

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.009

低渗岩体渗流与溶质迁移超重力试验及数值模拟研究进展

詹良通^{1,2}, 王浩^{1,2}, 胡英涛³, 徐文杰^{1,2}, 陈长杰⁴

(1. 浙江大学岩土工程研究所; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室;
3. 浙大城市学院工程学院; 4. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司)

摘要: 高放废物地质处置的长期安全性高度依赖于地质屏障对核素迁移的有效阻隔, 针对核素迁移过程的大时空尺度特征, 超重力试验与多尺度数值模拟已成为研究裂隙介质中长历时渗流与溶质迁移行为的重要手段。本文综述了裂隙岩体渗流与溶质迁移超重力试验技术、裂隙岩体超重力试验相似性及地质屏障长期安全性评价等方面的研究进展, 针对当前面临的微米级基质-裂隙一体化制备、复杂粗糙裂隙相似性理论以及热-水-力-化多场耦合等挑战, 未来应在微细裂隙-孔隙结构的一体化打印、天然粗糙裂隙结构的超重力试验相似性理论、多过程响应机制及万年历时全过程模拟等方向开展进一步研究。

关键词: 低渗岩体; 裂隙; 溶质迁移; 高放废物; 地质处置; 超重力试验; 数值模拟

Research progress on hypergravity experiments and numerical simulation of seepage and solute migration in low-permeability rock mass

Zhan Liangtong^{1,2}, Wang Hao^{1,2}, Hu Yingtao³, Xu Wenjie^{1,2}, Chen Changjie⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University;

2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University;

3. School of Engineering, Hangzhou City University;

4. Chengdu Engineering Corporation Limited, POWERCHINA)

Abstract: The long-term safety of geological disposal for high-level radioactive waste relies critically on the effective retardation of radionuclide migration by geological barriers. Given the characteristics of radionuclide migration processes at large spatiotemporal scales, hypergravity experiments and multi-scale numerical simulations have become essential tools for investigating long-term seepage and solute transport behaviors in fractured media. Research progress in hypergravity testing techniques for seepage and solute migration in fractured rock masses, similarity theories for hypergravity tests of fractured rock masses, and long-term safety evaluations of geological barriers was reviewed. To address current challenges such as the integrated preparation of micron-scale matrix and fracture systems, similarity theories for complex rough fractures, and coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical (THMC) processes, future research should focus on the integrated printing of micro-fracture and pore structures, similarity theories for natural rough fracture structures in hypergravity experiments, multi-process response mechanisms, and full-process simulations spanning ten-thousand-year timescales.

Key words: low-permeability rock mass; fracture; solute migration; high-level radioactive waste; geological disposal; hypergravity experiment; numerical simulation

在核能快速发展的背景下, 高放废物的安全处置已成为制约核能可持续发展的瓶颈问题。核反应堆运行及乏燃料后处理过程中所产生的高放废物, 含有多种放射性强、毒性高且半衰期长达数万年的核素, 若处置不当, 可能导致核素泄漏, 对生态系统安全与公众健康构成长期潜在威胁。如何实现高放废物的可控隔离和长期安全封存, 是全球核能技术面临的重大挑战。地质处置是国际广泛认可的目前唯一可靠的高放废物处置方式^[1], 其安全性依赖于多重屏障系统(工程屏障与天然屏障)的协同阻隔作用。其中, 地质屏障作为

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFA1612400); 中国电力建设股份有限公司科技项目(P52422); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(226-2024-00083)

作者简介: 詹良通(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn

通信作者: 徐文杰(1984—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: wenjiexu@zju.edu.cn

阻隔核素迁移的最后防线,其长期阻隔性能直接关系到处置库的服役寿命与环境安全^[2]。

然而,核素在深部地质环境中的迁移是一个涉及万年尺度、千米量级的复杂物理化学演化过程。常规的室内物理试验受限于时空尺度,难以在有限周期内观测到长历时的运移行为。为了有效评价地质屏障的长期阻隔性能,超重力试验作为一种重要的试验手段,能够在相对较短的时间内再现长历时、大空间尺度的渗流与溶质迁移过程。然而,受限于试验尺度、时间压缩比以及监测手段,超重力试验在揭示全尺度裂隙网络的复杂运移规律、量化多过程耦合效应等方面仍存在一定的局限性。通过将超重力试验与数值模拟方法结合,可以为超重力试验提供有效的验证与补充,提高研究的科学性和可靠性,从而为高放废物地质处置的安全性评估提供更加全面的理论支撑和技术参考。

本文综述了近年来在高放废物地质处置背景下,围绕低渗岩体中溶质迁移的超重力试验与数值协同方面的研究进展,重点介绍了超重力试验技术的原理、裂隙渗流与溶质迁移超重力试验技术、裂隙岩体超重力试验相似性与基于超重力试验的地质屏障长期安全性评价方法,分析了当前研究中面临的问题与挑战,并展望了未来研究方向,旨在为高放废物地质处置的安全性评估提供理论支撑和技术参考。

1 超重力试验技术与研究现状

1.1 超重力试验技术

超重力试验是一种利用离心加速度模拟超重力场的物理模型试验方法,通过缩尺与缩时效应,能够在实验室尺度上再现实际工程中长历时、大空间尺度的演化过程^[3]。超重力场通过离心机产生,将模型置于高速旋转离心机臂端的实验舱中,使模型承受远大于重力加速度的离心加速度,从而增大模型的体积力,补偿模型缩尺带来的自重应力损失。

