

裂隙水渗流特性与含水层划分方法研究

聂龙龙

河北省煤田地质局环境地质调查院, 河北 石家庄 050000

[摘要]文中依托现场水文地质调查、钻孔原位测试及室内岩样实验等综合技术手段, 系统研究了复杂地质条件下裂隙水的渗流特性与含水层划分方法。研究显示裂隙分布的空间特征、连通性与开度对渗流特性起着关键作用, 基于等效连续介质和离散裂隙网络这两种模型, 裂隙介质渗透系数的定量表征办法得以建立且考虑裂隙密度、开度和方向的计算公式也被提出, 就含水层划分而言, 集成了水文地质参数、地球物理方法和水化学特征的多维度评价体系被提出并且基于层次分析法的含水层分区评价模型也构建起来, 用遥感解译、地球物理测井和水文地质试验相结合的办法, 复杂地质条件下含水层的精确划分得以实现, 该研究成果在地下水水资源评价、工程建设里的降排水设计以及地下水污染防治方面有着重要的指导价值, 它为裂隙岩体地区的水资源可持续开发和管理提供了科学依据。

[关键词]裂隙水; 渗流特性; 含水层划分; 等效连续介质模型; 水文地质

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18440 中图分类号: TV52 文献标识码: A

Research on the Characteristics of Fissure Water Seepage and the Method of Dividing Aquifers

NIE Longlong

Environmental Geological Survey Institute of Hebei Coalfield Geological Bureau, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Based on comprehensive technical methods such as on-site hydrogeological investigation, in-situ drilling testing, and indoor rock sample experiments, this article systematically studies the seepage characteristics of fissure water and the method of dividing aquifers under complex geological conditions. Research has shown that the spatial characteristics, connectivity, and openness of fracture distribution play a key role in the seepage characteristics. Based on the equivalent continuous medium and discrete fracture network models, a quantitative characterization method for the permeability coefficient of fracture media has been established, and calculation formulas considering fracture density, openness, and direction have been proposed. As for the division of aquifers, a multidimensional evaluation system integrating hydrogeological parameters, geophysical methods, and hydrochemical characteristics has been proposed, and an aquifer zoning evaluation model based on the analytic hierarchy process has also been constructed. By combining remote sensing interpretation, geophysical logging, and hydrogeological experiments, the accurate division of aquifers under complex geological conditions has been achieved. This research achievement has important guiding value in the evaluation of groundwater resources, drainage design in engineering construction, and prevention and control of groundwater pollution, which provides a scientific basis for the sustainable development and management of water resources in fractured rock areas.

Keywords: crack water; seepage characteristics; aquifer division; equivalent continuous medium model; hydrogeology

引言

当今全球对水资源管理和环境保护这两个重要议题尤为关注, 在裂隙岩体广泛分布的地区更是如此, 因为地下水资源的开发利用在此处面临不少挑战。裂隙水作为地下水系统的重要构成部分, 其渗流特性的优劣直接影响着水资源评价以及工程设计是否具备科学性与可靠性, 而且近些年城市化进程不断加快且基础设施建设规模持续扩大, 使得人们对裂隙岩体地区地下水资源的需求大幅上升。统计显示, 近五年间全球约 30% 的大型水利工程都涉及到裂隙岩体地区的地下水相关问题, 并且由于裂隙介质具有空间上的异质性与复杂性, 传统的连续介质理论很难精准地描述其渗流行为, 进而致使含水层划分以及水资源评估存在很大的不确定性, 所以深入探究裂隙水的渗流规律并且给出科学的含水层划分办法成了水文地质领域的核

心任务当中的一个。

针对此问题借助现场水文地质调查钻孔试验与室内实验相互配合的方式, 全面剖析了各异质状况下裂隙水的渗流特质, 研究表明裂隙的空间分布特征, 连通性和开度是影响渗流特性的关键因素, 在此基础上依据等效连续介质模型以及离散裂隙网络模型构建了裂隙介质渗透系数的定量表征办法, 且给出了综合斟酌裂隙密度开度与方向的计算公式^[1]。这些研究成果对于揭示裂隙水渗流机制来讲给予了全新的理论支撑, 另外地下水资源管理的基础工作乃是含水层划分, 而其精确程度会直接对资源开发以及环境保护的效果产生影响, 为此构建了涵盖水文地质参数地球物理手段以及水化学特性的多维度评估体系, 并确立了以层次分析法为基础的含水层分区评估模型, 利用遥感解译地球物理测井以及水文地质试验相结合的技术手段,

