

裂隙水运动理论与 与渗流模拟实践

潘国营 武强 全长水 著



中国地质大学出版社

序

岩溶水的特性是复杂的,岩溶裂隙水的运动理论仍是当今水文地质学研究领域中的一个难题。本书作者以裂隙水非线性运动和岩溶裂隙水渗流模拟为核心开展深入的研究,是一次很好的探索。

目前,人们在研究裂隙介质中水的运动规律时,仍是较多地考虑达西定律或水流三次方线性定律,而对于水的非线性运动就没有更好地开展研究。作者在《裂隙水运动理论与渗流模拟实践》一书中,对裂隙水的非线性运动问题进行了研究,并在室内制成接近自然裂隙的人工粗糙隙缝,进行了大量水流模拟实验,以探索隙壁性质和流态对水流运动方程的影响,所取得的结果为人们进一步认识裂隙水运动规律做了有意义的贡献。

焦作地区的岩溶水系统是我国北方岩溶区发育比较典型的系统之一,虽然岩溶水资源丰富,但也构成岩溶大水矿区,突水灾害频繁,累计已发生突水 700 余次,淹井 14 次,最大突水量为 $320\text{m}^3/\text{min}$ 。位于开采煤层底板下的石炭系薄层灰岩和巨厚层奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层,是矿井突水的主要来源,特别是奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层,富水性强,承压水头高,水害问题尤为突出。裂隙不仅是岩溶含水层的主要含水空间和渗流通道,还是矿井突水通道,具有显著的非均质性、各向异性和非连续性特征。在水文地质学界,人们为研究裂隙介质中水的运动做了不少有意义的探索,提出了多种渗流模型,但应用裂隙水运动理论解决生产实践中难题的例子还不多见。本书作者选择了实用性和操作性强的广义双重介质渗流理论对焦作矿区岩溶水渗流进行了数值模拟研究,成果不仅对基岩水文地质学理论的发展起到有力的促进作用,还为解决生产实践中面临的大量裂隙水渗流问题提供了宝贵的经验。

本书针对焦作矿区岩溶水渗流、矿井突水、岩溶水污染等问题,从裂隙水运动角度进行了系统研究。如此全面的研究在该区还是首次,研究成果对于当地岩溶水资源的开发利用和保护、煤矿防治矿井突水都将产生积极的作用。

裂隙水运动理论仍是水文地质学领域的重要研究方向,面对全球性的水资源短缺和水污染问题,如何合理保护、开发裂隙水,仍是世界上需共同关注研究的问题,也有广泛的应用前景。希望作者继续开展研究,为基岩水文地质学发展做出新的贡献。

中国工程院 院士
中国地质科学院 研究员



2001 年 5 月 12 日

前 言

石炭一二叠纪是我国地质历史上 4 个主要成煤时期之一。其中,下二叠统山西组和下石盒子组为我国北方主要含煤岩系。该类煤田资源丰富,开采历史悠久,是我国煤炭资源重要组成部分。我国北方许多大中型煤田,例如江苏徐州、大屯煤田,安徽淮南、淮北煤田,河南鹤壁、焦作、平顶山煤田,河北邢台、峰峰、开滦煤田,山东淄博、兖州煤田及山西太原、霍县煤田等,均是石炭一二叠纪时期形成的。石炭一二叠纪煤田煤层底板普遍分布有数层石炭纪薄层灰岩和奥陶纪巨厚层灰岩,岩溶发育,富导水性强,水压高。特别是奥陶纪灰岩裂隙岩溶极其发育,水压极大,富水性好,补给条件充沛,对采煤构成很大的威胁,常造成大型岩溶突水淹井事故。尤其是山东淄博煤矿和河北省开滦煤矿发生的两次特大型突水淹井事故,震惊中外。焦作矿区属典型的华北型岩溶煤田,是我国著名的岩溶大水矿区,突水问题十分严重。据不完全统计,矿区共发生 700 多次突水,其中水量大于 $10\text{m}^3/\text{min}$ 的大型和特大型突水就有 61 次,最大突水量达 $320\text{m}^3/\text{min}$ 。突水共造成淹井事故 14 次,经济损失巨大。

裂隙和岩溶是华北型岩溶煤田岩溶含水层主要含水介质,矿井突水问题属于裂隙水渗流问题。但由于裂隙水渗流规律复杂,裂隙水渗流理论不够完善,至今为止,前人在涉及到与裂隙岩体渗流有关的计算问题时,都尽量回避裂隙介质和裂隙水渗流问题,用多孔介质的渗流理论进行有关的计算。理论和实践证明,多孔介质的渗流理论不能直接用于计算典型岩溶裂隙介质中水的运动问题。尽管国内外学者已提出很多裂隙网络渗流模型,但既符合野外地质条件又能解决实际裂隙水渗流计算问题的模型非常少。作为一种尝试,本书作者将广义双重介质渗流模型和三重介质三维渗流模型应用于华北岩溶煤田大型充水矿区——焦作矿区地下水渗流场模拟和涌水量预测,不仅解决了裂隙网络渗流模型理论与实践脱节的问题,还为解决矿井涌水量计算找到一条新途径。

本书第一作者 1984 年于原河北地质学院水文地质工程地质专业毕业后,一直在焦作工学院从事专业教学与科研工作。1988 年进入中国地质大学攻读水文地质专业硕士学位,1996 年又到中国矿业大学(北京校区)攻读地质工程专业博士并获博士学位。由于工作关系,经常到焦作矿务局所属煤矿指导学生生产实习或毕业实习,对焦作煤田突水水害之大有切身体会。作为一个水文地质专业工作者,深深感到自己应该为解决煤田突水问题做些力所能及的贡献,在这种强烈愿望驱动下,先后攻读了硕士研究生和博士研究生,论文选题也紧紧围绕煤矿突水问题。近几年来,作者不断致力于裂隙水运动机理和焦作矿区矿井水文地质科学研究工作:先后参加并完成了基岩水壁间运动理论研究、基岩矿坑突水条件及突水量、华北型煤矿井防治水决策系统的理论与实践研究等四项煤炭部科研课题的研究,研究成果分别获河南省教委科技进步一、二等奖,煤炭部第十六次科技进步奖三等奖,河南省科技进步奖三等奖;主持完成了矿井突水数值评价与预测方法研究(煤炭高等院校青年科学基金项目)和河南省焦作市地下水资源研究、河南省焦作市地下水动态与污染研究、焦作市城市地下水开发利用与保护研究、鹤壁矿区含水层水化学特征与突水水源识别方法研究等科研项目。可以说,本书就是作者多年从事科研工作的总结。

