

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.023

基于结构面综合指标的岩体质量评价及应用

雷光伟^{1,2}, 杨春和^{1,3}, 王贵宾³, 魏翔¹, 陈世万¹, 霍亮¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 广安市经济和信息化委员会, 四川 广安 638000;
3. 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: 岩体结构面是处置库中核素迁移的关键通道, 也是各种岩体质量评价的重要指标。鉴于高放废物处置库工程的安全等级、服务年限及围岩体力学特征, 在深入分析传统的岩体质量评价方法及节理和断层等结构面对处置库安全性、可靠性产生的重要影响的基础上, 建立一种基于多维度、多尺度结构面综合指标 *SCE* 的岩体质量评价方法。以中国高放废物处置库天湖地段岩体地表结构面调查和钻孔数据为依据, 采用 *SCE* 指标对天湖岩体质量进行评价。实例分析表明: 该指标克服了传统的单一指标对岩体结构面评价的不足, 可以更便捷、准确、客观地体现结构面发育程度及岩体完整性, 与现实情况更为符合。研究结果既可为处置库设计中的渗流特性和核素迁移规律研究提供科学、合理的依据, 也可为建立一套适用于高放废物处置库场址筛选和适宜性评价体系提供一定参考。

关键词: 高放废物处置库; 花岗岩; 节理; 断层; 岩体质量评价; 天湖地段

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2343-08

Rock quality evaluation and application based on comprehensive index of rockmass structures

LEI Guang-wei^{1,2}, YANG Chun-he^{1,3}, WANG Gui-bin³, WEI Xiang¹, CHEN Shi-wan¹, HUO Liang¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Guangan Economic and Information Commission, Guangan, Sichuan 638000, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In high-level radioactive waste (HLW) disposal engineering, structure in rock mass is a key parameters in rock mass quality assessment which may provide potential pathway for nuclide migration. Under the consideration of the great importance of joints on the long-term safety requirements for HLW disposal, a multi-dimension and multi-scale comprehensive index-*SCE* is proposed to conduct rock mass quality assessment. The index-*SCE* is applied to assess the quality of Tianhu rock mass, the pre-selected area of high radioactive waste repository using the structure date from borehole and outcrop. Results show that the *SCE* is more effective than conventional rock mass assessment method (single parameter method). The research could provide scientific understanding for quality assessment of rock mass, which help understand more properties such as the permeability of rock mass and the migration of nuclide. In a word, this index will provide meaningful reference for site selection and quality assessment for high-radioactive waste repository.

Keyword: high-level radioactive waste repository; granite; joint; fault; rockmass quality evaluation; Tianhu section

1 引 言

工程岩体中发育的结构面, 破坏了岩体的完整性、连续性, 对岩体的渗流特征和破坏方式有重要影响, 同时也劣化了岩体工程特性, 导致岩体质量显著下降。岩体质量分级和评价是工程岩体设计、施工方案选择及工程安全性、稳定性评价等研究不可或缺的重要环节^[1], 岩体结构面则是各类岩体质

量分级评价方法的重要指标, 对岩体结构面发育程度进行合理、准确的评价, 长期以来都是岩石工程领域所面临的热点、难点课题之一。

在岩体工程中, 对研究区围岩的岩体质量进行分级和评价是一项极为重要的工作。目前, 关于岩体质量的评价方法有很多, 如 Deere 等^[2]根据钻孔岩芯的好坏程度, 采用 RQD 指标对岩体质量进行评价; Barton 等^[3]基于大量隧洞工程的稳定性研究,

收稿日期: 2015-03-23

第一作者简介: 雷光伟, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事核废料处置中岩体节理发育及三维网络模拟等方面的研究。E-mail: guangweilei@126.com

建立了 Q 系统法; Bieniawski^[4]根据矿山开采, 提出 RMR (Rock Mass Rating) 工程岩体分类体系。谷德振^[5]提出了岩体质量指数 Z 分级方法。由于工程建设的发展和需要, 岩体工程越来越向深部发展, 导致涉及的岩石力学问题更多更复杂。因此, 有研究者把一些新技术、新理论应用到岩体质量分析中, 冯夏庭等^[6]提出一种采用人工神经网络方法建立岩体质量评价的专家系统; 唐海等^[7]将未确知测度理论与关联函数相结合, 应用于地下洞室岩体质量评价; 刘树新等^[8]从多重分形几何的角度出发, 对三维岩体质量的多重分形进行评价及分类; 肖云华等^[9]将混沌优化算法和可拓评判方法结合起来, 建立相应评价指标, 对岩体质量进行评价; 钟登华等^[10]基于三维地层模型进行岩体质量可视化分级。这些岩体质量评价方法均将岩体结构面作为岩体质量评价的一个重要指标。但大多仅根据一维的(或钻孔、或地表)节理参数进行岩体质量评价, 而岩体是具有各项异性的三维地质体, 用于反应岩体结构面的指标也应是三维的参数。此外, 忽视了断层对岩体工程稳定性及作用边界的控制作用。若仅以某一维度或某一尺度的指标来表征三维岩体的结构面发育程度和岩体完整性势必出现较大偏差。