达成了在复杂地质情形下对含水层的精准划分。这些研究不但为裂隙岩体区域的地下水资源评价给予了科学依据,还为工程建设里的降排水规划以及地下水污染防控奠定了技术根基,具备重大的实践意义与应用价值。

1 裂隙水渗流机理与特性

1.1 裂隙介质水力学特性

岩体裂隙是地下水流动的主要通道,对其水力学特性的分析直接影响到含水层的储水与导水能力,研究表明裂隙介质的渗透性不但受裂隙的空间分布特征影响,而且与其开度连通性和方向性紧密相连,在复杂的地质状况中,裂隙网络展现出极为明显的非均质性以及各向异性,致使传统的达西定律难以精准地描绘其流动行为。近年来经由现场钻孔试验与室内实验发现,裂隙开度的变动对于渗透系数的作用呈现指数关系,然而裂隙连通性却规定了水流路径的繁杂程度,以我国西南某典型喀斯特地区为例,尽管该区域裂隙密度相对较高,然而有效连通裂隙仅约占总裂隙数量的 30%,进而致使实际渗透性能远远低于理论预测值^[2]。此外水流方向受到裂隙方向性的显著控制作用,特别是在构造应力场作用下形成的定向裂隙带往往成为主要的导水通道,这些研究为理解裂隙介质的水力学特性提供了重要依据,也为后续建立定量表征方法奠定了基础。

裂隙介质的非均质性和各向异性不仅体现在渗透性上,还显著影响其水力传导能力的空间分布。在裂隙网络中,水流优先选择连通性好、开度大的裂隙通道,形成优势流路径,导致局部水力梯度与整体水力梯度存在显著差异。例如,在层状岩体中,平行层面的裂隙通常具有较高的渗透性,而垂直层面的裂隙则因连通性差而导水能力较弱,这种各向异性特征使得裂隙介质的水流运动呈现出明显的方向性。此外,裂隙介质的渗透性还具有空间长度尺度依赖性,随着研究空间长度尺度的增大,裂隙网络的连通性增强,渗透系数逐渐趋于稳定,但在小空间长度尺度下,局部裂隙的封闭或半封闭状态可能导致渗透系数的显著降低。因此,准确描述裂隙介质的水力学特性需要综合考虑裂隙的空间分布、开度、连通性以及方向性等多方面因素,并通过多空间长度尺度实验和数值模拟相结合的方法进行深入分析。

1.2 裂隙水流动规律分析

研究裂隙水流动规律是揭开地下水资源动态变化这一关键环节,把等效连续介质模型与离散裂隙网络模型相结合能更全方位地展现裂隙水流动机制,等效连续介质模型把裂隙岩体当作有均匀渗透性的连续介质在裂隙发育较均匀的地方适用,而离散裂隙网络模型可精准描绘单个裂隙的几何形状和水力特性在裂隙分布复杂时更适用。某矿区水文地质调查表明,开度超 0.5mm 的主干裂隙承担着超 70% 的地下水流量且微小裂隙主要是用来储存水的,另外裂隙之间的相互干扰不容小觑,尤其在高应力环境里,裂隙一闭合局部渗透系数就明显降低,就像华北某个深部