本书共六章。第一章重点讨论了水在单一粗糙缝隙中的非线性运动问题;第二章论述了拟

连续介质渗流模型、非连续裂隙网络渗流模型、狭义双重空隙介质渗流模型、广义双重介质三维渗流模型和广义三重介质三维渗流模型的建立方法和数学模型;第三章总结了焦作矿区奥陶系灰岩岩溶水水文地质背景,分析了岩溶水渗流特征,建立了焦作矿区奥陶系灰岩岩溶水系统广义双重介质三维渗流模型,成功地模拟了岩溶水在双重介质条件下的非均质和各向异性渗流场;第四章针对奥陶系灰岩岩溶水 Cl^- 污染问题,建立了分布参数的溶质运移模型;第五章以我国著名岩溶大水煤矿焦作演马矿特大型岩溶水突水为模拟对象,探讨了用三重介质三维渗流模型解决主干裂隙、裂隙岩块、突水管道三重介质条件下岩溶水渗流模拟问题;第六章概括地总结了作者在裂隙水运动机理和裂隙水渗流模型研究中所获得的主要结论。

本书部分内容选自于第一作者的博士论文。博士论文是在中国矿业大学(北京校区)武强教授的悉心指导下完成的,在此表示衷心的感谢。在研究过程中,曾得到中国地质大学(北京)万力教授、陈明佑教授、田开铭教授和清华大学王恩志博士的指导。王恩志博士还将自己编写的裂隙水渗流计算软件无偿地提供给作者使用,本书引用了王恩志博士的一些研究成果,谨此致谢。

裂隙水运动规律本身就比较复杂,理论上还不成熟,运用裂隙水渗流理论解决焦作矿区复杂水文地质条件下岩溶水渗流和矿井突水量计算问题,仅能说是作者的一种尝试。希望本书对推动裂隙水渗流理论研究和应用有所帮助。限于客观条件和作者的理论水平,书中错误或不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书由煤炭科学基金(网络系统基岩地下水运动理论研究)、焦作工学院重点学科建设基金和焦作工学院博士基金资助出版。

目 录

绪论	(1)
第一章 单一隙缝中水流的运动	(7)
第一节 单一光滑隙缝水流运动方程	(7)
第二节 粗糙隙缝中水流的非线性运动	(9)
第三节 单一粗糙隙缝水流非线性运动的实验研究	(11)
第四节 单一粗糙隙缝水流阻力系数	(23)
第二章 广义双重及三重介质三维渗流模型	(27)
第一节 单一空隙介质渗流模型	(27)
第二节 狭义双重介质渗流模型	(30)
第三节 广义双重介质三维渗流模型	(32)
第四节 广义三重介质三维渗流模型	(36)
第三章 焦作矿区奥灰岩溶水系统广义双重介质三维渗流模型	(39)
第一节 焦作矿区地质、水文地质背景	(40)
第二节 焦作矿区岩溶水渗流特征	(42)
第三节 主干裂隙网络和构造断块渗透性分析	(45)
第四节 广义双重介质三维渗流数学模型及求解	(49)
第五节 奥灰岩溶水渗流场的数值模拟	(51)
第六节 奥灰岩溶水未来水位预测	(57)
第四章 焦作矿区奥灰岩溶水溶质模拟	(65)
第一节 区域岩溶水水化学环境	(65)
第二节 奥灰岩溶水溶质模拟	(68)
第三节 溶质模拟过程与结果	(70)
第五章 演马井田主干裂隙-裂隙岩块-突水管道三重介质三维渗流模型	(74)
第一节 韩王-演马井田水文地质条件概述	(74)
第二节 主干裂隙网络及渗透性分析	(75)
第三节 裂隙岩块渗透性分析	(79)
第四节 广义三重介质水文地质概念模型	(81)
第五节 井田岩溶水疏降流场模拟	(83)
第六节 矿井涌水量预测	(88)
第六章 结论与展望	(90)
参考文献	(92)

绪 论

一、华北型石炭—二叠纪岩溶煤田底板岩溶水突水问题

华北型石炭—二叠纪岩溶煤田分布面积广,产量高,储量丰富,在我国煤炭生产中占有相当重要的地位。此类煤田煤层底板分布有石炭纪数层薄层灰岩和奥陶纪巨厚层灰岩岩溶含水层,承压水头高,富导水性强,是矿井底板充水的主要含水层。特别是奥陶纪灰岩裂隙岩溶极其发育,水压极大,富水性好,补给条件充沛,对采煤构成很大的威胁,常造成大型岩溶突水淹井事故。矿井突水水源主要是石炭系薄层灰岩和奥陶系厚层灰岩岩溶水,矿井突水形式主要表现为煤层底板突水。煤层底板突水问题比较突出的有河北的井陘、邢台、邯郸、峰峰和开滦,河南的鹤壁、焦作、平顶山、新密,江苏的徐州、大屯,安徽的淮南和淮北,辽宁的本溪等 30 多个煤矿。尤其是山东省淄博煤矿、河北省开滦煤矿发生的两次特大型突水淹井事故,震惊中外。1935 年 5 月 13 日,淄博北大井在第三水平—117m 北大巷 80 号上山采煤时,遇断距为 30m 的周瓦庄断层,使石炭系的徐庄灰岩与煤系底板奥陶系灰岩直接接触,导致高压奥灰水沿该断层向上流动,并通过徐庄灰岩突入巷道,突水量 $443\text{m}^3/\text{min}$,3 天之内矿井全部被淹,造成 538 名工人在井下遇难。1984 年 6 月 2 日,开滦矿务局范各庄矿 2171 工作面掘进中遇高 280m 的岩溶陷落柱,沟通了巷道与深部奥灰水的水力联系,致使高压奥灰岩溶水经导水陷落柱溃入矿井,最大涌水量达 $2\,053\text{m}^3/\text{min}$,仅 20 小时 55 分钟,便将一个年产 310 万吨、开采近 20 年的大型机械化矿井全部淹没,并造成 9 名工人遇难。涌水越过边界煤柱溃入邻近的吕家坨矿,致使吕矿也遭淹没而停产,与该矿相邻的林西矿受到严重水害威胁,也被迫停产。这次突水灾害造成直接经济损失 3.76 亿元,治水费 2.33 亿元。这次突水事故在世界采矿史上也是罕见的^①。最近几年又相继发生了多起大型突水事故,邢台某矿 1999 年发生一起重大透水淹井事故;2000 年 1 月 11 日江苏徐州大黄山煤矿一矿井发生大面积漏水事故,致使 63 名矿工被困于井下,死亡 20 余人。

