

# 甘肃北山旧井地段高放废物处置库深度初步探讨

赵宏刚<sup>1</sup>, 王 驹<sup>1</sup>, 杨春和<sup>2</sup>, 陈伟明<sup>1</sup>, 苏 锐<sup>1</sup>

(1. 核工业北京地质研究院 北京 100029; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 在对高放废物地下深地质处置库深度确定基本要求的概述基础上, 结合甘肃北山旧井地段的地质特征、水文地质特征、岩石力学特征、地应力场特征等方面的情况, 分析初始地应力场和二次开挖地应力, 对开挖稳定性和发生岩爆的可能性进行计算和预测。研究表明, 研究区岩体较完整, 深度大于 400 m 时地下水补给匮乏且为还原环境, 岩石单轴抗压强度较高, 总体质量较好; 深度小于 700 m 地应力为一般应力场, 二次开挖稳定性分析和岩爆分析结果表明在此范围内岩爆发生的可能性不大, 依据处置库深度确定的基本要求, 初步认为旧井地段处置库的设计深度和地下工程布局应在 400~700 m 范围内进行。

**关键词:** 工程地质; 高放废物; 处置库深度; 初步探讨

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3966 - 08

## PRELIMINARY DISCUSSION ON DEPTH FOR HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY IN JIUJING BLOCK, BEISHAN AREA, GANSU PROVINCE

ZHAO Honggang<sup>1</sup>, WANG Ju<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>2</sup>, CHEN Weiming<sup>1</sup>, SU Rui<sup>1</sup>

(1. *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*; 2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

**Abstract:** It is very important to confirm the depth and area for high-level radioactive waste(HLW) repository, especially in the HLW concept model and engineering design. The general requirements for determining the depth of the HLW disposal repository are discussed. The geological characteristic, hydrogeological characteristic, rock mechanics characteristic and geostresses characteristic are analyzed in Jiujing block, Beishan area, Gansu Province. Simultaneously, the initial geostresses and the geostresses after excavation are analyzed, and the probability of tunnel stability and rockburst are also calculated and predicted. The conclusion shows that the rock mass is intact; the underground water is short of supply and has a reduce environment 400 m below ground surface; the rock has a high uniaxial strength and the rock mass has good quality. The geostress is a general geostress field range from zero to 700 m below ground surface; and the tunnel stability and rockburst analysis display that the rockburst can not happen in the area from 400 m to 700 m below ground surface. According to the general requirements for the depth of repository, the designed depth of HLW disposal repository should be located in 400 - 700 m below ground surface.

**Key words:** engineering geology; high-level radioactive waste(HLW); depth of repository; preliminary discussion

**收稿日期:** 2007 - 03 - 07; **修回日期:** 2007 - 05 - 23

**基金项目:** 国防科工委“核设施退役和三废治理”项目

**作者简介:** 赵宏刚(1972 -), 男, 1996年毕业于西安地质学院采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事高放废物地质处置方面的研究工作。E-mail: hgz72@sohu.com

## 1 引言

高放废物深地质处置是一项十分复杂的科学和工程技术, 地下深地质处置库的设计过程是一个从概念设计、可行性研究、初步设计到施工设计、循序渐进、不断完善并与其他研究工作交叉并进、互相促进的迭代过程。开展地下实验室和处置库的概念设计研究工作, 可以形成一个统一的处置库系统概念, 基础的试验研究工作应围绕满足和实现处置库系统功能来展开<sup>[1, 2]</sup>。处置库的概念设计阶段, 应依据预将处置废物的总量, 初步确定处置库容量, 依据场址评价结果, 初步确定处置库可能建造的深度, 提出地下实验室和处置库概念设计的初步设想, 进一步细化初步设想方案, 并根据其他领域的研究成果, 完善概念设计。

目前, 瑞典和芬兰的处置库深度确定在 400~500 m 的花岗岩饱和带范围内, 美国的处置库深度处在地下 300 m 凝灰岩的非饱和带中, 且国际社会普遍认为处置库的建造深度一般应选为 300~1 000 m。我国处置库预选区的研究工作始于 1985 年, 1989~1998 年, 选址工作主要集中在北山预选区, 具体研究了北山及其邻区的地壳稳定性、构造格架、地震地质特征、水文地质和工程地质条件等, 还运用地球物理测量方法、遥感地质方法和计算机数值模拟技术研究了该区的地壳稳定性。然而我国的处置库建造在何种深度以及处置库的概念模型如何, 到现在为止, 此领域尚属空白。因此, 本文依据我国高放废物处置北山预选区的研究情况, 结合国内和国际高放废物处置库研究的现状, 就我国高放废物地下深地质处置库的建造深度范围开展了一些初步性的探讨工作。

