

深层地质处置场的岩土工程特性与环境影响评估

余海波 王琛 张馨

江苏省地质局第一地质大队, 中国·江苏 南京 210041

摘要: 论文针对深层地质处置场处理高放射性废物的安全问题, 详细分析了处置场的岩土工程特性, 包括围岩的力学性能、热物理特性和水文地质条件。通过对环境影响的全面评估, 探讨了处置场对地质环境、生态系统和人类健康的潜在影响, 并提出了相应的评估方法与技术。研究结果表明, 合理设计和管理深层地质处置场对于确保放射性废物长期安全隔离至关重要。

关键词: 深层地质处置; 高放射性废物; 岩土工程特性; 环境影响评估

Geotechnical Engineering Characteristics and Environmental Impact Assessment of Deep Geological Disposal Sites

Haibo Yu Shen Wang Xin Zhang

The First Geological Brigade of Jiangsu Provincial Geological Bureau, Nanjing, Jiangsu, 240041, China

Abstract: This paper focuses on the safety issues of treating high-level radioactive waste in deep geological disposal sites, and analyzes in detail the geotechnical engineering characteristics of the disposal site, including the mechanical properties, thermophysical properties, and hydrogeological conditions of the surrounding rock. Through a comprehensive assessment of environmental impact, the potential impacts of disposal sites on geological environment, ecosystems, and human health were explored, and corresponding assessment methods and techniques were proposed. The research results indicate that the rational design and management of deep geological disposal sites are crucial for ensuring the long-term safe isolation of radioactive waste.

Keywords: deep geological disposal; high level radioactive waste; geotechnical engineering characteristics; environmental impact assessment

0 前言

深层地质处置是一种将高放射性废物安全隔离于地下 500~1000m 深处的处置方法, 这一深度足以确保废物与地表及地下水资源之间建立有效的隔离层。这种方法因其能够实现长期隔离废物与人类生存环境, 而被国际原子能机构 (IAEA) 和众多国家视为处理高放射性废物的最安全、最可行的手段^[1]。据统计, 全球已有多个国家开展了深层地质处置的研究和实施工作, 如芬兰的奥尔基洛托处置库、瑞典的福什马克处置库等。高放射性废物主要包括乏燃料和长寿命放射性废物, 它们含有高浓度的放射性同位素, 如钚-90 和碘-129 等, 其放射性衰变热可高达数十千瓦/立方米^[2]。这些废物的半衰期长, 可达数万年至数十万年不等, 因此必须采取特殊措施以确保其长期安全。

1 岩土工程特性

1.1 围岩力学性能

围岩的力学性能对于处置库的稳定性至关重要^[3]。以下是几种常见围岩类型的力学性能的深入分析:

花岗岩: 作为一种硬质岩石, 花岗岩以其高抗压强度和良好的耐磨性而著称。它的微裂隙发育程度较低, 这使得其在处置库建设中能够提供必要的结构支持。花岗岩的强度和稳定性使其成为处置库围岩的理想选择。

粘土岩: 粘土岩的层状结构赋予了它较高的抗压强度, 但其抗拉强度相对较低。粘土岩的塑性较好, 能够在一定程度上适应处置库周围应力场的变化, 减少岩石破裂的风险。

凝灰岩: 凝灰岩是由火山灰堆积形成的岩石, 其孔隙率较高, 可能会影响其力学性能。凝灰岩的力学性质可能因沉积环境和后期的成岩作用而有所不同, 因此在选择处置库位置时需进行详细的地质调查。

岩盐: 岩盐具有良好的塑性和蠕变性, 能够在长时间荷载下保持稳定。岩盐的溶解性是其关注点, 因为溶解可能导致处置库围岩的稳定性下降。

围岩的力学性能不仅取决于岩石类型, 还受到许多其他因素的影响, 如岩石的结构、裂隙发育程度、水文地质条件以及地应力状态^[4]。因此, 在处置库设计过程中, 必须进行全面的地质勘察和力学测试, 以确保围岩能够满足长期稳定性的要求。表 1 展示了这些岩石类型的力学性能。

表 1 岩石类型的力学性能

岩石类型	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
花岗岩	100~300	5~10	30~60	0.2~0.3
粘土岩	30~100	1~5	5~20	0.2~0.4
凝灰岩	30~150	2~10	10~30	0.2~0.4
岩盐	20~50	1~3	5~5	0.3~0.4

1.2 热物理特性

热物理特性是评价围岩在处置库运行过程中热行为的关键参数。以下是花岗岩和岩盐热物理特性的深入分析：

花岗岩：花岗岩具有较高的热导率，这有助于处置库散热。然而，其热膨胀系数也相对较高，这意味着在温度变化时可能会产生较大的热应力。因此，在设计处置库时，需要考虑热应力对围岩稳定性的影响。

