充，最终能满足实际应用的需要。

总之，我们深信：一个广泛采用渗透张量评价基岩各向异性介质渗透性和推广三维流计算的时代即将来到，渗透张量必将给基岩水文地质调查和研究的方法和内容，带来巨大变革。



## 第二章

# 裂隙介质的渗透张量

### 第一节 裂隙介质的渗透空间结构

裂隙介质的空隙实际上由两部分组成，即裂隙网络的隙缝和岩块的孔隙。经水文地质研究查明：在裂隙介质总空隙率方面，裂隙度较孔隙度小几倍，甚至几十倍；在裂隙介质的渗透性方面，裂隙渗透度却比孔隙渗透度大几个数量级。尽管裂隙系统只占岩石空隙率的极少部分，而裂隙介质的渗透性大小几乎全部取决于裂隙系统的渗透空间结构。从上所述，在研究裂隙介质最基本的渗流特征时，只需建立单纯裂隙的介质模型，用它来阐明岩石的裂隙性与渗透性之间的关系。

裂隙介质的渗透空间结构，从单纯裂隙介质模型的角度来说，分为个体结构和系统结构。

**个体结构特征** 单个隙缝与孔隙介质的粒间空隙明显不同，不是各向同形的。它作为裂隙系统的基本单元是一种线性导水空隙，曲率很小，顺一定方向延伸，隙缝宽度远远小于自身延伸的长度。

**系统结构特征** 裂隙常循固定方位成群展布，即以方向裂隙组的形态产出。数个方向裂隙组总会在不同程度上相互切穿和连通，在天然岩石中形成导水的裂隙网络。

裂隙岩石的渗透空间结构是可度量的。通常以隙面法向的方向余弦表示裂隙的方向性，以隙宽表征它的张开性，以密度或隙间距表示裂隙的疏密性。习惯上又把方位、隙宽、密度等裂隙的几何参数叫做裂隙的水力参数。

众所周知，裂隙介质的渗透空间结构在形态格局上虽然多数不是杂乱无章的，但也不经常像理想模式那样的规则和均质。实质上，按方位划分的方向裂隙组是以裂隙系统的几何参数按天然概率分布为其特点的。自然界中，裂隙岩石渗透空间的结构规律在某些随机因素的影响下会出现一定程度的分散，但一般情况下方差不大。这对引用统计方法，以裂隙系统几何参数的分布特征描述裂隙岩石渗透空间结构的总体分布，十分有利。采用统计方法，在某个允许的置信区间，可用统计上是规则的和均质的模型比拟不规则和非均质的天然裂隙系统。

## 第二节 流体在单个隙缝中运动的基本方程式

用缝宽为  $b$  的平行板状窄缝模拟单个裂隙。按裂隙系统的个体结构特征，可假定大于隙宽  $b$  几个数量级的隙缝长度，在隙面方向上是无限延伸的。现引入坐标系  $O_{xy}$ ，如图 2-1 所示。

建立粘性液体在  $xy$  平面的稳定流方程式

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial x} u_x^2 + \frac{\partial}{\partial y} u_x u_y \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$$

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial x} u_x u_y + \frac{\partial}{\partial y} u_y^2 \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}$$

和连续方程式

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$$

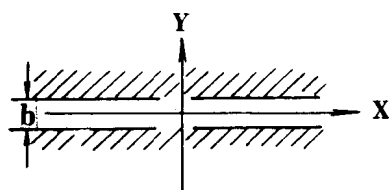


图 2-1 无限延伸的隙缝

式中  $\mu_x, \mu_y$ —速度(实际的)矢量在坐标轴上的投影； $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ —粘性阻力张量的元素； $\rho$ —流体的密度； $P$ —压力。

对窄缝中的流动来说，自然  $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$ ； $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$ ； $u_y = 0$ 。在如此条件下，由以上各方程式得

$$\rho \frac{\partial}{\partial x} u_x^2 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \quad \frac{\partial}{\partial x} u_x = 0$$

联解上述方程式，得

$$\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad (2-1)$$

式中  $\mu$ —为流体的粘滞系数。

由于沿隙缝方向的压力坡降与流体运动反向的粘性摩擦阻力相等，在如此条件下

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\Delta P}{\Delta l} = \text{常数} \quad (2-2)$$

