

深地质处置围岩多场耦合作用研究进展

李佳卉

同济大学土木工程学院 上海 200092

【摘要】：随着全球能源需求的不断增长，核电事业快速发展，高放废物的安全处置问题日益突出。深地质处置因具有较高的长期安全性，被普遍认为是高放废物处置的可行方案。花岗岩因其致密性好、孔隙率低和强度高特点，被视为理想的围岩介质。然而，在长期服役过程中，围岩将持续受到温度场、渗流场、应力场和化学场等多因素共同作用，表现出明显的多场耦合特征，且相关演化过程具有时间跨度长、空间尺度大的特点。因此，系统开展多场耦合作用下深地质处置围岩力学行为、核素迁移规律及其影响因素研究，对于保障处置库长期安全稳定运行具有重要意义。

【关键词】：深地质处置；多场耦合；花岗岩；力学行为

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.022

1 引言

在全球能源需求持续增长的背景下，核能因其高能量密度和低碳排放特征，成为应对能源危机的首选方案。但伴随核能利用而产生的高水平放射性废物，具有放射性强、衰变周期长和处置难度大的特点，其安全处置成为核能可持续发展的关键问题^[1]。目前，深地质处置被普遍认为是高放废物处置最可行的技术路线。我国高放废物地质处置总体上采用“废物体-处置容器-缓冲/回填材料-天然围岩”构成的多重屏障体系。其中，花岗岩围岩作为天然屏障的重要组成部分，承担着隔绝地下水、限制核素迁移和维持处置系统长期稳定的关键作用^[2]。

高放废物地质处置库服役时间长，近场围岩长期处于热-水-力-化多场共同作用环境中，其结构演化及工程性质变化直接关系处置系统的长期安全。因此，系统认识花岗岩围岩的多场响应规律具有重要意义。

2 深地质处置围岩的工程地质特征

我国高放废物地质处置预选区以甘肃北山花岗岩体为代表。已有研究表明，该区花岗岩整体上具有强度较高、孔隙率较低、结构相对致密等特征，具备作为天然屏障介质的基本条件。在长期构造活动、风化作用和地下水活动影响下，岩体内部往往发育不同尺度的裂隙，并伴随一定数量的裂隙填充物，形成“基质-裂隙-填充物”复合结构。

在深地质处置过程中，高放废物所含放射性同位素持续衰变并释放大量热量。在地下水化学环境复杂的条件下，天然屏障作为处置库阻隔核素迁移的最后一道防线，其内部裂隙可能成为放射性核素迁移的潜在通道。因此，围岩的力学性能及裂隙发育特征，是决定其能否有效发挥屏障作用、阻滞放射性核素进入生物圈的关键因素^[3]。

3 围岩近场环境作用研究进展

3.1 温度场

高放废物衰变热会显著改变处置库近场围岩温度场，并进一步影响围岩力学响应与处置系统稳定性。处置库温度场分析

多基于 Carslaw 和 Jaeger^[4]提出的无限大岩体点热源模型。Hökmark 等^[5]在此基础上建立了线热源及复合线热源解析模型，用于分析处置库长期温度演化。刘月妙等^[6]在研究北山预选区深部完整围岩物理力学性质及时温效应时发现，随着温度升高，围岩弹性模量呈现增大后减小的变化特征，裂纹损伤应力线性降低，而泊松比则线性增大。同时，温度升高会加快岩石稳态蠕变阶段的应变速率，并缩短其破坏时间；围压增大则会导致轴向蠕变变形增加，并延长岩石断裂破坏所需时间。刘东东和项彦勇^[7]进一步指出，处置容器间距和隧道间距对围岩及缓冲层峰值温度具有显著影响。总体来看，温度场演化不仅控制近场热环境，也直接关系到处置库工程间距设计。

3.2 渗流场

处置库建成并投入运行后，地下水持续入渗将在围岩中形成相应的渗流场。乏燃料在衰变过程中会不断释放放射性核素，当缓冲屏障性能衰减甚至失效时，核素可能由处置室逸出，并在地下水作用下沿围岩裂隙和孔隙向外迁移，最终对生物圈构成潜在风险。因此，准确揭示核素在围岩中的迁移规律，是高放废物地质处置库场址安全评价的重要基础。