## 2 处置库深度确定的基本要求

地下深处置库深度的确定是在场址特性评价的基础上进行的, 处置库的最小深度应能保证, 人类活动(诸如爆破、土石方工程)及地表自然作用(如侵蚀、冰川作用)对处置系统的性能不致产生难以接受的影响。需要考虑的其他方面问题是地下水流的减少、温度和岩石应力的增加以及地下水水质随深度和时间的变化。当然, 具体场地的地质特性极大程度地影响着深度的选择。许多国家已经提出以 300~1 000 m 作为高放废物处置库的深度范围。

综合美国、瑞典、芬兰、法国和英国等国家高放废物处置库的研究成果, 在处置库概念设计阶段, 确定处置库可能的深度和范围、处置区域及其他硬岩设施部分必须考虑如下几个方面:

- (1) 处置库范围内没有可利用的矿产资源;
- (2) 将被处置的废物总量;
- (3) 处置主岩的岩石热特性;
- (4) 处置主岩的水文地质特征;
- (5) 处置主岩的岩石力学特性及地应力(原位应力);
- (6) 处置库地下水的成分;
- (7) 存在非常有利的条件适合建造地下和地面设施, 并具有相当高的安全稳定性;
- (8) 可以获得灵活的地下和地面设施;
- (9) 地面环境条件及规划;
- (10) 建造经济合理, 且技术可行。

证实处置库的深度和范围以及其他的硬岩设施, 应在同一岩体中, 对不同深度的岩体范围进行对比, 以便确定处置区域及其他硬岩设施潜在的位置。对假定的硬岩设施区域(处置和中心区域等)应当进行详细的描述<sup>[3~5]</sup>。

## 3 旧井地段高放废物处置库深度的初步探讨

甘肃北山地区地处人烟稀少的戈壁地带, 区内矿产资源匮乏, 从自然地理环境特征、社会经济环境特征以及地质环境特征来说这对建设高放废物地质处置库是非常有利的<sup>[6]</sup>。依据处置库深度和范围确定的基本要求, 在不考虑经济合理性的前提下, 本区处置库深度确定的主要因素为水文地质特征和处置主岩石体力学特征及地下硐室开挖稳定性等方面。

### 3.1 旧井地段深部水文地质特征

#### 3.1.1 深部地下水动力环境特征

地下水对核素的载体作用首先取决于地下水的动力环境, 水动力环境因素主要包括地下水的埋藏条件、流场的分布及动态变化、地下水流速及方向的空间展布, 而这些因素又直接受控于含水介质自身的特征及外部的环境条件。BS01 和 BS02 孔揭露岩体深分别达 700, 500 m。各种试验和测试数据为深部地下水环境评价提供了依据。

抽水试验涌水量及单位涌水量的测试结果表明, 深度增大, 涌水量及单位涌水量明显减小, 按

单位长度出水段计算，2个钻孔抽水试验表现出相似的情况，且涌水量及单位涌水量量级都相当小，最小为 0.216 m<sup>3</sup>/d，说明深部地质环境地下水补给匮乏，含水性微弱；岩石和钻孔试验结果表明，岩石的渗透性极其微弱，BS01 孔压水和抽水试验结果表明，对于裂隙发育段而言，渗透系数值为 1.5×10<sup>-3</sup>~6.9×10<sup>-4</sup> m/d，这种数量级的渗透系数表明岩石的渗透性极其微弱，几乎相当于完整岩石的水力学性质，说明岩芯所显示的节理和裂隙，在地下处于闭合状态；对于完整岩石段，渗透系数为 1.6×10<sup>-6</sup>~2.3×10<sup>-5</sup> m/d，这种数量级的渗透系数对完整岩石也是极小的。这些都说明深部岩石的节理和裂隙发育程度很低，且地下水的流速非常小。

3.1.2 深部地下水化学环境特征

核素在迁移过程中，与地下水、岩石间将不断发生物理、化学作用，一般来说能够起到影响核素迁移速率的作用。化学反应类型以及对核素迁移的影响程度，取决于地下水的化学性质。因此，深部地下水化学环境评价是处置库选址的水文地质工作的一个重要方面。

根据钻孔水质测井、抽水过程中水化学系列样品测试结果表明：本区深部地下水的化学特征是偏碱性和处于还原状态的咸水，水化学类型为 Cl<sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型；水的氧化还原电位 E<sub>h</sub> ≤ 0，岩芯观测也可以发现黄铁矿的存在，这些都说明深部地下水处于还原环境；地下水 TDS(矿化度)普遍较高(TDS > 3.5 g/L)，水的 TDS 值越高，则饱和指数越大，越不利于核废物溶解；深部地下水当 TDS > 3.0 g/L 时，无论对矿物还是对核废物，其溶解能力都应该是较低的，这些特点无疑对高放废物处置是有利的。