相较于常重力条件下的物理模拟,超重力试验的核心优势体现在缩尺效应和缩时效应两个方面:①缩尺效应。在常重力场中,缩尺模型内部的应力低于原型,无法反映原型的应力水平。在超重力场中,若模型的缩尺比例为 $1/N$,对其施加 Ng 的离心加速度即可使模型的自重应力与原型一致,从而在缩尺模型上再现大尺度原型的应力场与水力场。②缩时效应。超重力场增大了不同相物质之间的相对驱动力,加快流体与溶质在模型中的迁移速度,从而在短时间内模拟原型中的长历时溶质或污染物迁移过程。

在低渗岩体(渗透率极低、裂隙发育且基质致密的岩石)中的渗流与核素迁移研究中,超重力试验因其在模型缩尺与加速核素迁移过程的独特优势,已成为评估高放废物地质处置库地质屏障长期安全性的重要手段。这一方法突破了常规试验在长历时数据获取方面的局限性,能够为高放废物处置库中核素迁移的长期演化行为提供试验数据支撑,进而为地质屏障安全性评估提供科学依据。

1.2 裂隙渗流与溶质迁移超重力研究现状

早期的超重力试验集中于孔隙介质中的渗流与溶质迁移过程研究。Arulanandan 等^[4]提出了用于评价污染物迁移过程相似性的 8 个无量纲数,并通过试验证明了污染物迁移超重力试验的可行性。Hensley 等^[5]开展了 NaCl 在粉土中长期迁移的超重力试验,在 100g 离心加速度下连续试验 27 h,模拟了填埋场中 31 a 的溶质迁移过程。张建红等^[6]利用土工离心机开展了轻质非水相液体在非饱和土体中迁移的研究,试验结果表明超重力试验可以有效模拟轻质非水相液体在非饱和土体中的迁移过程。詹良通等^[7]利用浙江大学 ZJU-400 超重力离心机成功模拟了氯离子在高岭土衬垫中长历时的击穿过程。Zhan 等^[8]开展了重金属铅离子在粉土-膨润土阻隔墙和黄土-粉土-膨润土阻隔墙中迁移过程的超重力试验,在 100g 离心加速度下连续试验 43.8 h,验证了黄土改性屏障服役 50 a 的长期阻隔性能。上述研究表明,超重力试验可用于模拟污染物在孔隙介质中的迁移过程,其超重力长历时迁移过程相似关系已基本明确。

然而,低渗岩体属于孔隙-裂隙介质,与孔隙介质具有明显区别,裂隙的不连续性、粗糙度和不规则空间分布显著影响渗流路径与溶质迁移行为^[9-12],导致孔隙介质中所确定的相似关系在低渗岩体中可能并不适用。过去的 30 年中,关于低渗岩体裂隙渗流与溶质迁移的超重力试验研究较少,裂隙渗流与溶质迁移的超重力效应不明确,其相似条件与相似性有待进一步探讨。在超重力试验中,通常使用与原型相同的流体,确保流体的物理性质(如密度、黏度、界面张力等)与原型一致,以避免引入更复杂的流体物理化学性质相似性问题。Culligan 等^[13]通过分析重质非水相液体在多孔介质中迁移的控制方程,提出了适用于离心机模拟的相似关系。之后,Levy 等^[14]基于该相似关系,采用人工合成的光滑壁面垂直毛细管模拟裂隙,利用土工离心

机模拟了重质非水相液体在裂隙中的迁移行为,试验结果表明,当离心机模型和原型中的惯性力可以忽略时,超重力试验与原型试验结果相似。在后续研究中,Levy 等^[15]进一步考虑了接触角随流速变化的影响,构建了新的理论模型,并通过量纲分析得到了相应的超重力相似关系。上述研究验证了超重力试验在裂隙介质中预测重质非水相液体迁移规律的可行性与有效性。

为进一步探索裂隙介质中的非饱和渗流行为,Jones 等^[16]利用离心机模拟了裂隙介质中的非饱和渗流过程,试验结果表明,超重力试验可以模拟不同流速下的非饱和裂隙渗流过程。Jones 等^[17]还开展了压水吕荣试验,使用光滑透明玻璃板模拟水平和倾斜裂隙,研究了裂隙非线性渗流特征,结果表明随着入流压力的增加,优势渗流路径的宽度也随之增加。此外,Gurumoorthy 等^[18]研究了非吸附性和吸附性离子在完整与裂隙花岗岩中的扩散行为,结果表明超重力试验能够显著缩短试验时间,得到的扩散系数与 1g 条件下的扩散系数吻合较好,表明利用超重力试验模拟污染物在完整和破碎岩体中的扩散行为是可行的。Nishimoto 等^[19-20]采用超重力试验评估了核废料地质处置库近场长期的热-水-力耦合过程行为,通过 67 d 的连续试验复现了相当于原型约 165 a 的地质演化过程。

超重力试验作为模拟核素在低渗岩体中迁移行为的重要物理手段,已经在孔隙介质和简单裂隙结构中得到了较为广泛的应用。然而,目前相关研究普遍采用理想光滑平行板裂隙模型,难以反映天然低渗岩体的裂隙-孔隙结构、粗糙度以及不规则空间分布等特征。因此,针对天然复杂裂隙的几何特征,亟须建立正确的超重力试验相似关系,并发展适用于超重力试验的模型构建与实现方法,以提升其在模拟地质屏障中核素迁移的适用性。