二、矿井突水评价与预测现状

华北型岩溶煤田突水灾害频繁不断的原因,除与华北煤矿区复杂的地质、水文地质条件有关外,还与矿井突水灾害评价与预测方法的不科学或不完善有关。矿井突水预测应该包括突水时间、突水地点、突水水量和突水概率四个方面,目前,在煤矿防治水实践中,在矿井突水预测方面存在的问题有:

(1)注重突水量的预测,忽视突水地点、突水时间和突水概率的预报,对何时、何地突水,突水可能性有多大等问题缺乏足够的重视。

(2)临界突水系数法是评价和判断煤层底板能否突水的常用方法之一,该法简单实用,但

^① 中国统配煤矿总公司,煤炭科技情报研究所,煤矿水害事故典型案例汇编,1992。

存在明显不足。其一,突水系数只考虑了水压和隔水层厚度两个因素,没有考虑矿压、构造及矿区水文地质条件复杂程度对形成突水的作用;其二,突水系数不能表示突水的危险程度的高低。几十年的矿井水防治实践经验和理论证实,煤层底板突水是多种因素综合作用的结果,涉及采矿、岩石力学、地质及水文地质等方面十几种因素,而突水系数只考虑了水压和隔水层厚度,应用时常出现突水系数大于临界值不发生突水、突水系数小于临界值却发生突水的意外情况。

(3)计算和预测矿井突水量方法不够完善。在矿井防治水实践中,准确计算或预测涌水量是核心工作。目前,这个问题并没有得到很好的解决。在华北型岩溶煤田中,石炭纪薄层灰岩和奥陶纪灰岩岩溶发育,裂隙是岩溶地下水的主要含水介质,各种不同规模的裂隙相互交叉构成裂隙网络,裂隙网络是地下水的主要渗流和储水空间。裂隙发育具有显著的非均匀性、不连续性和各向异性,其间水的运动就常常表现出各向异性、不连续等裂隙水渗流所特有的渗流特征。裂隙不仅是岩溶含水层的主要含水空间和渗流通道,而且还是裂隙岩溶水进入矿井的主要通道。各矿区构造特别是断裂构造比较发育,多数断裂张开性较好,导水性强,并相互沟通,使深层岩溶水常沿断裂向上流动,造成矿井突水。因此,华北煤田的底板岩溶水突水问题实际上是裂隙水渗流问题,研究与矿井突水有关的矿井突水量计算与预测、矿井水防治、岩溶水资源评价等问题时必须考虑到这一点。由于裂隙介质特别是裂隙网络中水的渗流比较复杂,裂隙水渗流理论发展相对迟缓,至今为止,前人在涉及到与裂隙岩体渗流有关的计算问题时,都尽量回避裂隙介质和裂隙水渗流问题,为计算方便,把裂隙岩体当作由孔隙介质组成的具有各向同性、连续的假想岩体,将分布和运动于裂隙岩体中有限裂隙空间内的地下水平均地分配到整个裂隙岩体中,用多孔介质的渗流理论进行有关的计算。这种处理方法,极大地歪曲了裂隙介质和裂隙水渗流所特有的特征,所获得的结论往往是靠不住的,经不起现场的考验。根据全国岩溶充水矿山回访 50 个矿井统计,地质勘探报告中预测的涌水量和开采后实际涌水量相比,误差小于 30% 的只有 5 个,80% 的矿山预测涌水量和实际涌水量相差 50% 以上。计算结果严重脱离实际,不仅没能达到解决现场问题的目的,相反还造成一些不良后果。例如,根据计算结果设计矿山排水系统,设计排水能力如果小于实际涌水量,投产后将不可避免地出现突水淹井事故;如排水能力过大,因不必要地增加了防治水措施,又造成极大的浪费。多孔介质的渗流理论还无法真实刻画裂隙介质渗流的各向异性、定向性、非均质问题。例如,大型放水试验或发生大型突水时,沿矿区主要裂隙方向上地下水渗流迅速,水位反映敏感,而其他方向因地下水渗流缓慢,水位变化不明显或没有变化。

三、裂隙水运动理论及模型研究现状

1. 单一隙缝中裂隙水的运动

单一隙缝中水运动定律是研究裂隙网络水渗流的理论基础。目前普遍认为,水在隙壁光滑的单一隙缝层流运动时,隙缝断面上的平均流速 v 与水力坡度 I 成正比,与隙缝宽度 b 的二次方成正比,还与水的粘滞系数 μ 有关,即 $v = \frac{b^2}{12\mu} I$,这就是著名的布西涅斯基窄缝水流公式。该公式与多孔介质中的达西定律无实质差别。根据水力学理论和实验结果,流速与水力坡度之间的关系因水流流态和隙壁相对粗糙度不同而不同,可用指数型方程 $v = aI^m$ 表示。当水流为雷诺数较小的层流时, $m=1$; 当水流为雷诺数较大的层流或水流流态介于层流—紊流之间时, $m=1\sim 2$; 水流为完全紊流时, $m=2$ 。尽管如此,目前人们在研究水在裂隙中的运动问题时,不考

虑水流流态和隙壁粗糙度对水流运动规律的影响,认为流速与水力坡度间的线性关系即布西涅斯基窄缝水流公式是无条件成立的,这是一种误解。单一裂隙水流方程是研究水在岩体裂隙网络中运动状况的理论基础,尽管布西涅斯基公式已被水力学理论和实验所证实,但对公式的适用范围目前还缺乏研究。

2. 裂隙网络中水的运动

岩体中的裂隙不以裂隙个体为存在形式,常表现为裂隙网络。不同成因、不同规模、不同方向的裂隙相互切割、穿插,在三维空间上构成形式各异的裂隙网络。裂隙的组合、交叉、交切形式是不固定的,裂隙网络渗透空间结构是复杂的,具有各向异性、不连续、非均质等特征。水在裂隙网络中的渗流不仅具有各向异性、不连续等特征,田开铭实验和理论证实,裂隙交叉点上还存在偏流、偏向效应。正因为如此,水在裂隙网络中渗流的研究起步较晚,进展也较为缓慢。20世纪60年代中期, Snow D. T., Pomm E. C. 和 Louis C. 等人用渗透张量方法建立了各向异性裂隙介质的渗流模型,并成为这一研究领域的先驱。自70年代以来,各国许多专家学者开始重视裂隙网络水渗流理论的研究,迄今为止,已提出十几种具有代表性的裂隙网络模型。然而,令人遗憾的是这些模型多数是极其理想化的模型,只能用于解决结构简单裂隙网络水渗流计算问题,不能解决工程中出现的实际问题。因此,结合具体的实践问题建立实用性网络渗流模型,成为亟待解决的现实问题。目前,根据建立渗流模型所考虑的空隙介质类型和数量,可将裂隙介质水渗流模型分为单一空隙介质渗流模型(包括等效连续介质渗流模型和非连续介质渗流模型)、双重空隙介质渗流模型(包括狭义模型和广义模型)、孔隙-裂隙-管道三重介质渗流模型。