综上所述，本区深部地下水动力环境具有典型的弱含水、低渗透和低流速特征；深部地下水化学环境具有还原性、低溶解性和强吸附性特性，这些特性使放射性核素处于迁移的低价态，对阻滞核素的迁移是非常有利的，同时这种还原性环境减缓了

工程屏障的破坏速度，对延长工程屏障的寿命是非常有利的。这些特性构成了本区深部地下水环境的主体，对高放废物深地质处置都是非常有利的<sup>[7]</sup>。

3.2 旧井地段岩体力学特征

3.2.1 岩体力学性质

旧井地段岩体主要岩性为花岗闪长岩和英云闪长岩，对获得的样品进行了岩石力学特性试验，包括单轴压缩变形、抗剪切强度、抗拉强度、三轴压缩强度及变形等试验。岩石的单、三轴压缩试验在 MTS815.03 型电液伺服试验机上完成，岩石的单轴抗拉及抗剪切强度试验在 60 t 材料试验机上完成，试验结果表明，本区岩体强度较高，为坚硬岩石(见图 1、表 1)<sup>[8]</sup>。

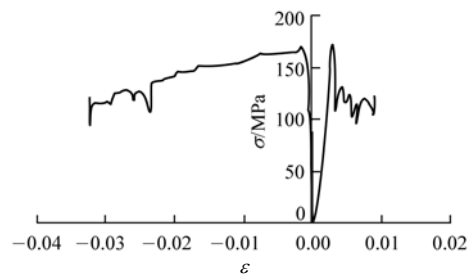


图 1 岩石单轴压缩变形试验应力 - 应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves under uniaxial compression

3.2.2 岩体质量评价

通过对甘肃北山旧井地段地表基岩露头的裂隙测量，并对 BS01, BS02 和 BS03 孔岩芯裂隙的测量和特征参数分析，运用岩体质量评价方法 Q 系统，结合 BP 神经网络理论对钻孔周围岩体质量进行评价，结果表明，甘肃北山 BS03 孔岩芯 RQD 最小为 64.8，最大为 100，平均值为 83.9。在 BS03 孔 500 m 深度范围内，前 300 m 的深度钻孔周围岩体达到好的级别，总体上达到了很好的级别；后 200 m 深度钻孔周围岩体进行评价后发现，岩体质量达到了较好的级别，部分达到了极好的级别，岩体质量总体上是很好的<sup>[9]</sup>。

表 1 岩石力学性质

Table 1 Mechanical properties of rock masses

序号	岩石名称	取样位置	取样深度 /m	抗压强度 /MPa	变形模量 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	抗剪切强度 /MPa	三轴抗剪强度	
										c/MPa	φ/(°)
1	中细粒英云闪长岩	BS01	343~389	168.0	44 233	62 633	0.28			30.4	45.8
2	似斑状花岗闪长岩	BS01	400~500	141.1	44 000	60 950	0.27	6.19	20.6	54.9	47.7
4	似斑状花岗闪长岩	BS01	635~680	136.4	36 467	53 967	0.27	7.33	15.7	33.1	53.2
5	英云闪长岩	BS01	680~690	112.4	40 767	57 300	0.22	6.54	12.9	29.4	56.2
6	英云闪长岩	BS02	65~113	157.4	54 433	63 247	0.27	8.71	18.2	49.9	48.7

从岩体力学性质和岩体质量评价结果来看, 本区岩石单轴饱和抗压强度较大, 岩体质量总体上达到很好的级别, 其对地下工程的设计、建造以及稳定性评价是非常有利的。

### 3.3 地下硐室开挖稳定性分析

正确地掌握和了解地质环境对井巷工程力学行为的作用和影响, 是合理进行井巷工程设计的前提和基础。井巷工程的地质环境从理论意义上来说是指初始地应力场、渗流场和温度场, 但从实际角度上来说主要是初始地应力场。

围岩的初始地应力状态与施工引起的附加应力状态是不同的, 它对巷道开挖后围岩的应力分布、变形和破坏有着极其重要的影响, 可以说不了解围岩的初始地应力状态, 就无法对巷道开挖后一系列力学过程和现象给出正确的评价。围岩的初始地应力由重力应力场和构造应力场构成<sup>[10, 11]</sup>。

#### 3.3.1 初始地应力场的评价

井巷设计中对初始地应力场的评价及其对结构设计的影响问题, 是一个现实而不可回避的问题。为了解该问题, 目前采用的方法是用“围岩强度比”这个概念来评价的。

围岩强度比  $G_n$  定义为围岩抗压强度  $R_c$  与围岩内部的最大地应力值  $\sigma_{max}$  的比值, 即

$$G_n = R_c / \sigma_{max} \quad (1)$$

在井巷工程施工中, 常将围岩强度比作为判断围岩稳定性的重要指标, 并将其作为是否产生高地应力的判定标准, 有的还作为围岩分级的重要指标。

初始地应力场属于一般地应力场还是高地应力场, 可以用围岩的强度比加以初步判定。围岩的强度比与围岩开挖后的破坏现象有关, 特别是与岩爆及大变形有关。前者是在坚硬完整的围岩中可能发生的现象, 后者是在软弱或土质地层中可能发生的现象。