2 裂隙岩体溶质迁移超重力试验技术

在裂隙渗流与溶质迁移试验中,确保试验模型的精确性和可控性至关重要。裂隙岩体密封与水力边界控制技术、3D 打印模型制备技术及微米级裂隙开度控制技术为裂隙渗流与溶质迁移研究提供了更加精确和可控的试验平台。

2.1 裂隙岩体密封与水力边界控制技术

裂隙岩体渗流试验的精确性高度依赖于试验系统的密封性能与水力边界的可控性。面对多尺度的试验对象与复杂的深部赋存环境,现有的密封与控制技术已形成了覆盖宏观应力耦合、动态剪切、高温高压、微观流场控制及超重力场等极端环境的综合技术体系。

针对深部岩体高地应力与高渗透压的模拟难题,整体包裹式密封与结构化加载密封是两种主要途径。邬爱清等^[21]研制了裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统,系统采用外置式高压水密封舱与试样外封闭设计,将大尺寸裂隙岩体试样与加载装置整体置于密封舱内,模拟高水压与复杂应力环境;王颂等^[22]研制了面向储层特性和深埋环境的超低渗测试系统,有效解决了高地温条件下致密岩石超低渗透率的测定难题;Li 等^[23]设计了一种集成渗流夹具,通过在刚性加载板表面预制格栅状导流通道,能够在裂隙面上施加均匀的孔隙压力;王者超等^[24]利用东北大学研制的硬岩真三轴应力-渗流耦合装置,实现了储层砂岩渗透率的各向异性测定。

在常规水力压裂试验方面,张波等^[25]研制了便携式导水钢垫板装置,通过垫板中心的流体通道直接对试样内部施加高压水,实现了水压与围压的同步耦合加载;针对高温高压下的水力压裂试验,Zhang 等^[26]则开发了一种楔形铜制机械密封结构,利用金属的热膨胀与压缩变形特性,解决了传统聚合物密封圈在高温环境下易失效的问题。当试验涉及剪切位移时,要求密封系统具备动态适应能力。为此,许江等^[27]研发了剪切盒密封系统,能够在试样发生剪切变形和法向位移的过程中,始终保持稳定的流体压力,实现了剪切破坏全过程的密封。

随着研究深入至细观机理与超重力领域,对边界控制的精度提出了更高要求。为定量可视化裂隙中气水两相动态分布,Liao 等^[28]设计了基于半透明多孔玻璃基质的试验系统,实现了裂隙-基质界面处微小毛细管压差的精准控制与气液两相流分布的定量可视化。针对超重力条件下开展低渗岩体渗流与溶质迁移试验的需求,Xu 等^[29]研制了适用于超重力条件的密封与梯度水力边界控制装置,该装置能够在超重力环境下提供稳定可控的水力边界,为模拟复杂裂隙岩体内的渗流与溶质迁移行为提供试验保障。

2.2 低渗裂隙岩体模型制备技术

天然岩石因其非均质性、裂隙面粗糙以及空间分布不连续等特征,难以制备出裂隙形态及空间分布一致的岩石试样,这在很大程度上影响了试验的重复性和稳定性,不利于相关研究的开展^[30]。因此,如何高效制备内部结构一致、几何参数可控的裂隙岩体模型,是开展物理模型试验的关键^[31]。随着 3D 打印技术的发展,其在裂隙岩体制备中展现出巨大的应用潜力,具备批量化、参数化与可重复性等优势,使高效获取内部结构一致、几何参数可控的裂隙岩体模型成为可能。

近年来,3D 打印技术已广泛应用于裂隙岩体渗流与溶质迁移相关研究。例如:赵恺等^[32]利用 3D 打印技术制作了平行、T 形、斜交及正交等多种形式的裂隙插片,最小裂隙开度为 1.5 mm,研究了气体在不同裂隙结构中的渗透特性;Suzuki 等^[33]制作了包含随机分布圆盘裂隙的复杂裂隙网络模型,最小开度为 0.2 mm,并进行了示踪剂运移试验,试验结果与数值模拟结果一致,表明 3D 打印技术能够制作出符合要求的裂隙结构;崔激等^[34]构建了透明分形裂隙模型,分析了裂隙流量与压力水头、裂隙宽度和分形维数之间的关系;Li 等^[35]利用 3D 打印技术制作了最小开度为 0.3 mm 的粗糙裂隙网络模型,结合 CT 扫描获取了模型内部结构,研究了裂隙中的非线性流动,结果表明 3D 打印技术可以较好地再现单裂隙的几何形状,但在制备具有多个裂隙和交叉点的复杂模型时精度有所下降;黄娜等^[36]利用 3D 打印技术制作了三维粗糙裂隙网络模型试样,最小裂隙开度为 0.8 mm,研究了不同边界条件下的非线性流动特征。

尽管 3D 打印技术能够高效制备复杂裂隙网络模型,但目前成型精度尚难以实现微米级(<0.1 mm)开度裂隙模型的直接打印,限制了其在模拟极低渗透性岩体中的直接应用。为此,Xu 等^[29]建立了可变开度 3D 打印裂隙模型制备方法,模型由树脂材料(模拟岩石基质)、可溶支撑材料(生成裂隙空间)与可压缩橡胶材料(用于裂隙开度控制)构成,通过外部加载使可压缩橡胶材料挤压变形以控制开度,如图 1 所示。