(1) 等效连续介质渗流模型。等效连续介质渗流模型实质上就是把裂隙岩体视为一假想的连续介质体,把水在裂隙中的渗流平均到整个裂隙岩体中,不具体研究单一裂隙中水的运动,重点研究裂隙岩体整体所表现出来的宏观渗流特征。它首先将裂隙中的水流等效平均到整个裂隙岩体中,再将其视为具有对称渗透张量的各向异性介质连续体,利用多孔介质渗流理论建立渗流方程。这是目前计算裂隙介质渗流问题时使用最多的模型。这类模型有 Pomm 模型、Snow 模型、田开铭改进的渗透张量模型等。这些模型实际上非真正意义上的裂隙介质模型,只是沿用多孔介质渗流理论解决裂隙水的渗流问题。由于平均效应实际上是对裂隙介质渗透空间结构和裂隙水渗流特征的歪曲,因此不能刻画出裂隙水的不连续性、各向异性特征。有资料表明,这种模型对那些裂隙密集,且分布均匀、裂隙方向杂乱无章的视均质裂隙岩体的渗流问题适用性较好,然而,这类岩体在自然界中分布有限,也无水文地质意义。

值得特别提出的是,陈崇希(1995)针对岩溶含水介质空隙介质的组成和空隙介质的水力特征将岩溶裂隙岩石中的空隙分为三类:①孔隙介质(包括孔隙和微裂隙),主要起储存、释水作用,其水流遵循达西定律;②中宽裂隙和宽裂隙,起导水作用,其水流遵循布西涅斯基方程(拓宽的达西定律);③岩溶管道,起导水作用,但其水流呈非线性水力特征。引入了折算渗透系数的概念,将裂隙和岩溶管道在达西流和非达西流状态下的渗透系数按不同方式折算成多孔介质达西定律中的渗透系数,从而将达西流与非达西流耦合在同一个水流方程之中,建立了岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模型。模型考虑了岩溶管道、孔隙和裂隙对地下水流的贡献以及水在各类空隙中运动规律的不同,并将水在三类不同空隙介质中的运动按多孔介质渗流理论建立了统一地下水流控制方程。

(2) 非连续介质渗流模型。非连续介质渗流模型是真正意义的裂隙网络渗流模型,它以岩体裂隙网络中的裂隙个体为研究对象,建立裂隙个体水流运动方程,将所有方程组合在一起,

从而可以确定裂隙网络中水流特征。这类模型充分考虑了裂隙介质的非均匀性、各向异性、非连续性等特征,能完全刻画裂隙水的渗流特征。但是,在现有的技术条件下它很难被应用于解决实际问题。原因主要有:①一个较大范围的裂隙岩体中,裂隙数量非常多,现有勘探技术条件不可能查清每条裂隙的几何参数(隙宽、方位、延伸长度)和水力学参数;②由于裂隙数量非常多,裂隙网络中的交叉点将不计其数,计算时需为每一个交叉点建立方程,未知数相当多,计算上难以实现;③完全忽略裂隙间岩块的渗透性也与实际不符。尽管这类模型是真正意义上的裂隙模型,但无太大的应用价值,仅适用于体积有限、裂隙网络简单且清楚的岩体裂隙渗流问题。属于这种模型的有:Wittke 线素模型、Vacian Halek 三向正交管道流模型、Long 圆盘裂隙三维模型、Dershowitz 多边形裂隙模型等。

(3)双重空隙介质渗流模型。双重空隙介质渗流模型又称孔隙-裂隙介质渗流模型。该模型认为裂隙岩体是由储水性差而导水性很强的裂隙系统和储水性好而导水性弱的岩块孔隙系统共同组成的统一体,岩块孔隙系统和岩体裂隙系统之间的渗透性差别很大,二者具有相对独立的渗流特征,孔隙水和裂隙水依靠二者间的水头差发生水力交换。该模型考虑了裂隙岩体中裂隙系统和孔隙系统的水力交换,较符合实际,但丝毫没有涉及岩体中导水裂隙具体的空间展布,并不能表现出裂隙岩体的各向异性、不连续性等渗流特征,模型仍建立在多孔介质渗流理论的基础上。在具体应用时,还必须对裂隙系统的具体配置及形状作一定的假设,同时,裂隙与孔隙的交界面上会出现两个不同的水头值,既难理解又难确定,使模型在实践中的应用受到很大的限制。

(4)广义的双重介质渗流模型。这类模型的建模思想是由国内王思志博士在前几年率先提出来的,是对双重介质渗流理论的发展。该模型从实用角度出发,将裂隙岩体中的裂隙按对水渗流所起的作用划分为主干裂隙和次要裂隙。主干裂隙由规模较大、分布稀疏的大裂隙组成,其渗透性强,对裂隙水的渗流起主导作用,是裂隙水的主要通道;次要裂隙主要是指规模较小、分布密集、渗透性较差的小裂隙,它们分布密度大,数量多,张开度和导水性差,有较大的储存空间,主要起储水作用。对主干裂隙网络建立非连续介质渗流模型,对次要裂隙网络连同主干裂隙间岩块中的孔隙建立等效连续介质渗流模型,将二者有机地耦合在一起组成联合模型。这种模型吸收了双重介质渗流模型的建模思想,并将非连续介质渗流模型和等效多孔介质模型有机地结合在一起,既能充分体现水在主干裂隙中渗流所表现出的非均质、不连续、各向异性等特征,又能反映出裂隙岩体中小裂隙和孔隙在水储存方面所表现出来的多孔介质渗流特征,符合一般地质条件下裂隙岩石中水的渗流特征。更重要的是它可方便用于解决与裂隙水渗流有关的实际问题。目前的技术条件下,虽然难以查明岩体中的每条裂隙的几何及水力参数,但查清岩体中起主导水作用并对裂隙水渗流贡献较大的那些主干裂隙是完全可以做得到的。因此,这种模型将会在解决现场条件下的复杂的裂隙水渗流问题中发挥很好的作用,这一点正是其他类型的模型难以办到的。