由于核素在地质屏障中的迁移历时极长，单纯依赖室内试验和现场试验难以完整揭示其长期行为^[8]，因此数值模拟已成为研究核素迁移的重要手段。Yao 等^[9]基于离散裂隙网络渗流理论和粒子随机游走方法，探讨了不同水力梯度条件下对流和基质扩散对核素迁移的影响，指出在较低水力梯度下，基质扩散对核素的滞留作用更为显著。Jen 和 Tien^[10]通过数值模拟分析了胶体作用下 Pu、Np、U 和 Am 等核素的迁移规律，结果表明，核素释放速率与其饱和浓度和入口边界浓度之差呈正相关，而胶体的存在会降低核素在水中的浓度，并增加其释放通量。王青海等^[11]研究表明，在衰变和吸附阻滞共同作用下，Sr 在地下水中的影响范围相对有限。总体而言，核素迁移过程受裂隙结构、水动力条件及水文地球化学反应的共同控制。

3.3 应力场

应力场的演化通常受温度场、渗流场和化学场耦合作用的共同影响。以处置库近场围岩为例,长寿命放射性核素衰变所释放的热量会使围岩温度持续升高,并引起热膨胀。由于远场岩石介质受温度影响产生的体积变化相对较小,其对近场花岗岩介质的膨胀具有一定约束作用,从而诱发热应力。热应力的不断积累会促使岩体内既有裂纹扩展,甚至诱导新裂纹产生,进而造成内部结构损伤和强度劣化。若进一步考虑岩体损伤效应,温度变化还将导致围岩内热应力持续演化,对深地质处置库天然屏障结构的长期稳定性产生不利影响^[12]。

3.4 化学场

深地质处置库在长期服役过程中,始终处于地下水、水泥材料释放的碱性组分及潜在泄漏核素共同作用的复杂化学环境中,化学作用会持续改变围岩的矿物组成及力学性质。俞缙等^[13]通过单轴压缩试验和核磁共振技术,研究了不同酸性化学环境下砂岩的力学特性,结果表明,水化学环境会对砂岩力学性质产生不同程度的不利影响,且酸性越强,砂岩劣化越明显。韩铁林等^[14]的研究表明,在化学溶蚀作用下,砂岩破坏主要表现为颗粒剥落、片落和裂纹扩展,其中强酸环境下的损伤最为显著,强碱环境次之,中性环境下相对较弱。田霄等^[15]结合显微分析和XRD等测试手段,对北山花岗岩裂隙两侧岩石蚀变的矿物学和地球化学特征进行了分析,发现裂隙蚀变岩仅分布于少数裂隙两侧,且蚀变作用会导致围岩矿物组成和化学成分发生一定变化。总体来看,化学环境是影响围岩长期稳定性的重要因素。

4 围岩多场耦合作用研究进展

深地质处置库围岩在长期服役过程中受到温度场、渗流场、应力场和化学场的共同作用,其响应过程具有显著的多场耦合特征。围岩内部同时存在温度梯度、水力梯度和浓度梯度等多种传递过程,各物理场之间相互影响、相互制约,并非单一场效应的简单叠加。其中,开挖扰动会引起围岩应力重分布和变形,进而改变裂隙张开度与渗透性,形成水-力耦合效应;

处置库封闭后,高放废物持续释放衰变热,热传导不仅引起围岩温升和热应力发展,还会影响地下水流动及水-岩化学平衡,进一步诱发热-水-力-化学耦合过程^[16]。

数值模拟是研究围岩多场耦合行为的主要手段。现有方法大体可分为连续方法和离散方法两类:前者包括等效多孔介质、随机连续体和双连续体模型,后者主要包括离散裂隙网络、离散裂隙-基质模型及通道网络模型等。不同模型在裂隙表征精度和计算效率方面各有特点,需结合场址岩体结构特征合理选取。

已有研究表明,多场耦合分析能够较好揭示处置库近场环境的长期演化规律。赵艺伟等^[17]建立了处置库多场耦合数值模型,指出地质条件、屏障材料性质及运行参数对处置性能具有显著影响。侯会明等^[18]进一步构建了考虑开挖损伤的温度-渗流-应力耦合模型,认为围岩损伤效应对THM演化过程不可忽略。陈卫忠等^[19]基于现场加热试验模拟发现,热、水、力学参数的变化会显著影响围岩孔压、温度和有效应力分布。总体来看,多场耦合作用是控制处置库围岩长期稳定性的关键过程。