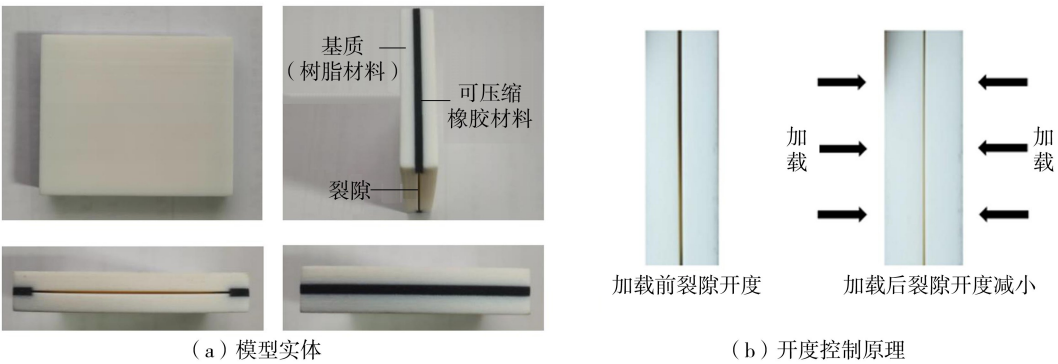


图 1 3D 打印可变开度单裂隙模型

Fig. 1 3D-printed variable aperture single fracture model

表 1 对不同人工裂隙制备方法进行了对比。机械切割法操作简单,但制备的裂隙形态较为单一;化学腐蚀法的裂隙制备过程缓慢,且难以控制裂隙形态;倒模法和巴西劈裂法虽然能够制造较为复杂的裂隙,但在裂隙形态的控制和精度方面仍存在局限。相比之下,可变开度 3D 打印裂隙模型制备方法能够精确控制复杂裂隙形态,并克服传统 3D 打印技术在微米级裂隙制备中的局限性。

表 1 人工裂隙制备方法对比

Table 1 Comparison of artificial fracture preparation methods

方法	主要裂隙类型	可重复性	成本	开度控制精度	模拟天然裂隙复杂性	说明
机械切割法	单一、规则、直线裂隙	高	低	低	低	裂隙面平滑,几何形态单一,无法模拟复杂网络
化学腐蚀法	随机溶蚀孔洞与微裂隙	低	高	不可控	适中	过程缓慢且随机,结果高度依赖于岩性和酸液
倒模法	依赖于母模的复杂裂隙	高	高	适中	高	母模制备困难,多次倒模易失真
巴西劈裂法	单一随机裂隙	低	低	适中	高	简单快捷,但裂隙形态、位置、开度均随机
3D 打印	任意复杂裂隙	高	适中	高	高	可精确控制复杂形态,开度一旦打印即固定
可变开度 3D 打印	开度动态可控的任意复杂裂隙	高	适中	非常高	高	可精确控制复杂形态,开度动态可控

密封与水力边界控制装置与可变开度 3D 打印裂隙模型的结合,能够实现模型边界条件与裂隙开度的精确调控。然而,当前 3D 打印所使用的打印材料与天然岩石在物理化学性质上存在本质差异,尽管已有部

分打印材料能够模拟岩石基质的孔隙结构及其渗透特性^[37],但其通常不适用于微米级开度裂隙的高精度打印,亟须开发适用于微米级裂隙开度的可打印类岩材料,推动裂隙-孔隙结构一体化制备 3D 打印技术的发展与应用。

3 裂隙岩体超重力试验相似性

裂隙渗流与溶质迁移行为受裂隙几何特征显著影响,如裂隙开度、粗糙度等。在溶质长历时迁移行为研究中,超重力试验通过增大驱动力,有效缩短试验周期,从而在短时间内模拟原型尺度的长历时演化过程。然而,如何保证模型与原型中渗流与溶质迁移的相似性,是超重力试验准确性的核心问题。因此,需要开展超重力条件下裂隙渗流与溶质迁移的相似性分析。

3.1 裂隙渗流超重力效应分析

结合裂隙岩体密封与梯度水力边界控制装置与可变开度 3D 打印裂隙模型,Hu 等^[38]开展了超重力条件下单裂隙与裂隙网络渗流试验,对比了常重力(1g)与超重力条件下的裂隙渗流试验结果,结果表明二者的流量与水力梯度关系均符合 Forchheimer 方程^[39],说明常重力与超重力的非达西渗流特性一致,超重力场不会影响裂隙渗流试验结果。

Hu 等^[38]进一步验证了裂隙开度与渗流速度的相似性,并提出了裂隙渗流超重力试验的相似性判别标准。裂隙渗流特性与其自身特征有关,其中裂隙开度决定了裂隙岩体的渗透特性,从而影响渗流速度的相似性,因此裂隙开度的相似性至关重要。在超重力试验中,考虑到裂隙开度为微观尺寸,模型裂隙开度采用与原型相同的尺寸制作裂隙模型。经过超重力渗流试验验证,裂隙渗流速度的相似性取决于其所处的流动状态,可用临界雷诺数(Re_{cr})进行划分:当 $Re \leq Re_{cr}$ 时,裂隙渗流处于达西流动区间,模型渗流速度为原型裂隙的 N 倍,验证了裂隙开度相似比为 1;当 $Re > Re_{cr}$ 时,裂隙渗流进入非达西流动区间,模型与原型裂隙渗流速度比值小于 N ,偏离线性相似关系。其主要原因是重力加速度较大时,流体流速较高,惯性力增大,导致裂隙渗流进入非达西流动区间,偏离了基于达西流动假设的理论模型。