以上几种裂隙介质渗流模型从不同侧面概括和表现了裂隙岩石渗透空间结构特征和水流运动特征,各自都有特定的适用范围和应用条件。比较而言,现有裂隙介质渗流模型中,在狭义双重空隙介质渗流理论上发展起来的广义双重介质渗流理论实用性强,最适合用于解决实际复杂条件下裂隙水渗流模拟问题。王思志提出了广义双重介质渗流理论,并将其用于开滦矿区赵各庄矿奥灰突水量预测,但所建立模型是平面二维的。通过建立广义双重介质三维渗流模型以及广义三重介质三维渗流模型,解决非连续各向异性岩溶裂隙介质地下水渗流模拟和矿井涌水量计算的实例,目前还没有。

四、研究内容及研究意义

焦作矿区属典型的华北型岩溶煤田,是我国著名的岩溶大水矿区,突水问题十分严重。据不完全统计,矿区共发生 700 多次突水,其中水量大于 $10\text{m}^3/\text{min}$ 的大型和特大型突水就有 61 次,最大突水量 $320\text{m}^3/\text{min}$ 。突水共造成淹井事故 14 次,经济损失巨大。目前,矿区排水量 $400\sim 500\text{m}^3/\text{min}$,年排水费用高达 $800\sim 1\,000$ 万元,87% 的煤炭资源仍受岩溶水威胁。就焦作矿区来说,煤层底板突水占总突水次数 75% 以上,不仅发生次数多,而且突水量大,造成的突水危害一般规模大,损失严重,对煤矿安全生产构成严重威胁。随着矿井向深部延伸发展以及新煤田的开发,底板突水所占比例将会越来越大,突水危害也越来越严重。因此,防治煤层底板岩溶突水在华北煤田各矿区是一项十分重要的工作。

围绕解决矿井涌水量和水位预测问题,我们以典型的华北型岩溶充水矿区——焦作矿区为研究对象开展了专题研究。焦作矿区主要开采大煤,煤层底板之下分布有石炭纪薄层灰岩和构成煤系地层基底的奥陶纪灰岩(简称奥灰,用 O_2 表示)。石炭纪薄层灰岩中的第八层(简称八灰,用 I_8 表示)和第二层灰岩(简称二灰,用 I_2 表示)及奥陶纪灰岩,裂隙岩溶发育,水量丰富,水压高,是矿井充水的主要含水层。裂隙不仅是三层岩溶含水层主要含水介质,也是岩溶裂隙水进入矿井的通道。矿区断裂构造发育,主干断裂大多是岩溶地下水的强径流带,控制着岩溶水渗流的总体方向,一些大型断裂具有很强的垂向导水作用,使深部岩溶水沿断层向上运动,进入矿井造成突水。焦作矿区岩溶突水问题实质上是典型的裂隙水渗流问题,必须依靠裂隙介质渗流理论来研究。要真正实现准确刻画岩溶水运动时表现出来的各向异性、极不均匀、定向流等特征和达到正确计算、预测水位、水量目的,最关键的问题是要建立符合现场水文地质条件的裂隙水渗流模型。

本书研究内容涉及裂隙水运动理论研究与应用研究两个方面,主要包括:

(1)单一粗糙隙缝中水流非线性运动的实验研究。单条裂隙是裂隙网络的基本单元,单条裂隙中水的运动规律是研究水在岩石裂隙网络中运动的理论基础。反映水在单条裂隙中运动规律的水流三次方定律,是在隙缝隙壁光滑理想条件下得到的,方程表明流速和水力坡度呈线性关系。根据水力学理论和实验,隙壁粗糙性和水流的流态对水流运动规律有一定影响,在一定条件下,水流为非线性流。目前,人们在认识和研究裂隙介质中水的运动规律时,普遍存在着一种错误的认识,即认为水在裂隙中的流动无条件地遵守达西定律或水流三次方线性定律,忽略或否认水的非线性运动。为此,在室内制成接近自然裂隙的人工粗糙隙缝,进行单一隙缝水流模拟实验,对布西涅斯基公式的适用范围和水流的非线性运动问题进行实验研究。

(2)广义双重介质三维渗流模型。焦作矿区裂隙岩溶水系统是我国北方岩溶区发育比较典型的系统之一,区内寒武—奥陶系灰岩出露面积广,厚度大,裂隙岩溶发育,富含岩溶水。岩溶裂隙是岩溶水主要富集和渗流空间,岩溶裂隙介质的不均匀性、各向异性、不连续性特征十分明显,且不同规模的裂隙对岩溶水渗流的贡献有所不同。传统的多孔介质渗流理论不能真实准确地刻画岩溶水在各向异性非连续裂隙岩溶介质中的渗流特征,唯有建立有别于多孔介质渗流理论的岩溶裂隙网络水力模型才是最好途径。为此,对那些控制矿区岩溶水分布且起主导渗透作用的大断层建立非连续介质裂隙网络三维渗流模型,对大断层间的裂隙岩块建立拟连续介质渗透张量三维渗流模型,两模型耦合在一起组成主干裂隙-裂隙岩块广义双重介质三维渗流模型。并将这种双重介质三维渗流模型首次应用于华北型岩溶煤田——焦作矿区区域裂隙岩溶水渗流场模拟和预测,使模型能够真实地刻画矿区裂隙水运动特征和渗流场分布,完全能

够体现大型抽水或大型突水后的流场空间分布和动态特征。

(3)华北型岩溶煤田矿井涌水量预测的广义三重介质三维渗流模型研究。煤层底板突水问题是华北型岩溶煤田普遍存在的问题。突水通道主要有陷落柱、断层、封闭不良钻孔和底板采矿裂隙等。底板突水通道多为小断层、裂隙密集带和钻孔等,可以将它们概化成一维垂直导水管道,将其叠加在广义双重介质渗流模型中,建立主干裂隙-裂隙岩块-突水管道三重介质三维渗流模型,模拟再现以裂隙、钻孔等为导水通道的突水及突水后的流场分布,使模型可以对矿区不同尺度范围的矿井突水量进行预测。

(4)区域岩溶水水质模拟。焦作矿区岩溶水资源丰富,水质优良,是城市工农业生产和居民生活的主要供水源。目前,岩溶水已受到污染,主要污染物为氯化物。在全矿区双重空隙介质渗流模型的基础上,根据模拟效果适当简化了渗流模型,并添加溶质运移方程,建立了矿区范围的岩溶水溶质场-渗流场模拟模型,对矿区岩溶水的污染原因进行初步模拟。