式中  $\Delta P$  是沿隙缝  $\Delta l$  长度上的压降。这时，将(2-2)式变换成如下形式

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l}$$

根据边界条件  $y = \pm \frac{b}{2}$  时,  $\mu_x = 0$ , 解偏微分方程(2-1), 最后求出流体速度沿隙缝断面分布的计算公式:

$$u_x = \frac{b^2}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l} \left( 1 - \frac{4y^2}{b^2} \right) \quad (2-3)$$

显然, 通过隙缝断面的液体流量

$$q = 2 \int_0^{\frac{b}{2}} u_x(y) dy$$

将(2-3)式的  $\mu_x$  代入上式后, 积分得

$$q = \frac{b^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (2-4)$$

由隙缝的单位断面面积流量求出流体运动的平均速度。

$$u = \frac{b^2}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l}$$

再按(2-2)式变换, 求出流体在隙缝中运动的基本方程式—布西涅斯基公式。

$$u = - \frac{b^2}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2-5)$$

有不少学者在多种窄缝槽中进行过水流实验, 证明上述方程式当雷诺数 ( $Re = \frac{2b\rho V}{\mu}$ ) 小于 1600 时是适用的。实验还证明, 针对裂隙的具体性质, 可在 (2-5) 式的基础上, 添加能反映隙面形状及其表面粗糙度的相应系数。

由 (2-5) 式, 可得出通过单位长度裂隙的流量公式, 即单个隙缝中水流的三次方定律:

$$Q = \frac{gb^3}{12\gamma} I \quad (2-6)$$

式中  $g$ —重力加速度。

$\gamma$ —运动粘滞系数

$I$ —平行于隙面的水力梯度

尼幼兹( Neuzil C. E. )于 1981 年把裂隙的宽度作为一个概率分布函数, 修改了三次方定律。他假定在一条裂隙截面上(垂直于水流方向), 取无数个点测量隙宽, 则隙宽的频率函数为  $f(b)$ , 三次方定律则表达如下:

$$Q = I \frac{g}{12\gamma} \int_0^\infty b^3 f(b) db \quad (2-7)$$

当隙宽为对数正态分布时, 有如下密度函数:

$$f(b) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma b} \exp\left[-\frac{(\ln b - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]; & b > 0 \\ 0 & b < 0 \end{cases}$$

尼幼兹给出了立方定律的修改式为:

$$Q = \frac{g}{12\gamma} \exp(3\mu + \frac{9\sigma^2}{2}) I \quad (2-8)$$

式中  $\mu$ ,  $\sigma$ —分布参数

### 第三节 裂隙水的定向流动

孔隙介质的导水空隙多属各向同形结构, 对任意孔隙个体而言, 流体是各向流动的. 而裂隙介质的导水隙缝均属线性结构, 流体只能沿隙缝限制的空间运动, 具定向流动特点.

设某裂隙的隙面单位矢量为  $\bar{m}$ , 隙面法向单位矢量为  $\bar{n}$ . 在该隙缝中任取点  $M$ , 考虑到包含点  $M$  的基元过水断面的法向与隙面法向一致时, 沿  $\bar{n}$  方向过点  $M$  的单位面积流量矢量或速度矢量等于零, 流体在  $M$  处通过该隙缝的运动方程式(2-5)可改写成如下矢量方程的形式

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \bar{u}_m + \bar{u}_n = \bar{u}_m \\ &= -\frac{b^2}{12\mu} (\nabla P \cdot \bar{m}) \bar{m} \\ &= -\frac{b^2}{12\mu} [ \nabla P - (\nabla P \cdot \bar{n}) \bar{n} ] \end{aligned}$$

由于

$$(\nabla P \cdot \bar{n}) \bar{n} = \nabla P ((\bar{n} \cdot \bar{n})) = (\bar{n} \cdot \bar{n}) \nabla P = (\bar{n} \cdot \bar{n}) \nabla P$$

式中  $(\bar{n} \cdot \bar{n})$ —矢量吉尔塔;  $\bar{I}$ —单位张量.