通过结合甘肃北山预选区候选场址的水文地质条件^[40],计算得到在 500g 条件下的雷诺数远小于 1,表明在实际地质环境中,流动不会进入非达西流动区间,保证了超重力试验相似性理论的适用性。因此,该超重力试验方法可以有效用于地质屏障长期安全性的评估。

3.2 裂隙溶质迁移超重力效应分析

在裂隙超重力渗流过程相似性的基础上,Xu 等^[29]进一步开展了达西流动区间内裂隙岩体溶质迁移常重力与超重力对比试验,对比分析了常重力与超重力条件下的归一化出流浓度曲线,结果表明二者在出流浓度变化趋势上总体一致。表明超重力条件下 3D 打印裂隙模型中溶质迁移特性基本保持不变,超重力试验能够模拟裂隙岩体中的溶质迁移过程。

Xu 等^[29,38]的研究表明,通过正确设置裂隙几何参数与水力边界条件,超重力试验能够有效模拟裂隙渗流与溶质迁移过程,从而为地质屏障中核素长历时迁移过程提供试验依据。

尽管超重力试验为裂隙渗流与溶质迁移行为提供了重要的试验数据,但这些数据仅限于模型试验中的尺度和条件。为了更好地理解和外推实际地质环境中的渗流与迁移特性,结合数值模拟的参数反演方法显得尤为重要。通过将超重力试验与数值模拟相结合,能够反演出渗透系数、弥散系数等关键参数,这对于深入理解低渗岩体中的溶质迁移规律具有重要意义。

4 地质屏障长期安全性评估

通过 3D 打印裂隙模型与超重力试验平台,可以较好地揭示不同裂隙结构、流动状态和重力场条件下渗流与溶质迁移的相似性。然而,受限于试验尺度、时间压缩比以及监测手段,超重力试验在揭示全尺度裂隙网络的复杂运移规律、量化多过程耦合效应等方面仍存在局限性。通过结合数值模拟,能够拓展超重力试验的结论至更大的时空尺度。但数值模拟通常受到模型简化和参数假设的影响,在缺乏试验数据直接验证的情况下,往往存在一定的不确定性。为克服这些局限,超重力试验与数值模拟的结合成为解决这一问题的关键。超重力试验为数值模拟提供了长历时试验数据和物理验证,而数值模拟则在更大尺度上外推和补充试验结果,弥补试验中无法捕捉的复杂物理过程。同时,采用敏感性分析和参数优化等方法,可有效提高数值

模拟的精度,减少模拟与试验之间的差异,从而提供更加全面、可靠的结论。

4.1 地质屏障中核素长历时迁移模拟

在高放废物地质处置的安全性评估中,针对万年历时、千米尺度的时空演化难题,数值模拟已成为外推物理试验结论、评估地质屏障长期阻隔性能的关键手段。为在大时空尺度上进行高效评估,等效连续介质模型已被广泛采用。该模型基于升尺度理论,将复杂的裂隙-基质系统概化为具有等效水力学与反应参数的均匀介质。例如:Dai 等^[41]提出了一个用于量化裂隙岩体中吸附系数尺度依赖性的升尺度模拟框架,在此基础上,Jia 等^[42]进一步发展了一个集成响应面与蒙特卡罗模拟的不确定性量化框架,用于评估裂隙花岗岩中核素迁移的风险指标;凌辉等^[43]模拟了中国北山高放废物处置库关闭 1 000 a 后核素迁移情况,并分析了地质屏障的阻隔性能;段先哲等^[44]利用蒙特卡罗模拟方法,模拟了处置库关闭后的破损情景,并估算了 100 万 a 内的辐射水平。然而,这种基于连续介质和有效参数的模拟方法,其准确性高度依赖于升尺度过程的合理性与参数分布的可靠性,且该方法无法显式刻画由裂隙网络控制的几何拓扑结构,也难以捕捉裂隙岩体中普遍存在的优势通道流现象,在描述核素的迁移路径方面存在明显的局限性。

为了克服连续介质模型的局限,能够精确描述裂隙几何形态与连通性的离散裂隙网络模型在溶质迁移研究中得到了广泛应用。例如:Hyman 等^[45]利用 dfnWorks 软件,采用粒子追踪法模拟了瑞典 Forsmark 场地千米尺度花岗岩中的流动与溶质运移;Wei 等^[46]结合概率统计方法与离散裂隙网络模型对中国北山高放废物处置库的安全性进行了评估,并分析了具有污染可能的区域;毛亮等^[47]计算了放射性核素 Pu-240 在北山预选区中百万年时间尺度的迁移过程;Hu 等^[2]以中国北山地下实验室为研究对象,分别构建了考虑导水节理带与导水断裂带的百米尺度地质屏障与千米尺度地质屏障数值模型,模拟了核素在地质屏障中的长历时迁移过程。