至今为止,国内外学者已提出很多裂隙网络渗流模型,但既符合野外地质条件又能解决实际裂隙水渗流计算问题的模型非常少。本书首次将广义双重和三重介质三维渗流模型应用于华北型岩溶煤田大型充水矿区——焦作矿区地下水渗流场模拟和涌水量预测,不仅解决了裂隙网络渗流模型理论与实践脱节问题,还为解决矿井涌水量计算找到一条新途径。突水问题是华北型岩溶煤田各矿区普遍存在着的问题,而且都与裂隙水渗流有关,本研究成果虽针对焦作矿区,也可以推广到华北型岩溶煤田其他矿区。不仅如此,对于解决石油开发、水电工程、基岩地下水开发、核废料深埋处理、边坡工程、水库大坝建设等人类工程中面临的大量裂隙水渗流问题,都有重要的实践意义。

第一章 单一隙缝中水流的运动

第一节 单一光滑隙缝水流运动方程

岩体中通常发育有多组裂隙,不同方向、不同规模、不同成因的若干组裂隙按一定方式相互交叉、切穿组成裂隙网络,水在裂隙网络中运动。单一裂隙是裂隙网络的基本组成单元,是水储存和运移的基本空间。单一裂隙中水流运动规律是研究水在裂隙网络中运动的理论基础。

单个裂隙形状是极不规则的,在裂隙延伸方向上裂隙断面形状、隙壁张开度、隙壁粗糙度都随机变化,有时裂隙内还存在充填物质。这些因素都会对裂隙中水运动的特征产生影响。为方便推导单一隙缝水流方程,一般将裂隙概化成两个壁面互相平行、互不接触的板状隙缝。

设平行板状隙缝间的距离为 b (隙宽),在隙缝流中取一单宽微小液体块,作用在其上的各种力如图 1-1 所示。

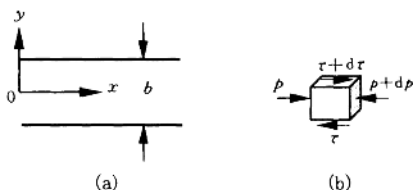


图 1-1 平行隙缝间水的流动

(a) 平行板状隙缝; (b) 微小液块受力分析图示; p ——水压力; τ ——内摩擦应力

沿流向方向(x 轴)平衡方程为

$$p dy - (p + dp) dy + \tau dx - (\tau + d\tau) dx = 0$$

化简得

$$-dp dy - d\tau dx = 0$$

或

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} \quad (1-1)$$

根据牛顿内摩擦定律 $\tau = -\mu \frac{du}{dy}$, 有

$$\frac{d\tau}{dy} = -\mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (1-2)$$

代入式(1-1), 得

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1-3)$$

式中: $\frac{dp}{dx}$ 为水压力 p 在 x 方向上的变化率; μ 为粘滞系数; $\frac{du}{dy}$ 为水流速度 u 在 y 轴方向上的速度梯度。

如果沿隙缝长 Δl 的压力损失为 Δp , 则

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{\Delta l}$$

代入式(1-3), 得

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (1-4)$$

对式(1-4)进行二次积分, 得

$$u = -\frac{\Delta p}{2\mu\Delta l} y^2 + c_1 y + c_2 \quad (1-5)$$

式中: c_1, c_2 为积分常数, 其值由边界条件确定。

在隙壁 $y = \pm b/2$ 处, $u = 0$ 。将这一边界条件代入方程(1-5)中, 解联立方程, 求得 $c_1 = 0, c_2 = -\frac{\Delta p}{8\mu\Delta l} b^2$ 。将 c_1, c_2 值代入上式, 则

$$u = \frac{\Delta p}{8\mu\Delta l} (b^2 - 4y^2)$$

这表明在两平行板之间过水断面上的速度分布为抛物线。在 $y = 0$ 处即两平行板中间流速最大, 为

$$u_{\max} = \frac{b^2 \Delta p}{8\mu \Delta l} \quad (1-6)$$

通过任意过水断面单宽流量为

$$q = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} u dy = \frac{\Delta p}{8\mu\Delta l} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} (b^2 - 4y^2) dy = \frac{b^3 \Delta p}{12\mu\Delta l}$$

任意过水断面上的平均流速 v 为

$$v = \frac{Q}{b} = \frac{b^2 \Delta p}{12\mu\Delta l}$$

水流方向两断面之间的水头差 $\Delta h = \Delta p / \gamma$, 其中 $\gamma = \rho g$, 所以

$$v = \frac{\rho g b^2 \Delta h}{12\mu \Delta l} \quad (1-7)$$

这便是著名的布西涅斯基窄缝水流公式。它表明水在隙壁光滑的隙缝中作层流运动时, 流速与水力坡度的一次方成正比, 也可以说沿程水头损失与平均流速的一次方成正比。

用 q 表示通过窄缝任意断面的单宽流量, 则:

$$q = \frac{\rho g b^3 \Delta h}{12\mu \Delta l} = \frac{g b^3 \Delta h}{12\nu \Delta l} \quad (1-8)$$

式中: ν 为运动粘滞系数 ($\mu = \rho\nu$); g 为重力加速度; ρ 为水的密度。

用 $I = \frac{\Delta h}{\Delta l}$ 表示单位流段长度上的水头损失即水力坡度, 则式(1-8)可写成

$$q = \frac{g b^3}{12\nu} I \quad (1-9)$$

这就是单一隙缝中水流的三次方定律。表明水在隙壁光滑的单一隙缝中层流运动时, 通过隙缝的流量与隙宽的三次方成正比, 与水力坡度的一次方成正比, 并与水流的运动特性有关。

以 λ 表示阻力系数, 对式(1-7)作适当变换, 得到沿程水头损失的表达式

$$\Delta h = \frac{12\mu\Delta l}{\rho g b^3} v = \frac{48\mu\Delta l v^2}{\rho b v 2b 2g} = \frac{96}{2b v \rho} \frac{\Delta l v^2}{2b 2g} \frac{1}{\mu}$$

因为 $Re = \frac{2bv\rho}{\mu} = \frac{2bv}{\nu}$, 所以

$$\Delta h = \frac{96\Delta l v^2}{Re 2b 2g} = \lambda \frac{\Delta l v^2}{2b 2g} \quad (1-10)$$