岩盐：岩盐的热导率相对较高，这有利于热量的传递和分布。但其蠕变特性可能导致在长期热荷载作用下围岩的变形。此外，岩盐的热膨胀系数较大，可能会在处置库内部产生额外的应力。

热物理特性的评价需要综合考虑处置库的热源特性、围岩的热传导机制以及热应力对围岩长期稳定性的影响。通过热 - 力耦合分析，可以预测处置库在运行期间的热行为，为处置库的设计提供科学依据^[5]。图 1 展示了热导率的折线图。

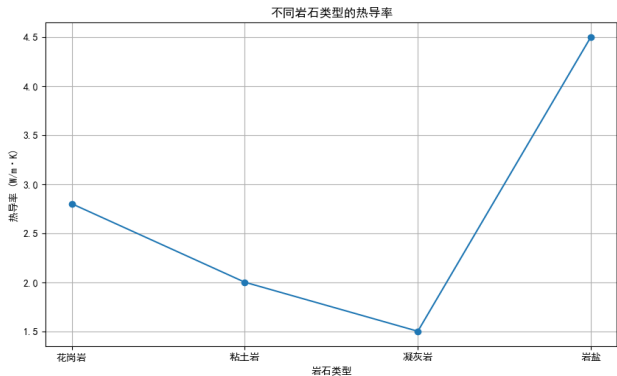


图 1 热导率

1.3 水文地质条件

水文地质条件在深层地质处置场的研究和设计中扮演着至关重要的角色，尤其是在评估放射性核素迁移方面。以下是水文地质条件的深入分析：

渗透性：低渗透性围岩的渗透性对处置库的安全性至关重要。渗透性不仅影响地下水的流动，还影响放射性核素在岩土介质中的迁移。例如，花岗岩和粘土岩的低渗透性有助于减缓核素的迁移速度，从而提供更长的隔离时间。表 2 是不同岩石类型的渗透系数范围。

表 2 渗透系数范围

岩石类型	渗透系数 (m/s)
花岗岩	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁸
粘土岩	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰
凝灰岩	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁸
岩盐	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁷

地下水流动速度：在深层地质处置场，地下水流动速度通常较低，这有助于减少核素迁移的风险。然而，即使是低流速的地下水，也可能在长时间尺度上导致核素的长距离迁移。图 2 展示了地下水流动速度与核素迁移距离的关系。

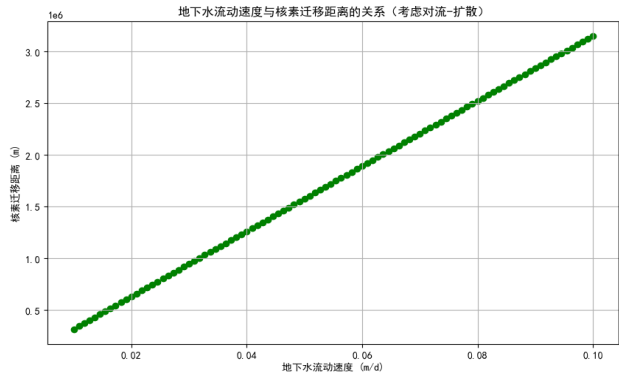


图 2 地下水流动速度与核素迁移距离的关系

2 环境影响评估

2.1 地质环境影响

深层地质处置场的建设和运行可能引起地质环境的变化，这些变化可能包括地应力的重分布、地震活动的增加以及围岩的变形和破裂。

①地应力重分布：处置库的建设会导致周围地应力的重新分配，这可能会影响到围岩的稳定性。根据国际原子能机构（IAEA）的指导，地应力的重分布可以通过地下应力测量和数值模拟来评估。例如，瑞典的 Forsmark 处置库项目中，地应力测量显示最大水平应力约为 10MPa，垂直应力约为 15MPa。

②地震活动：处置库的运行可能会通过注入流体或热效应引发微震活动。根据美国核管理委员会（NRC）的数据，深层地质处置场周围的地震活动通常较小，震级通常不超过 3 级。通过地震监测网络，如地震仪阵列，可以监测处置库周边的地震活动。

2.2 生态系统影响

深层地质处置场的建设和运行对地表生态系统的影响可能包括以下几个方面：

①土方工程：施工过程中的土方工程可能会破坏地表植被，改变地形和土壤结构。根据环境影响评估报告，土方工程可能会暂时影响约 1%~5% 的项目周边土地面积。

②地下水抽排：地下水抽排可能会影响地表水资源和生态系统。例如，根据芬兰的 Olkiluoto 处置库项目，地下水抽排导致地表水体水位下降约 0.5~1.0m，影响了周边湿地生态系统。

③生物多样性：施工和运营活动可能会对当地物种的栖息地造成干扰，影响生物多样性。生态研究表明，施工期间可能会减少 10%~20% 的物种多样性，但随着时间的推移和生态恢复措施的实施，这些影响可以逐渐减轻。