岩石单轴饱和抗压强度  $R_c$  与定性划分岩石坚硬程度的对应关系和高初始应力地区岩体在开挖过程中出现的主要现象见表 2, 3<sup>[12~14]</sup>。

表 2  $R_c$  值与定性划分的岩石坚硬程度对应关系  
Table 2 Relationship between  $R_c$  and stiffness of rocks

坚硬程度	$R_c$ /MPa
坚硬岩	>60
较坚硬岩	60~30
较软岩	30~15
软岩	15~5
极软岩	<5

表 3 高初始应力区岩体开挖过程中出现的主要现象  
Table 3 Phenomena of high initial stress during excavation

应力状况	主要现象	$G_n$
极高应力	(1) 硬质岩: 开挖过程中时有岩爆发生, 有岩块弹出, 洞壁岩体发生剥离, 新生裂缝多, 成洞性差; 基坑有剥离现象, 成形性差。 (2) 软质岩: 岩芯常有饼化现象, 开挖过程中洞壁岩体有剥离, 位移极为显著, 甚至发生大位移, 持续时间长, 不易成洞; 基坑发生显著隆起或剥离, 不易成形	<4
高应力	(1) 硬质岩: 开挖过程中可能发生岩爆洞壁岩体有剥离和掉块现象, 新生裂缝较多, 成洞性差; 基坑时有剥离现象, 成形性一般尚好。 (2) 软质岩: 岩芯常有饼化现象, 开挖过程中洞壁岩体位移显著, 持续时间长, 成洞性差; 基坑有隆起现象, 成形性较差	4~7

#### 3.3.2 旧井地段地应力分析

从旧井地段 3 个钻孔地应力测试结果来看, 大体上各应力值都是随深度的增加而呈增加趋势, 同时地应力值也受岩体结构特性的影响, 在不同深度出现了不同程度的波折, 但这都不足以影响总体增加的趋势, 这些现象都与实际情况十分吻合。主应力的赋存规律表现为  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 。总体而言, 最大水平主应力大于垂向应力, 但侧压力系数为 0.71~3.00, 平均值为 1.57, 主应力的方向为 NE 向, 表明在本区水平构造运动起主要控制作用。但对其所处的应力大环境而言, 即考虑到我国西北地区为高应力值区、构造活动较为强烈这一构造背景, 旧井地段及其测区附近的地应力值可以认为相对较低的<sup>[15]</sup>。

在初始地应力测量结果分析的基础上, 对深度为 400 m 以下地应力进行了回归分析<sup>[16, 17]</sup>, 通过对两者围岩强度比计算分析(见表 4, 5)可知, 深度  $D < 700$  m 时, 属一般地应力场;  $700 \text{ m} < D < 1200$  m 时, 围岩强度比大于 4, 属高应力场;  $D > 1200$  m 时, 围岩强度比小于 4, 属极高应力场。

#### 3.3.3 巷道开挖后二次应力状态

巷道开挖后将引起一定范围内的应力重新分布和局部地壳残余应力的释放; 在重新分布的应力作用下一定范围内的围岩产生位移, 形成松弛, 与此同时也会使围岩的物理力学性质恶化; 在这种条件下巷道围岩将在薄弱处产生局部破坏, 在局部破坏基础上造成整个巷道的崩塌。在井巷工程中发生的一切力学现象, 如应力重新分布、断面收敛、巷道失稳等, 都是一个连续、统一的力学过程产物, 始终与时间、施工技术息息相关。

表4 BS01孔地应力测量数据表  
Table 4 Measuring data of geostress of borehole BS01

序号	测量深度/m	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小水平主应力 $\sigma_h$ /MPa	垂直应力 $\sigma_v$ /MPa	$G_n$	$\sigma_H/\sigma_v$	最大主应力方向
1	161.5	7.72	4.56	4.36	17.67	1.77	
2	166.5	7.11	4.12	4.49	19.18	1.58	N25°E
3	250.5	8.18	5.06	6.76	16.67	1.21	
4	252.4	7.71	4.71	6.81	17.69	1.13	N30°E
5	332.4	8.99	6.10	8.97	15.17	1.00	
6	339.0	6.51	4.72	9.15	20.95	0.71	N38°E
7	413.3	12.56	8.37	11.15	10.86	1.13	N45°E

表5 巷道开挖后硐室表面最大切向应力数据表  
Table 5 Maximum tangential stress of tunnel after excavation