式中: Re 为雷诺数。

由式(1-10)可知, 平行板缝的阻力系数 λ 相当于

$$\lambda = \frac{96}{Re} \quad (1-11)$$

式(1-11)说明水在隙壁光滑的隙缝中层流运动时阻力系数只是 Re 的函数, 与相对粗糙度无关。

天然裂隙的隙壁一般都比较粗糙, 水流在其间运动时也未必保持层流状态, 流速较大时, 流态必然是紊流或接近紊流, 在这种情况下, 流态和相对粗糙度都会影响阻力系数, 同时, 水流速度和水力坡度可能为非线性关系。布西涅斯基窄缝水流公式是在隙壁光滑且水流为层流的前提条件推倒出来的, 它的应用受到一些限制。一些学者曾在各种窄缝槽中进行过水流实验, 证明它仅仅适用于雷诺数小的层流。

第二节 粗糙隙缝中水流的非线性运动

流体力学理论和试验研究表明, 流体在管道中运动时其沿程水头损失 h_f 与断面平均流速 v 、流体密度 ρ 、管径 d (水力半径 R)、流体粘滞系数 μ 以及管壁绝对粗糙度 Δ 等多种影响因素有关。写成隐函数的形式有

$$h_f = f(v, \rho, d, l, \mu, \Delta)$$

经过量纲分析, 上式可以写成层流的沿程损失计算公式

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

$$\lambda = f(Re, \frac{\Delta}{d})$$

式中: $\frac{\Delta}{d}$ 为管壁相对粗糙度。

雷诺数为一无量纲数, 是判断水流流态的依据。雷诺数较小时, 水流为层流, 雷诺数增大, 水流会由层流过渡为不完全紊流直至完全紊流。层流和紊流不仅现象不同, 而且沿程损失规律不一样。1883年雷诺实验证实: 层流条件下, 沿程损失与流速的1次方成正比, 即流速和水力坡度的1次方成正比; 紊流条件下, 沿程损失与平均流速的1.75~2次方成比例。

为研究流态和隙缝粗糙度对水流运动的影响及布西涅斯基方程适用性问题, 许多学者都进行了大量的实验研究。尼古拉茨(Nikuradse J.)最详细地研究了圆形管道表面相对粗糙度对水流的影响效应, 他将粒径相同的砂粒均匀粘在圆管壁上, 人工制成各种相对粗糙度不同的圆管。在这样的管道上按不同流速分别进行实验, 以 Re 为横坐标, λ 为纵坐标, 得到各种相对粗糙度圆管的 $\lambda-Re$ 关系曲线。主要结论是:

(1) $Re \leq 2320$ 时, 水流为层流, λ 与 Δ/d 无关, 只是 Re 的函数, $\lambda = 64/Re$ 。此时, 沿程水头损失 h_f 与流速 v 的1次方成正比。

(2) $2\ 320 \leq Re \leq 26\ 98 (\frac{d}{\Delta})^{\frac{5}{8}}$ 时, 水流为层流和紊流的过渡区或紊流, 粗糙度对 λ 没有影响, $\lambda = 0.316\ 4 Re^{-1/4}$ 。此时, 沿程损失 h_f 与流速 v 的 1.75 次方成比例。

(3) $26\ 98 (\frac{d}{\Delta})^{\frac{5}{8}} < Re < \frac{191.2}{\sqrt{\lambda}} (\frac{d}{\Delta})$ 时, 粗糙度对阻力产生影响, $\lambda = f(Re, \frac{\Delta}{d})$ 。

(4) $Re > \frac{191.2}{\sqrt{\lambda}} (\frac{d}{\Delta})$ 时, 阻力系数 λ 与雷诺数 Re 无关, $\lambda = f(\frac{\Delta}{d})$ 。此时, 沿程损失与速度的 2 次方成正比, 阻力系数为

$$\lambda = \frac{1}{(1.14 + 2 \lg \frac{d}{\Delta})^2}$$

尼古拉茨实验说明管壁粗糙度和流态影响管道水流运动特性, 尽管实验是在圆形管道中进行的, 但其基本结论也适用于粗糙隙缝中水流运动。由此可以推断, 布西涅斯基公式成立是有条件的。

1911 年 Stanton T. E. 将大小不同的两个圆形管道内壁车成罗纹, 并使两个管道的相对粗糙度相等, 通过水流实验对圆形管道中水流运动机理进行了研究; 1928 年 Davis S. T. 和 White C. M. 在不同宽度的矩形管道中进行了水流运动模拟实验。这些研究者所做实验均证实布西涅斯基公式适用于层流。Ломмзе 和 Louis 对水在隙缝中的运动进行了大量实验, 实验都证实窄缝水流三次方定律仅适用于层流条件。水流为紊流时, Ломмзе 得到的窄缝水流公式为

$$q = 4.7b \left[\frac{g^4 I^4 b^5}{\nu} \right]^{1/7} \quad (1-12)$$

式(1-12)的适用上限雷诺数 $(Re) = \frac{vb}{2\nu} = 600$

Louis 得到的水流公式为

$$q = \left[\frac{g}{0.079} \left(\frac{2}{\nu} \right)^{1/4} I b \right]^{0.57} \quad (1-13)$$

式(1-13)的适用上限雷诺数 $(Re) = \frac{2bv}{\nu} = 2\ 300$

Ломмзе 和 Louis 均是以雷诺数 Re 为划分裂隙水流态的标准, 其定义与水力学中圆管流相似, 且临界雷诺数值也基本上同圆管的临界雷诺数 $(Re = 2\ 300)$ 相等。不过, 二人关于雷诺数的表达式略有一定差异。但都说明在 $Re \geq 2\ 300 \sim 2\ 400$ 条件下, 水流速度和水力梯度为非线性关系。速宝玉、詹美礼、赵坚等对裂隙岩体渗流机理进行了系统的实验研究, 做了大量水流实验, 实验也证实水流三次方定律在层流条件下是适用的。^① Ломмзе 和 Louis 还研究了粗糙隙缝中水流的运动, 提出了粗糙隙缝水流公式。Ломмзе 层流公式为

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} I \frac{1}{1 + 6(\frac{\Delta}{b})^{1.5}} \quad (1-14)$$

紊流公式为 $q = b \sqrt{gbI} [2.6 + 5.1 \lg(b/2\Delta)]$ (1-15)

式(1-14)上限临界雷诺数 $(Re) = 600 [1 - 0.96(\Delta/b)^{0.4}]^{1.5}$

式中: $Re = \frac{bv}{\nu}$

Louis 粗糙隙缝层流公式为

① 河海大学水电系, 裂隙岩体渗流特性试验研究(科研报告), 1995。

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} I \frac{1}{1 + 8.8 \left(\frac{\Delta}{b}\right)^{1.3}} \quad (1-16)$$