2.3 人类健康影响

放射性废物泄漏对人类健康的影响是环境影响评估中的关键部分。

①辐射剂量：根据辐射防护原则，公众的年辐射剂量限值为 1mSv。通过环境辐射监测，可以评估处置库对周围居民的辐射影响。例如，法国的 Andra 处置库项目模拟显示，即使在最不利的情况下，周围居民的辐射剂量也不会超过 0.1mSv/年。②应急响应：为了应对潜在的泄漏事件，需要建立应急响应计划。这些计划应包括泄漏检测、警报系统、疏散路线和医疗支持。例如，美国的 WIPP 项目制定了详细的应急响应计划，能够在泄漏事件发生后的几个小时内启动应急措施。

3 评估方法与技术

为了全面评估深层地质处置场的环境影响，需要采用多种评估方法和技术。以下是对每个方法的技术扩展和深入探讨。

3.1 数值模拟

数值模拟是通过数学模型来模拟处置库及其周围地质环境的物理过程。以下是几个关键的数值模拟技术：

①热—水—力耦合模型：这种模型通常基于耦合的偏微分方程，描述了温度、流体流动和应力场之间的相互作用。以下是一个简化的耦合方程组：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (k \nabla T) + Q &= \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ \nabla \cdot (k \nabla h) + Q_f &= \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ \nabla \cdot \sigma + \rho g &= 0\end{aligned}$$

其中， k 是热导率， T 是温度， Q 是单位体积的热源项， ρ 是密度， c 是比热容， κ 是渗透系数， h 是水头， Q_f 是单位体积的流体源项， ϕ 是孔隙水压力， σ 是应力张量， g 是重力加速度。

②离散元方法（DEM）：用于模拟岩体的断裂和破碎过程。DEM 基于牛顿第二定律和接触力学原理，通过求解每个颗粒的动力学方程来模拟颗粒系统的行为。

③有限差分法（FDM）、有限单元法（FEM）和边界元法（BEM）：这些是求解上述耦合方程的常用数值方法。FEM 特别适用于处理复杂的几何形状和边界条件。

3.2 现场监测

现场监测技术的深入探讨如下：

①地震监测：使用地震仪记录微震活动，通过震源机制分析确定地震的成因。地震监测数据可以用来校正数值模型，并评估处置库周围的稳定性。

$$M_L = \log_{10}(A) - \log_{10}(A_0) + 1.76 \log_{10}(R) + 3.0$$

其中， M_L 是地震的里氏震级， A 是地面运动的幅度， A_0 是参考幅度， R 是震中距离。

②地下水监测：通过安装监测井和使用感应器来测量地下水位、水质和流量。监测数据可以用来评估核素迁移的风险。

③放射性核素监测：使用高分辨率伽马射线光谱仪等设备监测地下水中的放射性核素浓度。

3.3 风险评估

风险评估的深入探讨涉及以下方面：

①定量分析：使用概率论和统计学方法来量化风险。例如，可以通过以下公式计算风险：

$$R = P \times C$$

其中， R 风险， P 是事件发生的概率， C 是事件发生时的后果。

②概率评估：使用蒙特卡洛模拟等方法来评估不确定性的影响。以下是一个简单的蒙特卡洛模拟步骤：A. 确定输入参数的概率分布。B. 从每个分布中随机抽取样本。C. 运行模型并记录输出。D. 重复步骤 2 和 3 多次以构建输出的概率分布。

③风险管理策略：基于风险评估的结果，制定减轻、接受、转移或避免风险的策略。例如，建立应急预案、设计冗余系统和进行保险。

4 结语

深层地质处置场的安全性和环境影响评估对高放射性废物的长期隔离至关重要。通过综合运用数值模拟、现场监测和风险评估等技术，能够全面评估处置库的环境影响，并为制定科学的处置策略提供依据。数值模拟已实现对地质环境的热—水—力耦合过程的预测，未来研究需进一步精细化模型，考虑地质不确定性和人为因素。现场监测技术为模型校正提供实测数据，未来应探索更高效的监测和数据分析方法，如机器学习。风险评估是核心环节，未来研究应跨学科合作，发展综合评估框架，并考虑气候变化和人类活动影响。

参考文献：

- [1] 戴巍.特殊地质条件下岩土工程勘察与地基施工处理技术研究[J].价值工程,2023,42(10):72-74.
- [2] 韩二师,李奉翠,梁磊,等.地质参数对中深层地热井长期取热特性影响分析[J].太阳能学报,2022,43(2):62-68.
- [3] 马鑫卓.数字化勘察技术在城市地下岩土工程中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2023(11):90-92.
- [4] 高小荣,李红岩,任小庆,等.岩土分层对中深层U型对接井换热性能的影响[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):703-712.
- [5] 郭长宝,闫怡秋,张永双,等.青藏高原大型深层蠕滑型滑坡变形机制研究进展与展望[J].地球科学,2022,47(10):3677-3700.