4.2 基于超重力试验的地质屏障长期安全性评价方法

超重力技术通过离心力场加速地质演化过程,已被证实是模拟地质屏障长期性能的有效手段。例如:Nishimoto 等^[19-20]对核废料处置库近场环境开展了超重力试验,评估了原型地质处置库中约 165 a 的热-水-力耦合演化过程。为准确评价地质屏障的长期安全性能,Xu 等^[29]基于 OpenGeoSys 裂隙岩体溶质迁移数值模拟方法与超重力试验,提出了基于超重力试验的地质屏障长期安全性评价方法,有效解决了实验室小尺度观测数据向现场大尺度预测外推的难题,为处置库的安全性评价及场址适宜性选择提供了关键的理论支撑与技术指南。此外,超重力技术也被应用于二氧化碳地质封存的安全性评估研究中,如 Lopez-Saavedra 等^[48]构建了包含断层与盖层的复杂地质结构,在 50g 超重力条件下开展了米级尺度的二氧化碳地质封存模型试验,证实了超重力技术在揭示多相流长期演化机制及验证数值模拟可靠性方面的有效性。

5 研究展望

近年来,围绕低渗岩体渗流与溶质迁移超重力试验及数值模拟研究已取得阶段性进展,为深入理解地质屏障中核素迁移机制提供了重要支撑。然而,在地质屏障的长期安全性评估、构建可靠的预测模型等方面仍面临诸多挑战,未来亟须从以下几个方面进一步突破:

a. 裂隙岩体精细化制备技术。尽管 3D 打印技术已广泛应用于裂隙结构模型构建,但其在微米级裂隙开度控制与高精度可打印类岩材料等方面仍存在局限。一方面,目前模压成型精度尚不足以直接制备小于 0.1 mm 的微细裂隙,制约了其在模拟低渗岩体中的应用;另一方面,现有打印材料通常不适用于微米级开度裂隙的高精度打印,制约了基质-裂隙一体化迁移研究。未来需要在适用于微米级裂隙开度的可打印类岩材料开发、微米级裂隙开度控制技术方面进行持续研究,推进微细裂隙-孔隙结构的一体化打印技术发展,以制作更符合天然低渗岩体的物理模型。

b. 裂隙渗流与溶质迁移超重力试验相似性理论。当前裂隙渗流与溶质迁移超重力试验普遍采用理想光滑平行板裂隙模型,其在几何结构与流动特征上与天然粗糙裂隙存在显著差异,难以全面反映真实裂隙介质中渗流与溶质迁移行为。因此,亟须建立适用于天然粗糙裂隙结构的超重力试验相似性理论体系,并发展面向天然裂隙的超重力试验方法,以更好地模拟真实裂隙介质中的渗流和溶质迁移过程。

c. 多场耦合效应在超重力试验中的集成与应用。核废料处置过程受到热-水-力-化多场耦合效应的影响,而当前超重力试验中尚未充分考虑这些多场耦合的作用。在模拟低渗岩体的渗流与溶质迁移过程中,温

度、应力及水力场的相互作用会显著改变渗流特性并影响核素的迁移行为。未来应致力于开发具有温度和应力控制功能的超重力试验系统,以揭示热-水-力-化多场耦合在超重力试验中的综合效应。

d. 地质屏障万年历时核素迁移超重力试验。虽然超重力技术可有效压缩试验时间并模拟长历时迁移行为,但其在千米-万年尺度地质屏障核素迁移过程中的应用仍处于探索阶段,裂隙-基质溶质交换与壁面吸附等复杂过程在超重力场下的响应机制尚需深入研究。未来应聚焦于这些复杂过程在超重力场下的动态响应过程,结合超重力试验与数值模拟,逐步实现地质屏障中核素迁移的全过程模拟,为高放废物处置库的长期安全性评估提供科学依据。

参考文献:

[1] Wang Ju,Chen Liang,Su Rui,et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China:planning,site selection,site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2018,10(3):411-435.

[2] Hu Yingtao,Xu Wenjie,Zou Liangchao,et al. Evaluating the long-term barrier performance of fractured granite for nuclear waste disposal:impact of fast water-conducting path[J]. Engineering Geology,2024,337:107583.

[3] Chen Yunmin,Tang Yao,Ling Daosheng,et al. Hypergravity experiments on multiphase media evolution[J]. Science China Technological Sciences,2022,65(12):2791-2808.

[4] Arulanandan K,Thompson P Y,Kutter B L,et al. Centrifuge modeling of transport processes for pollutants in soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1988,114(2):185-205.

[5] Hensley P J,Schofield A N. Accelerated physical modelling of hazardous-waste transport[J]. Géotechnique,1991,41(3):447-466.

[6] 张建红,胡黎明. 重金属离子和 LNAPLs 在非饱和土中的运移规律研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):277-280. (Zhang Jianhong,Hu Liming. Migration behavior of heavy metal and LNAPLs in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(2):277-280. (in Chinese))

[7] 詹良通,曾兴,李育超,等. 高水头条件下氯离子击穿高岭土衬垫的离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报,2012,29(2):83-89. (Zhan Liangtong,Zeng Xing,Li Yuchao,et al. Centrifuge modeling for chloridion breaking through kaolin clay liner with high hydraulic head[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2012,29(2):83-89. (in Chinese))

[8] Zhan Liangtong, You Yuqing, Zhao Rui, et al. Centrifuge modelling of lead retardation in soil-bentonite cut-off walls[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2023,23(4):166-179.