深度/m	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小水平主应力 $\sigma_h$ /MPa	垂直应力 $\sigma_v$ /MPa	$\sigma_H/\sigma_v$	$G_n$	切向应力 $\sigma_\theta$ /MPa
400	11.24	7.55	10.8	1.04	12.63	22.89
500	13.08	9.06	13.5	0.97	10.10	27.41
600	14.92	10.57	16.2	0.92	8.42	33.70
700	16.76	12.08	18.9	0.88	7.22	39.88
800	18.60	13.59	21.6	0.86	6.31	46.22
900	20.44	15.10	24.3	0.84	5.61	52.49
1 000	22.28	16.61	27.0	0.83	5.05	58.59
1 100	24.12	18.12	29.7	0.81	4.59	65.04
1 200	25.96	19.63	32.4	0.80	4.21	71.28
1 300	27.80	21.14	35.1	0.79	3.89	77.57
1 400	29.64	22.65	37.8	0.78	3.61	83.92
1 500	31.48	24.16	40.5	0.78	3.37	89.91

为了能够定性地说明问题的实质，假定：

- (1) 围岩为均质、各向同性的连续介质；
- (2) 巷道的形状为圆形；
- (3) 巷道位于一定的深度，可简化为无限体中的孔洞问题。

巷道开挖后周围岩体中的应力、位移，视围岩强度(单轴抗压强度)可分为两种情况：一种是开挖后的围岩仍处于弹性状态，此时巷道围岩除产生(由于爆破造成的)稍许松弛外，一般是稳定的；另一种是开挖后的应力状态超过围岩单轴抗压强度，此时巷道围岩的一部分处于塑性甚至松弛状态，巷道围岩将产生塑性滑移、松弛或破坏。

为计算方便，设侧压力系数 $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ ，其中 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 分别为最大水平主应力和垂直应力(见图 2)，在围岩中开挖半径为 $a$ 的圆形巷道后，其二次应力状态可近似表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_y}{2} [(1-\alpha^2)(1+\lambda) + (1-4\alpha^2+3\alpha^4)(1-\lambda)\cos(2\theta)] \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_y}{2} [(1+\alpha^2)(1+\lambda) - (1+3\alpha^4)(1-\lambda)\cos(2\theta)] \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_y}{2} (1-\lambda)(1+2\alpha^2-3\alpha^4)\sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

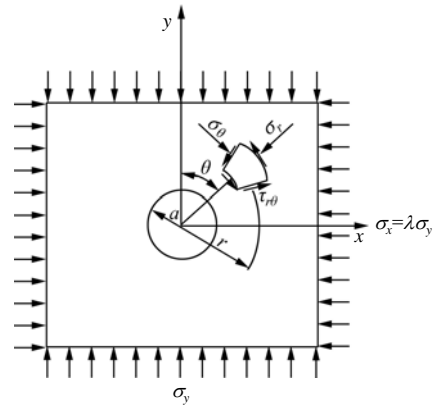


图2 开挖后巷道周边力学模式图

Fig.2 Schematic figure of stress after tunnel excavation

式中： $\sigma_r$ 为径向应力， $\tau_{r\theta}$ 为剪应力， $\theta$ 为极径与垂直轴的夹角， $\alpha = a/r$ (当 $r = a$ 时，表示在巷道的周边上)。

首先研究巷道周边( $r = a$ ，即 $\alpha = 1$ )的应力状态。当 $r = a$ 时，式(2)变为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= \sigma_y \{ [1 - 2\cos(2\theta)] + \lambda [1 + 2\cos(2\theta)] \} \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)表明, 沿巷道周边只存在切向应力  $\sigma_\theta$ , 径向应力  $\sigma_r$  和剪应力  $\tau_{r\theta}$  变为 0, 这说明巷道的开挖使巷道周边的围岩从二向(或三向)应力状态变成单向(或二向)应力状态, 沿巷道周边的应力值及其分布主要取决于  $\lambda$  值。

通过对旧井地段开挖后二次应力状态(见表 5)的分析可以看出, 当深度为 400~700 m 时, 最大水平主应力为 11.24~16.76 MPa, 最小水平主应力为 7.55~12.08 MPa, 垂直应力为 10.08~18.9 MPa, 侧压力系数为 0.88~1.04, 围岩强度比为 7.22~12.63, 横截面最大切向应力为 22.89~39.88 MPa; 当深度为 700~1 500 m 时, 最大水平主应力在 16.76~31.48 MPa, 最小水平主应力为 12.08~24.16 MPa, 垂直应力为 18.9~40.5 MPa, 侧压力系数为 0.78~0.88, 围岩强度比为 3.37~7.22, 横截面最大切向应力为 39.88~89.91 MPa。2 个深度段所具有的共同特点是侧压力系数变化不大, 且均为 1/3~3, 此时巷道周边都为压应力, 且巷道的成形性较好。然而当深度大于 700 m 时, 围岩强度比小于 7, 且横截面最大切向应力大于 39.88 MPa, 导致巷道开挖后可能发生岩爆。