矿井,采动导致应力重新分布使得裂隙渗透系数下降幅度能达到 40% 以上。这些成果为优化地下水资源评价和工程降排水设计提供了科学依据^[3]。

1.3 尺度效应对裂隙水渗流的影响

尺度效应乃裂隙水渗流研究的核心要义之一,其根本在于不同空间尺度下裂隙构造特性与水力参数的变动规律,从微观尺度到宏观尺度裂隙网络的连通性与渗透性呈现出显著差别,在微观尺度之际单个裂隙的开度以及粗糙度径直左右着局部渗透系数,然而于宏观尺度之上裂隙网络的整体拓扑架构却变为主导要素。近年来基于多尺度模拟技术的研究表明,当观测尺度从米级扩展到千米级时裂隙介质的有效渗透系数,可能增加一个数量级以上,这一现象在我国西部某大型水利工程中得到了验证,该工程区裂隙岩体在千米级范围内逐渐趋于均质化,但在百米级范围内表现出较强的非均质性,因此在实际应用中需依据具体工程需求,选取适宜的尺度予以分析以保障结果的精准性,尺度效应的研究不但加深了对裂隙水渗流特性的认知,还为复杂地质状况下含水层的划分给予了理论支撑。

2 基于渗流特性的含水层划分方法

2.1 水文地质参数与划分指标体系

在裂隙水渗流特性的探究进程里,有关水文地质参数的择取以及划分指标体系的构建乃是达成含水层精准划分的基础,近些年来伴随地下水资源开发需求的逐步增长,以及工程建设规模的持续扩大,岩体裂隙水的相关研究已然逐步变为水文地质领域当中的热点内容,据统计全球约 40% 的地下水资源储存于裂隙岩体之中,然而其复杂的渗流特性给资源评价以及工程设计带来了严峻的挑战。在本研究中通过对现场水文地质展开调查,并且进行钻孔试验从而获取了包括渗透系数、裂隙密度、开度以及方向性等关键参数,这些参数能够直接反映出裂隙介质的渗流能力,与此同时将地球物理探测数据与水化学特征分析相结合,构建起一个涵盖多维度的含水层划分指标体系^[4]。此体系全面考量了裂隙的空间分布规律连通性,及其对于渗流场所产生的影响为后续模型的构建给予了科学的依据,研究表明在复杂地质条件下难以凭借单一参数全面呈现含水层特性,故而需整合多种方法予以综合评价。

具体而言,渗透系数作为衡量裂隙介质导水能力的重要指标,其准确测定依赖于现场抽水试验与室内渗透仪测试的有机结合,通过对比不同位置的渗透系数值,可初步识别含水层的优势导水通道。裂隙密度则通过钻孔岩芯编录与地质雷达扫描相结合的方式获取,该参数直接反映了裂隙发育的密集程度,为划分富水区与隔水层提供了基础数据。裂隙开度作为控制渗流速度的关键因素,其测量采用显微 CT 扫描与压水试验相结合的技术手段,既能获取裂隙面的微观形态特征,又能量化其有效过水断面面积。方向性参数则通过裂隙走向玫瑰图与倾向统计法进行分析,

结合区域构造应力场特征,可揭示裂隙系统的优势渗流方向。在构建指标体系过程中,特别引入了裂隙连通性指数,该指数通过三维网络模拟技术计算得出,能够定量表征裂隙网络中水流路径的连通程度,有效解决了传统方法难以评估裂隙系统整体导水性能的难题。同时,针对裂隙介质的非均质性,提出了变异系数与分形维数等辅助参数,从统计学与几何学角度刻画裂隙空间分布的复杂程度。这些参数的有机组合,形成了能够全面反映裂隙水渗流特性的多维度指标体系,为后续含水层分区模型的构建奠定了坚实基础。

2.2 多维度含水层识别技术

针对裂隙岩体含水层的复杂性,人们提出一种集遥感解译、地球物理测井和水文地质试验于一体的多维度识别技术,该技术能充分利用现代探测手段优势,有效克服传统方法在复杂地质条件下存在的局限,提高含水层识别精度。像遥感解译技术通过分析地表形态、植被覆盖等信息,可初步判定潜在裂隙发育区域,并且地球物理测井能进一步揭示地下裂隙的空间分布和导水性能,水文地质试验则用于验证裂隙网络的实际渗流能力。近些年国内外不少研究显示,多技术融合的方法使含水层划分精度大大提高,在某个典型的裂隙岩体地区采用这项技术后,含水层划分误差降低大概30%,给区域地下水资源管理提供了可靠的支撑^[5]。由于裂隙介质存在非均质性和各向异性,所以把层次分析法引进来当作评价工具,将定性和定量分析相结合,实现对含水层分区的系统化评估,这种方法不但适合裂隙岩体地区,还能推广到复杂地质环境,适用范围广且实用性强。