[9] 鞠杨,张钦刚,杨永明,等. 岩体粗糙单裂隙流体渗流机制的实验研究[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(10):1144-1154. (Ju Yang,Zhang Qingang,Yang Yongming,et al. An experimental investigation on the mechanism of fluid flow through single rough fracture of rock[J]. Scientia Sinica:Technologica,2013,43(10):1144-1154. (in Chinese))

[10] Tzelepis V,Moutsopoulos N K,Papaspyros J N E,et al. Experimental investigation of flow behavior in smooth and rough artificial fractures[J]. Journal of Hydrology,2015,521:108-118.

[11] Zhang Haoming,Qian Jiazhong,Liu Yong,et al. Applicability of the time fractional derivative model on Fickian and non-Fickian transport in the single fracture;an experimental investigation[J]. Geofluids,2022,2022(1):4426630.

[12] 田峥颖,陈舟,马兴,等. 边界层对粗糙单裂隙溶质运移影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):106-113. (Tian Zhengying,Chen Zhou,Ma Xing,et al. Experimental study of the effect of boundary layer on the solute transport in a rough single fracture[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):106-113. (in Chinese))

[13] Culligan P J,Barry D A. Similitude requirements for modelling NAPL movement with a geotechnical centrifuge[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering,1998,131(3):180-186.

[14] Levy L C,Culligan P J,Germaine J T. Use of the geotechnical centrifuge as a tool to model dense nonaqueous phase liquid migration in fractures[J]. Water Resources Research,2002,38(8):1159.

[15] Levy L C,Culligan P J,Germaine J T. Modelling of DNAPL behavior in vertical fractures[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2003,3(1):1-18.

[16] Jones B R,Brouwers L B, Van Tonder W D,et al. Assessing geotechnical centrifuge modelling in addressing variably saturated flow in soil and fractured rock[J]. Environmental Science and Pollution Research,2017,24(15):13203-13223.

[17] Jones B R, Van Rooy J L,Dippenaar M A. Lugeon tests at partial saturation:experimental and empirical contributions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2019,52(2):351-372.

- [18] Gurumoorthy C, Singh D. Centrifuge modeling of diffusion through rock mass[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2005, 33(1): 44-50.
- [19] Nishimoto S, Sawada M, Okada T. New rapid evaluation for long-term behavior in deep geological repository by geotechnical centrifuge. Part 1: test of physical modeling in near field under isotropic stress-constraint conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 3323-3341.
- [20] Sawada M, Nishimoto S, Okada T. New rapid evaluation for long-term behavior in deep geological repository by geotechnical centrifuge. Part 2: numerical simulation of model tests in isothermal condition[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1): 159-169.
- [21] 邬爱清, 范雷, 钟作武, 等. 现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(11): 2161-2171. (Wu Aiqing, Fan Lei, Zhong Zuowu, et al. Development of an in situ hydro-mechanical coupling true triaxial test system for fractured rock mass and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(11): 2161-2171. (in Chinese))
- [22] 王颂, 张路青, 周剑, 等. 致密储层岩石超低渗测试系统研发与应用进展[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(4): 1186-1198. (Wang Song, Zhang Luqing, Zhou Jian, et al. Development and application progress of ultra-low permeability testing system for tight reservoir rocks[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(4): 1186-1198. (in Chinese))
- [23] Li Fudong, Elsworth D, Feng Xiating, et al. Revisiting the normal stiffness-permeability relations for shale fractures under true triaxial stress[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17(8): 5001-5017.
- [24] 王者超, 易云佳, 闵忠顺, 等. 真三向应力作用下深部储层砂岩渗透率各向异性实验研究[J]. *力学学报*, 2023, 55(7): 1493-1504. (Wang Zhechao, Yi Yunjia, Min Zhongshun, et al. Experimental study on permeability anisotropy of deep reservoir sandstone under true triaxial stress[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(7): 1493-1504. (in Chinese))
- [25] 张波, 李垚, 杨学英, 等. 一种用于水压致裂试验的水压供给装置研制及应用[J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 2022-2028. (Zhang Bo, Li Yao, Yang Xueying, et al. Design and application of a hydraulic pressure supply device for hydraulic fracturing experiments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 2022-2028. (in Chinese))
- [26] Zhang Hongwei, Chen Zhaoying, Zhou Chuanhong, et al. Mechanical sealing method for laboratory-scale hydraulic fracturing tests of granite rocks under high-temperature and high-pressure conditions[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(22): 10255.
- [27] 许江, 刘义鑫, 尹光志, 等. 煤岩剪切-渗流耦合试验装置研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 2987-2995. (Xu Jiang, Liu Yixin, Yin Guangzhi, et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2987-2995. (in Chinese))
- [28] Liao Zhen, Detwiler R L, Cookson E S, et al. Quantitative visualization of two-phase flow in a fractured porous medium[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(4): e2023WR035806.
- [29] Xu Wenjie, Hu Yingtao, Chen Yunmin, et al. Hyper-gravity experiment of solute transport in fractured rock and evaluation method for long-term barrier performance[J]. *Rock Mechanics Bulletin*, 2023, 2(3): 100042.
- [30] 江权, 宋磊博. 3D打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 23-37. (Jiang Quan, Song Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 23-37. (in Chinese))
- [31] 余宸, 田威, 王杰, 等. 砂型3D打印材料在岩体物理模型试验中的应用研究及展望[J]. *材料导报*, 2024, 38(12): 73-81. (Yu Chen, Tian Wei, Wang Jie, et al. Application research and prospect of sand-type 3D printing material in rock physical model test[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(12): 73-81. (in Chinese))
- [32] 赵恺, 王环玲, 徐卫亚, 等. 贯通充填裂隙类岩石渗流特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(6): 1130-1136. (Zhao Kai, Wang Huanling, Xu Weiya, et al. Experimental study on seepage characteristics of rock-like materials with consecutive and filling fractures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(6): 1130-1136. (in Chinese))
- [33] Suzuki A, Minto J M, Watanabe N, et al. Contributions of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models[J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 129(2): 485-500.
- [34] 崔澈, 邹旭, 李正, 等. 分形岩石裂隙中渗流扩散运动的试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3553-3562. (Cui Wei, Zou Xu, Li Zheng, et al. Experimental study on seepage diffusion movement in fractal rock fractures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3553-3562. (in Chinese))
- [35] Li Bo, Wang Jiafei, Liu Richeng, et al. Nonlinear fluid flow through three-dimensional rough fracture networks: insights from 3D-printing, CT-scanning, and high-resolution numerical simulations[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*,