通过对围岩应力向深处变化规律的研究发现, 巷道开挖后的二次应力分布范围是很有限的, 大致为(5~7)a,  $\lambda$  值越大, 范围越大。在此范围之外围岩仍处于初始应力状态, 这说明巷道的开挖对围岩的影响(扰动)是很有限的。

### 3.3.4 旧井地段处置库巷道开挖稳定性分析

#### (1) 巷道轴线布置

选择巷道轴线方向主要受整个工程布置情况及地质条件决定, 但地应力的方向对其他有重要影响。理论研究和工程实践结果证明, 地下工程尤其是地下洞室的长轴方位应当与最大水平主应力方向一致, 这样整个工程的稳定程度是最高的。瑞典和芬兰处置库中的处置巷道方位也是按这一原则来进行的, 加拿大的 URL 地下实验室的试验和巷道发生变形破坏情况也证明了这一点, 我国的许多金属矿地下工程实践也证明了其正确性。根据地应力测量结果(见表 4)来看, 旧井地段巷道的轴线应与最大主应力方向一致, 或者与最大水平主应力方向成小角度夹角, 即巷道轴线方向应近可能选择 NEE 向。

#### (2) 巷道开挖塑性大变形预测分析

为了对 400 m 以下地下巷道的稳定性进行定性分析, 对地应力数据进行相关分析, 研究结果表明, 最大和最小水平地应力的相关性是比较好的, 相关

方程为

$$\sigma_H = 3.876 + 0.018 \ 4D \text{ (MPa)} \quad (R = 0.901) \quad (4)$$

$$\sigma_h = 1.511 + 0.015 \ 1D \text{ (MPa)} \quad (R = 0.942) \quad (5)$$

通过相关方程计算, 地下 700 m 深处最大水平主应力为 16.76 MPa, 最小水平主应力为 12.08 MPa, 垂直应力为 18.9 MPa, 侧压力系数为 0.88, 巷道周边最大环向压应力为 39.88 MPa(见表 5)。

工程实践表明, 侧压力系数越小, 巷道的稳定性越高, 本区 400~700 m 深度范围内,  $1/3 < \lambda < 3$ , 说明巷道周边均受压应力作用, 地应力场为一般应力场; 700 m 深度处, 最大横截面压应力为 39.88 MPa, 其值均远小于岩石的单轴抗压强度。这些都说明深度小于 700 m 时, 巷道不会发生塑性破坏, 即使发生破坏也只是局部的岩石片落, 不会发生巷道的整体稳定性破坏。

#### (3) 巷道开挖岩暴预测分析

岩爆一般是坚硬岩石在高应力状态下应力突然释放所发生的脆性破裂现象, 基于地应力评估或预测岩爆是可能的。目前, 有关岩爆的研究方法主要有强度理论、刚度理论、能量理论、失稳理论以及目前主要采用的《工程岩体分级标准》(GB50218 - 94)进行定性分析。根据该地区地应力实测资料和岩石室内力学试验获得的力学参数, 分析最不利工况(见表 6), 运用上述岩爆判别方法对该区域岩体进行岩爆分析<sup>[18, 19]</sup>, 并以地下 700 m 深度为例进行分析。

表 6 地下洞室轴线方向的应力参数

Table 6 Stress parameters of the tunnel along axial direction

岩石类别	最大应力埋深 /m	岩石单轴抗压强度 $R_c$ /MPa	轴向应力 $\sigma_1$ /MPa	横截面最大切向应力 $\sigma_\theta$ /MPa	垂直应力 $\sigma_v$ /MPa	横截面最大初始应力 $\sigma_{max}$ /MPa
北山花岗岩	700	143.06	12.08	40.07	18.9	16.76

本次岩爆分析从地应力角度着手, 采用强度理论中普遍应用的工程岩体分级标准判别法、Russenes 判别法、Turchaninov 判别法、Hoek 判别法等进行定性或定量的综合评价<sup>[20~22]</sup>。

#### ① 工程岩体分级标准判别法

《工程岩体分级标准》(GB50218 - 94)相对完整地考虑了地应力因素对地下洞室的成洞性影响, 并评价了地下洞室开挖过程中出现的主要现象。

该地区  $R_c = 143.06 \text{ MPa}$  大于  $60.00 \text{ MPa}$ , 属坚硬岩。  $R_c / \sigma_{max} = 7.59 > 7.00$ 。故根据此法判断无岩爆发生。