紊流公式为

$$q = 4b \sqrt{gIb} \lg(1.9 \frac{b}{\Delta}) \quad (1-17)$$

前人的研究说明窄缝水流三次方定律仅适用于光滑隙缝中的层流运动,雷诺数大于 2 300 时,流速与水力梯度间是非线性关系。

第三节 单一粗糙隙缝水流非线性运动的实验研究

自然界中不存在绝对光滑的裂隙,裂隙断面形状也并非沿流程保持不变,裂隙中的水流未必是层流状态,在这些非理想条件下,水流速度和水力坡度之间是否仍保持布西涅斯基公式中的线性关系呢?国内外学者对此问题曾进行过实验研究,得到一些有价值的成果。前人在进行单一裂隙水流模拟实验时,一般采用玻璃、塑料、钢材等材料制做人工隙缝,用这些材料制成的人工裂隙与岩层中自然裂隙在几何性质、隙壁粗糙性等方面相差甚远,不能很好地模拟岩层中的自然水流。为准确了解水流在粗糙隙缝中的运动规律,以水泥和砂按一定比例混合后制成接近自然界岩石裂隙的人工隙缝,在室内进行了单一隙缝水流模拟实验研究。

一、实验装置

实验装置如图 1-2 所示。长 5m、宽 1.6m、高 0.78m 的实验槽中间垂直放置了用两排平行的模板(水泥板)拼接而成长 4.5m、高 0.55m 的板状隙缝,两排模板间的距离即为隙缝的宽度。实验槽首端设有可以控制水位高度的供水槽,它与人工隙缝相连通,用来给实验槽中的隙缝供水;实验槽末端设有排水槽,流出隙缝水先流入排水槽,然后从排水槽流走。排水槽下部设有水量控制阀门,实验时也可以通过调整出水量控制隙缝水位分布和流速。从排水槽流出来的水被引入到安装有三角堰的水池中,以便测量通过隙缝水流量,实验时用三角堰法和容积法两

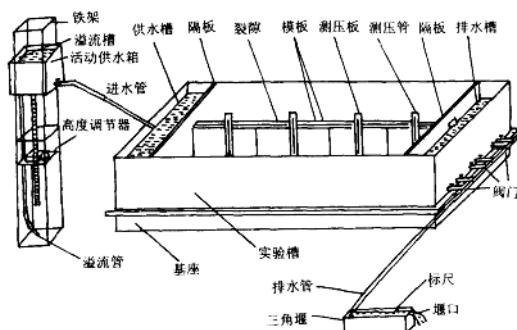


图 1-2 单一隙缝水流实验装置示意图

种方法测量流量。拼接人工隙缝的模板是用水泥和粒度均匀的砂以 1:2.5~1:3 的比例混合后加工而成。为使模板有不同的粗糙度,以粗细不同的砂制作模板。不同粗糙度的砂制作出来的模板表面粗糙程度是不同的,按表面粗糙程度,分粗糙、中等粗糙和稍光滑三种。每块模板长 75cm,高 55cm(裂隙高度)。事先预制多块不同粗糙度的模板。实验开始前,将若干块同一粗糙度的模板在实验槽内拼接成隙缝。两排模板之间保持一定的间距(隙宽),由此便可拼成不同粗糙度和不同隙宽的人工裂隙。模板上设有用来和测压管相连接的孔口,实验时连接在测压管上,用来测量隙缝不同过水断面上的水头高度。

二、实验条件和实验方法

实验时通过改变进水端供水水槽高度和出水端水量来控制隙缝中水流状态和水头分布。当隙缝中水流达到稳定状态后,记录测压管水位,测量通过隙缝的水流流量。然后调整隙缝中水流状态,改变进水端水位或出水量,重复进行另一组实验。某种几何条件的隙缝水流实验完成后,改变隙宽或更换其他粗糙度模板并重新组装隙缝,再进行水流模拟实验。拼接成的隙缝的宽度有 2mm、3mm、4mm、6mm 和 8mm 几种;表面粗糙程度有粗糙、中等粗糙和稍光滑三种;隙缝全长 4.5m,高 0.55m。

三、实验结果及分析

用隙缝上两不同断面测压管水位差(H_1-H_2)和距离(l)来计算水力坡度 I ,即 $I=(H_1-H_2)/l$,用实测流量(Q)与过水断面面积之比来计算隙缝过水断面上的平均流速(v),即 $v=Q/(b \times h)$ 。其中 b 为隙宽, h 是隙缝上两过水断面水流高度的平均值。表 1-1、表 1-2 和表 1-3 是不同粗糙度、不同隙宽隙缝的水流实验结果。

为分析水流速度和水力坡度之间的关系,以水力坡度 I 为横坐标,水流速度 v 为纵坐标,将实验数据做成 $v-I$ 散点图(图 1-3、图 1-4、图 1-5)。

从 $v-I$ 散点图来看, v 与 I 似乎呈直线正相关关系,果真如此的话,则可以认为布西涅斯窄缝水流公式是成立的。其实这仅仅是一种表面现象,二者间的关系并非这样简单,分析如下:

假设水流速度 v 与水力坡度 I 满足以下线性关系,即

$$v=a+bI$$

以水力坡度 I 为自变量、水流速度为因变量,对二者进行线性相关分析,采用最小二乘法估计系数 a 、 b 。分析结果如表 1-4。

从表 1-4 看出,各种水流条件下流速和水力坡度都有密切的相关性,直线回归方程的相关系数均大于 0.95,但这并不能说明流速和水力坡度一定是线性正比例关系。这是因为:第一,不论是在理论上或是在实践中,当水力坡度为零时,隙缝中水流速度一定是零,水保持静止状态。然而,相关分析建立的直线回归方程都不通过原点,意味着水力坡度为零时流速不等于零,有较大的值。第二,用相关方程计算得到的流速值和实测流速值之间有较大的误差,当流速较小或者流速较大时,误差就更大(表 1-5、表 1-6)。

水在隙缝中流动时,当水流为雷诺数较小的层流时,水流速度与水力坡度满足线性关系;当水流是混合流或者完全紊流时,水流速度与水力坡度间为非线性关系,可表示成为 $v=aI^m$, $m=1\sim 2$ 。为检验流速与水力坡度是否满足这种形式的非线性关系,并估计指数 m 的范围,假定 $v=aI^b$,仍用最小二乘法估计公式中 a 和 b 值。考虑到流速直接影响到水流状态和流速与水力坡度间关系,选择了不同流速范围的数据进行分段相关分析,分析结果如表 1-7。