2021,13(5):1020-1032.

[36] 黄娜,蒋宇静,程远方,等. 基于 3D 打印技术的复杂三维粗糙裂隙网络渗流特性试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2021,42(6):1659-1668. (Huang Na, Jiang Yujing, Cheng Yuanfang, et al. Experimental and numerical study of hydraulic properties of three-dimensional rough fracture networks based on 3D printing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(6):1659-1668. (in Chinese))

[37] 储昭飞,吴志军,刘泉声,等. 基于核磁共振技术的石膏粉末型 3D 打印试样水理特性及裂隙渗流特性初探[J]. 中国科学:技术科学, 2023,53(11):1871-1884. (Chu Zhaofei, Wu Zhijun, Liu Quansheng, et al. Preliminary investigation on the hydrophysical properties and fracture seepage characteristics of 3D-printed gypsum specimens based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Scientia Sinica Technologica, 2023,53(11):1871-1884. (in Chinese))

[38] Hu Yingtao, Xu Wenjie, Chen Yunmin, et al. Experimental study on the influence of hypergravity on the nonlinear flow behaviour in rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024,57(2):961-978.

[39] Zimmerman R W, Al-Yaarubi A H, Pain C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(3):384.

[40] 罗辉,陈伟明,周志超,等. 高放废物地质处置预选地段调查与适宜性研究[J]. 物探与化探, 2023,47(6):1479-1489. (Luo Hui, Chen Weiming, Zhou Zhichao, et al. Investigation and suitability study of pre-selected sites for geological disposal of high level radioactive waste[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023,47(6):1479-1489. (in Chinese))

[41] Dai Zhenxue, Wolfsberg A, Lu Zhiming, et al. Scale dependence of sorption coefficients for contaminant transport in saturated fractured rock[J]. Geophysical Research Letters, 2009,36(1):L01403.

[42] Jia Sida, Dai Zhenxue, Yang Zhijie, et al. Uncertainty quantification of radionuclide migration in fractured granite[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,366:132944.

[43] 凌辉,王驹,陈伟明. 高放废物地质处置算井子候选场址核素迁移模拟研究[J]. 铀矿地质, 2018,34(2):118-123. (Ling Hui, Wang Ju, Chen Weiming. Preliminary evaluation of radioactive effect of candidate sites in Suanjingzi sub-area for geological disposal of high-level radioactive waste[J]. Uranium Geology, 2018,34(2):118-123. (in Chinese))

[44] 段先哲,牛苏娟,王灿州,等. 高放废物地质处置的安全评价模拟研究:以甘肃北山为例[J]. 中国矿业, 2021,30(4):56-63. (Duan Xianzhe, Niu Sujuan, Wang Canzhou, et al. Safety evaluation study on the geological disposal of high-level radioactive waste; a case study of Beishan, Gansu province[J]. China Mining Magazine, 2021,30(4):56-63. (in Chinese))

[45] Hyman J D, Painter S L, Viswanathan H, et al. Influence of injection mode on transport properties in kilometer-scale three-dimensional discrete fracture networks[J]. Water Resources Research, 2015,51(9):7289-7308.

[46] Wei Yaqiang, Dong Yanhui, Yeh T C J, et al. Assessment of uncertainty in discrete fracture network modeling using probabilistic distribution method[J]. Water Science and Technology, 2017,76(10):2802-2815.

[47] 毛亮,李洪辉,王厉秦都,等. Pu-240 在高放废物地质处置库备选岩体离散裂隙网络中的迁移模拟[C]//《环境工程》2018 年全国学术年会论文集:中册. 北京:《环境工程》编委会, 2018:183-188.

[48] Lopez-Saavedra S, Bajestani M S, Pantov D, et al. Hypergravity experiments on meter-scale porous media flow for geological carbon sequestration[J]. Scientific Reports, 2025,15(1):45712.

(收稿日期:2025-07-29 编辑:熊水斌)