② Russenes 岩爆判别法

Russenes 岩爆判别法, 是根据洞室的最大切向应力  $\sigma_\theta$  与岩石点荷载强度  $I_s$  的关系, 建立岩爆烈度关系图。把  $I_s$  换算成  $R_c$ (室内试验直接测得  $R_c = 141.7$  MPa), 并根据岩爆烈度关系图判别是否有岩爆发生。其判别关系如下: 当  $\sigma_\theta / R_c < 0.20$  时, 无岩爆发生; 当  $0.20 \leq \sigma_\theta / R_c < 0.30$  时, 有弱岩爆发生; 当  $0.30 \leq \sigma_\theta / R_c < 0.55$  时, 有中岩爆发生; 当  $\sigma_\theta / R_c \geq 0.55$  时, 有强岩爆发生。

③ Turchaninov 岩爆判别法

Turchaninov 岩爆判别法, 是根据科拉岛希宾地块的矿井建设经验, 提出岩爆活动性由  $\sigma_\theta$  和  $\sigma_1$  之和与  $R_c$  之比值确定: 当  $(\sigma_\theta + \sigma_1) / R_c \leq 0.3$  时, 无岩爆发生; 当  $0.3 < (\sigma_\theta + \sigma_1) / R_c \leq 0.5$  时, 有岩爆发生可能; 当  $0.5 < (\sigma_\theta + \sigma_1) / R_c \leq 0.8$  时, 一定发生岩爆; 当  $(\sigma_\theta + \sigma_1) / R_c > 0.8$  时, 有严重岩爆发生。

④ Hoek 岩爆判别法

Hoek 等总结了南非采矿巷道围岩破坏的观测结果, 提出了对岩爆分级的判别式:  $\sigma_\theta / R_c = 0.34$  时, 有少量片帮发生; 当  $\sigma_\theta / R_c = 0.42$  时, 有严重片帮发生; 当  $\sigma_\theta / R_c = 0.56$  时, 有严重型支护; 当  $\sigma_\theta / R_c = 0.70$  时, 有严重岩爆发生。

根据分析可以得知: 该地区在硐室开挖过程中最不利工况下, 运用工程岩体分级标准判别法和 Hoek 岩爆判别法无岩爆发生; 但运用 Russenes 岩爆判别法和 Turchaninov 岩爆判别法时有可能发生弱岩爆(见表 7)。

表 7 岩爆分析结果

Table 7 Analytical results of the rockburst

判别方法	指标取值范围	判别结果
工程岩体分级标准	$R_c / \sigma_{\max} = 7.59 > 7.00$	无岩爆
Russenes 岩爆	$0.20 < \sigma_\theta / R_c = 0.28 < 0.30$	有弱岩爆
Turchaninov 岩爆	$0.30 < (\sigma_\theta + \sigma_1) / R_c = 0.37 \leq 0.50$	有岩爆可能
Hoek 岩爆	$\sigma_\theta / R_c = 0.28 < 0.34$	无岩爆

3.4 处置库深度范围探讨

处置库深度范围的确定应充分考虑到预选场址的自然环境、地质环境、预将处置的废物总量和技术经济条件等基本要求。本文在只考虑前两者的条件下, 对处置库的深度范围进行了初步探讨, 认为研究区岩体较完整, 深度大于 400 m 时, 地下水补给匮乏且为还原环境, 岩石的单轴抗压强度较高, 岩体总体质量较好; 深度小于 700 m 时, 地应力为

一般应力场, 二次开挖稳定性分析和岩爆分析认为在此范围内岩爆发生的可能性不大, 初步认为旧井地段处置库的设计深度和地下工程布局应在 400~700 m 内进行。但处置库具体应设计到何种深度, 还应综合考虑自然环境、地质条件、岩体质量条件、预将处置的废物总量和技术经济条件。

4 结 论

(1) 研究区岩体较完整, 深度大于 400 m 时, 地下水补给匮乏且为还原环境, 岩石的单轴抗压强度较高, 岩体总体质量较好。

(2) 深度小于 700 m 时, 地应力为一般应力场, 二次开挖稳定性分析和岩爆分析认为, 在此范围内岩爆发生的可能性不大。

(3) 依据地下深地质处置库深度确定的基本要求, 通过对处置硐室开挖稳定性分析, 并在综合对旧井地段的地质、水文、岩石力学特征分析研究基础上, 初步认为旧井地段处置库的设计深度应在 400~700 m 内进行, 但是一个处置库的具体深度应设计在什么位置, 还应综合考虑自然环境条件、地质条件、岩体质量条件、预将处置的废物总量、处置库库容和技术经济条件。

本文对二次开挖的稳定性和岩爆发生的可能性只进行了初步的定性和定量分析, 此方面的后续工作还应选用合适的模型进行数值计算, 以便从解析分析和数值计算两者的对比分析进行深层次的分析和研究。

参考文献(References):

[1] 王 驹, 范显华, 徐国庆, 等. 中国高放废物地质处置十年进展[M]. 北京: 原子能出版社, 2004.(WANG Ju, FAN Xianhua, XU Guoqing, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste in China: progress in last decade[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2004.(in Chinese))

[2] 王 驹, 陈伟明, 苏 锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801 - 812.(WANG Ju, CHEN Weiming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801 - 812.(in Chinese))

[3] ROLF C. Deep repository underground design premises, edition d1/1, R - 04 - 60[M]. [S. l.]: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2004.