5 结论与展望

综上所述,花岗岩围岩作为高放废物深地质处置库天然屏障的重要组成部分,其长期稳定性受温度场、渗流场、应力场和化学场共同控制。现有研究表明,衰变热会引起围岩温度升高及热应力发展,地下水入渗和裂隙渗流控制着核素迁移通道,化学作用则可改变围岩矿物组成、裂隙结构及力学性质,各场之间相互耦合、相互反馈,共同决定处置库近场环境的长期演化特征。近年来,多场耦合试验与数值模拟研究不断推进,为认识围岩损伤演化、核素迁移规律及处置系统安全性提供了重要依据。但总体来看,裂隙岩体结构的非均质性、长期参数演化规律及水文地球化学过程与多场耦合机制仍有待进一步深化。今后应结合北山场址实际条件,加强试验观测、机理分析与多尺度数值模拟的协同研究,以提高对深地质处置围岩长期服役行为的认识,并为我国高放废物地质处置库的优化设计和安全评价提供更可靠的理论支撑。

参考文献:

- [1] 王驹.高放废物深地质处置:回顾与展望[J].铀矿地质,2009,25(2):71.
- [2] 王驹,苏锐,陈亮等.论我国高放废物地质处置地下实验室发展战略[J].中国核电,2018,11(01):109-115.
- [3] 郭永海,王驹.高放废物地质处置中的地质、水文地质、地球化学关键科学问题[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):3926-3931.
- [4] Carslaw H S,Jaeger J C.Conduction of heat in solids[M].Oxford:Clarendon Press,1959:353.
- [5] Hökmark H,Lönnqvist M,Kristensson O.Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel[R].Stockholm:Svensk Kärnbränslehantering AB,2009.
- [6] 刘月妙,王驹,谭国煊等.高放废物处置北山预选区深部完整岩石基本物理力学性能及时温效应[J].岩石力学与工程学报,2007(10):2034-2042.

- [7] 刘东东,项彦勇.高放射核废处置库温度场的分布线热源解析模型[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2816-2822.
- [8] 陈永贵,蔡叶青,叶为民等.处置库膨润土胶体吸附迁移性及核素共同迁移特性研究进展[J].岩土工程学报,2021,43(12):2149-2158.
- [9] Yao C,Jiang Q,Chen Y,et al.Numerical simulation of nuclide transport in complex fracture network[J].Disaster Advances, 2012,5(4):197-201.
- [10] Jen C P,Tien N C.Colloid facilitated effects on migration of radionuclides in fractured rock with a kinetic solubility limited dissolution model[J].Nuclear Science and Techniques,2010,21(6):339-346.
- [11] 王青海,李晓红,顾义磊等.铯在砂岩和花岗岩中的分配系数及吸附机制研究[J].矿物岩石,2004,(02):30-34.
- [12] 刘文岗,王驹,周宏伟等.高放废物处置库花岗岩热-力耦合模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2875-2883.
- [13] 俞缙,张欣,蔡燕燕等.水化学与冻融循环共同作用下砂岩细观损伤与力学性能劣化试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):455-464.
- [14] 韩铁林,师俊平,陈蕴生等.不同化学腐蚀下砂岩冻融力学特性劣化的试验研究[J].固体力学学报,2017,38(6):503-520.
- [15] 田霄,王驹,李亚伟等.北山花岗岩裂隙围岩蚀变矿物学及地球化学特征[J].世界核地质科学,2023,40(S1):497-503.
- [16] 罗嗣海,钱七虎,李金轩等.高放废物深地质处置中的多场耦合与核素迁移[J].岩土力学,2005,26(S1):264-270.
- [17] 赵艺伟,吴志军,王旭等.高放废物深地质处置库屏障系统的多场耦合数值分析[J].中南大学学报(自然科学版), 2021,52(8):2557-2571.
- [18] 侯会明,胡大伟,周辉等.考虑开挖损伤的高放废物地质处置库温度-渗流-应力耦合数值模拟方法[J].岩土力学, 2020,41(3):1056-1064,1094.
- [19] 陈卫忠,马永尚,于洪丹等.泥岩核废料处置库温度-渗流-应力耦合参数敏感性分析[J].岩土力学,2018,39(2):407-416.