2.3 裂隙含水层分区模型构建

在上述研究成果的基础上构建起裂隙含水层分区模型,目的是给地下水资源评价和工程设计给予更细致的指引,该模型将裂隙介质作为等效连续介质与离散裂隙网络的组合,并采用数学公式对其渗透特性进行量化,在具体操作时先用现场试验数据算裂隙密度、开度和方向性这些关键参数再把这些参数代进改进后的达西定律公式里算出不同区域的渗透系数分布,之后依据层次分析法的权重分配结果把研究区里的含水层划分成不同区域,实验显示这个模型能精准地反映出裂隙含水层的空间异质性且在强非均质区域这点表现得特别明显。

某个实际工程应用了该模型后,降排水设计方案得到优化,使施工成本降低15%,并且地下水污染风险也大大降低,总的来说,该分区模型不仅为裂隙岩体地区水资源可持续开发提供了科学依据,更为地下水资源评价、工程建设降排水设计、地下水污染防治等多个领域的技术创新与实践应用开辟了新途径。

3 结论

复杂地质条件下水资源评价和管理要靠裂隙水渗流

特性与含水层划分方法研究来提供重要理论支撑与技术手段,通过现场水文地质调查、钻孔试验和室内实验后,明确裂隙分布的空间特征、连通性和开度是影响渗流特性的关键因素,依据等效连续介质模型和离散裂隙网络模型构建起定量表征裂隙介质渗透系数的办法且给出考虑裂隙密度、开度和方向的计算公式,该成果既提升对裂隙水渗流规律的认知又奠定地下水资源精确评估的基础。在岩体裂隙发育区域应用这些研究方法能大幅提高地下水模拟的精度和可靠性,另外把水文地质参数、地球物理方法和水化学特征集成到多维度评价体系,并加上遥感解译、地球物理测井和水文地质试验结果,就能在复杂地质条件下精确划分含水层,这种综合技术手段在实际工程里像矿山排水设计、隧道施工涌水预测还有城市地下空间开发等领域都有广泛应用且优势明显。

近些年来全球水资源压力不断加剧,使得裂隙岩体地区的地下水资源开发与保护成了热门研究领域,统计显示2018年到2023年期间全球大概30%的地下水资源开发都聚集在裂隙岩体分布区域,且超60%的项目存在渗流特性不明、含水层划分不准的问题,本研究提出的层次分析法分区评价模型给解决这些问题提供了科学依据,其用于实践不但提升了地下水资源评价的精确性,而且给工程建设里的降排水设计以及地下水污染防治给予了关键指引。就像某个大型水利工程采用这种方法成功优化了降排水方案,让施工周期缩短了15%,并且也降低了地下水污染的风险。该研究成果对推动裂隙岩体地区水资源的可持续开发与管理具有重要意义,更为相关行业的技术创新提供了新的思路。今后,需进一步融合大数据和人工智能技术,提高裂隙水渗流特性研究的智能化水平,从而更好地应对更复杂地质条件与更高标准的工程要求。

【参考文献】

- [1]陈海波,杨双锁,牛少卿.含水压倾斜裂隙砂岩力学与渗流特性研究[J].煤炭技术,2022(6):126-130.
 - [2]陆斌法,肖雨江.黑龙江省煤系裂隙含水层岩性划分研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2017(6):100-106.
 - [3]刘佳佳,杨明,张俊伟,等.受载含层理媒体裂隙演化与渗流特性模拟研究[J].中国安全科学学报,2017(10):103-108.
 - [4]连会青,夏向学,王世东,等.含水层微观孔隙分形特征与渗透性关联研究[J].工程勘察,2014(1):40-45.
 - [5]王维平,曲士松,叶新强,等.用于裂隙岩溶含水层回灌的屋面雨水径流水质特性研究[J].水利学报,2011(4):103-108.
- 作者简介: 聂龙龙 (1989.2—), 毕业院校: 河北地质大学, 所学专业: 地下水科学与工程, 当前就职单位: 河北省煤田地质局环境地质调查院, 职务: 无, 职称级别: 工程师。