所以

$$\bar{u} = -\frac{b^2}{12\mu} [\bar{I} - (\bar{n} \cdot \bar{n})] \nabla P \quad (2-9)$$

此式说明, 裂隙中流体是在有效压力梯度  $[\bar{I} - (\bar{n} \cdot \bar{n})] \nabla P$  的驱动下, 沿隙面  $\bar{m}$  方向流动的. 这就是裂隙水定向流动的数学模型.

### 第四节 推广了的达西公式

在同一瞬间, 在介质的渗透率为  $K$  (量纲  $L^2$ ) 的渗流场内, 每点都有各自相对应的渗透速度  $\bar{v}$  (引用的) 和  $\nabla p$ . 若地下流体运动服从达西定律, 过法向单位矢量为  $\bar{n}$  的单位面



积流量或沿 $\bar{n}$ 方向的渗透速度

$$(\bar{v} \cdot \bar{n}) = -\frac{K_n}{\mu} (\bar{\nabla} p \cdot \bar{n}) \quad (2-10)$$

由(2-10)式

$$\begin{aligned} (\bar{v} \cdot \bar{n}) = v_n &= -\frac{K_n}{\mu} (\bar{\nabla} p \cdot \bar{n}) \\ &= -\frac{1}{\mu} (K_n \cdot \bar{n} \cdot \bar{\nabla} p) = -\frac{1}{\mu} (\bar{K}_n \cdot \bar{\nabla} p) \end{aligned} \quad (2-11)$$

现设 $\bar{K}$ 为二阶对称渗透张量,  $\bar{K}_c$ 为它的共轭张量, 根据张量运算法则, 有

$$\bar{K}_n = \bar{n} \bar{K} = \bar{n} \bar{K}_c = \bar{K} \bar{n} \quad (2-12)$$

将(2-12)式代入(2-11)式

$$(\bar{v} \cdot \bar{n}) = -\frac{1}{\mu} (\bar{K} \bar{n} \cdot \bar{\nabla} p) = -\frac{\bar{k}}{\mu} (\bar{\nabla} p \cdot \bar{n})$$

由于 $\bar{n}$ 方向的任意性, 可将上式写成如下通式。

$$\bar{v} = -\left(\frac{\bar{K}}{\mu}\right) \bar{\nabla} p \quad (2-13)$$

这便是拓广了的达西公式。它适用于各向同性的和各向异性的各类介质。

## 第五节 裂隙介质的渗透张量

假设在统计上为规则 and 均质的单纯裂隙介质模型中, 展布有由几个方向裂隙组构成的导水裂隙网络。以 $S_i$ 表示第 $i$ 组裂隙的密度(单位长度上的裂隙数); 以 $b_i$ 表示第 $i$ 组裂隙的隙宽。那么, 第 $i$ 方向裂隙组构成介质的裂隙度(%)等于 $b_i S_i$ 。按(2-9)式, 流体在介质中顺第 $i$ 方向裂隙组定向渗流的速度(引用的)矢量

$$\begin{aligned} \bar{v}_i &= b_i S_i \bar{u}_i \\ &= -\frac{b_i^3 S_i}{12\mu} [\bar{I} - (\bar{n}_i \bar{n}_i)] \bar{\nabla} p \end{aligned} \quad (2-14)$$

将此式与拓广了的达西公式(2-13)比较, 可知介质中第 $i$ 方向裂隙组的渗透张量为

$$\begin{aligned} \bar{K} = (\bar{K})_i &= \frac{b_i^3 S_i}{12} [\bar{I} - (\bar{n}_i \bar{n}_i)] \\ &= \frac{b_i^3 S_i}{12} \begin{bmatrix} (1 - \alpha_{xi}^2) & -\alpha_{xi} \alpha_{yi} & -\alpha_{xi} \alpha_{zi} \\ -\alpha_{yi} \alpha_{xi} & (1 - \alpha_{yi}^2) & -\alpha_{yi} \alpha_{zi} \\ -\alpha_{zi} \alpha_{xi} & -\alpha_{zi} \alpha_{yi} & (1 - \alpha_{zi}^2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-15)$$

式中 $\alpha_{xi}$ ,  $\alpha_{yi}$ ,  $\alpha_{zi}$ —第 $i$ 方向裂隙组隙面法向的方向余弦。