- [4] ANERSSON J, STROM A, SVEMAR C, et al. What requirements does the KBS - 3 repository make on the host rock[R]. [S. l.]: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2000.
- [5] ALLAN H. Deep repository for spent nuclear fuel, main report[R]. [S. l.]: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1999.
- [6] 王 驹, 陈伟明, 金远新, 等. 旧井地段 1 : 50 000 区域地质特征研究[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2001.(WANG Ju, CHEN Weiming, JIN Yuanxin, et al. Geology of Jiujing Section, Beishan Area, Gansu Province—the preselected area for China's high-level radioactive waste repository(scale of 1 : 50 000)[R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2001.(in Chinese))
- [7] 王 驹, 郭永海, 金远新, 等. 旧井地段水文地质特征研究[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2001.(WANG Ju, GUO Yonghai, JIN Yuanxin, et al. Hydrogeology characteristic of Jiujing Section, Beishan Area, Gansu Province—the preselected area for China's high-level radioactive waste repository[R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2001.(in Chinese))
- [8] 王 驹, 刘月妙. 旧井地段岩石物理力学特性研究[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2001.(WANG Ju, LIU Yue-miao. Rock physical and mechanics properties study on Jiujing block, Beishan Area, Gansu Province—the preselected area for China's high-level radioactive waste repository[R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2001.(in Chinese))
- [9] 徐 健, 王 驹. 利用岩石质量指标和岩体块度指数进行岩体质量评价研究[J]. 铀矿地质, 2006, 22(5): 295 - 299.(XU Jian, WANG Ju. Comparison of rock mass quality assessment based on the rock quality designation and rock block index[J]. Uranium Geology, 2006, 22(5): 295 - 299.(in Chinese))
- [10] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.(LIU Yunfang. Rock mass geostresses and engineering construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [11] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.(WANG Sijing, YANG Zhifa, LIU Zhuhua. Stability analysis of rock mass in underground project[M]. Beijing: Science Press, 1984.(in Chinese))
- [12] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990.(ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990.(in Chinese))
- [13] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(XIE Heping, CHEN Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [14] 关树宝. 隧道工程设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(GUAN Shubao. Tunnel engineering design[M]. Beijing: China Communication Press, 2003.(in Chinese))
- [15] 王 驹, 陈伟明, 金远新, 等. 旧井地段深部地壳应力测量[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2001.(WANG Ju, CHEN Weiming, JIN Yuanxin, et al. Geostresses survey for Jiujing block, Beishan Area, Gansu Province—the preselected area for China's high-level radioactive waste repository[R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2001.(in Chinese))
- [16] 邱祥波, 李术才, 李树忱. 三维地应力回归分析方法与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 613 - 1 617.(QIU Xiangbo, LI Shucai, LI Shuchen. 3D geostress regression analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 613 - 1 617.(in Chinese))
- [17] 杨 柯, 张力翔, 李仲奎. 地下洞室群有限元分析地应力场计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 639 - 1 644.(YANG Ke, ZHANG Lixiang, LI Zhongkui. New method for calculating geostresses in finite element analysis of underground house[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 639 - 1 644.(in Chinese))
- [18] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 等. 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机制的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 255 - 1 262.(XU Zemin, HUANG Runqiu, LUO Xingchun, et al. Limitation of static load theory in rockburst research and preliminary analysis on dynamics mechanism burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 255 - 1 262.(in Chinese))
- [19] 冯夏庭, 马平波. 基于数据挖掘的地下洞室围岩稳定性判别[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 306 - 309.(FENG Xiating, MA Pingbo. Identifying stability of underground opening based on data mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 306 - 309.(in Chinese))
- [20] 周国林, 谭国焕, 李启光, 等. 剪切破坏模式下岩石的强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 753 - 762.(ZHOU Guolin, L. G. Tham, LI Qiguang, et al. New strength criterion for rock with shear failure mode[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 753 - 762.(in Chinese))
- [21] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(ZHU Weishen, HE Manchao. Surrounding Rock stability under complicated condition and rock dynamic construction mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [22] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1 - 20. (TAN Tjongkie. The mechanical problems for the long-term stability of ground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1 - 20.(in Chinese))