对于高放废物处置库这样的大型地下工程, 其目标是将高放废物埋藏在距地表 400~1 000 m 的处置库中^[11-17], 使之与人类生存环境隔离至少 1 万年, 若因处置库场址的某一属性或因素致使高放射性核素外泄, 返回生物圈, 将会对人类生命及生存环境带来灾难性后果。因此, 高放废物处置库工程具有建设条件复杂、安全等级高、服务周期长等特点, 处置库的这些特殊要求是目前任何一项岩体工程从未遇到过的^[13-14]。在处置库场址筛选阶段如何科学、合理、准确、方便地评价预选区内的岩体质量及完整性, 对决定是否有必要进入下一阶段的深入研究具有重要意义。

岩体结构面是处置库中的高放射性核素随地下水迁移返回生物圈的主要通道, 也是决定地下水交替、运移速率的最关键因素^[14-15]。而采用传统方法进行岩体质量评价时, 对岩体结构面的考虑尚不够全面。从场址筛选到处置库建成的各个阶段, 需要建立一套满足处置库要求的一系列评价方法和体系^[13-14]。本文在深入分析处置库要求和围岩体特点的基础上, 从高放废物处置工程场址比选阶段的目的及要求出发, 提出一种基于三维、多尺度结构面综合指标的岩体质量评价方法, 以期建立一套适用于高放废物处置库场址筛选和场址适宜性评价体

系提供参考。

2 岩体结构面综合评价指标 SCE

岩体结构面是在长期的地质演变过程中地质建造和构造改造共同作用的结果, 地质建造是岩体结构的基础, 构造改造是岩体结构的决定因素, 岩体结构面则是构造应力场对岩体作用的一种反应^[18]。对于一定地质环境中形成的岩体结构面而言, 它的几何特征具有一定规律性, 而岩体结构面的力学特性由岩石材料的力学性质和结构面几何特征及其在空间的组合形态决定。

岩体质量评价的主要目的是从岩石工程的实际需求和目标出发, 建立一种客观的比较手段和衡量标准, 对工程所涉及岩体进行质量评价, 并根据岩体质量好坏程度进行分级, 为岩体工程的安全性、可靠性分析提供依据^[19-20]。岩体的工程地质特性决定了岩体质量受多种因素的共同影响, 但某些因素之间又存在一定交叉和重叠, 在岩体质量评价时, 不可能考虑每一个因素, 应分清主次, 强调其中的主导因素和关键指标^[21], 便于实际操作, 且要减少主观性和经验性较大的一些定性指标, 尽量采用实际的结构面定量指标, 使评价结果更接近真实情况。

鉴于高放废物的放射性强、毒性大、半衰周期长等特点, 岩体作为高放废物的地质处置体系, 其渗流特性、地下水分布以及核素迁移规律等在很大程度上成为了处置库是否能够安全、有效地处置高放废物, 使之与人类生存环境永久隔离的关键^[11-12]。对于把花岗岩作为高放废物的围岩体而言, 具有孔隙度小、含水率和渗透性极低、机械强度大等特点^[14]。我国高放废物处置库预选区内的花岗岩呈大面积成片分布, 岩石强度高(根据室内试验结果, 预选区内几乎所有花岗岩的抗压强度 $R_c > 100$ MPa, 在 170 MPa 左右, 有的甚至超过 200 MPa), 地应力多处于中、低等水平, 这些特点对建造处置库非常有利。不利的是花岗岩中通常发育有一定数量的断层和节理, 这些结构面是地下水的主要储集场所和运移通道, 高放射性核素可能会随着地下水迁移, 最后返回生物圈, 危及人类健康和生态环境。此外, 岩体由岩石及各种结构面组成, 其强度不仅取决于岩石强度, 同时也受岩体结构控制。由此可见, 高放废物处置库的两个核心问题是: 核素迁移和围岩稳定, 在以花岗岩为围岩体的高放废物处置库中, 围岩稳定性方面通常不存在问题; 而对于处置库场址周边的断层、露头节理、钻孔裂隙的发育程度及分布特

征的研究和评价显得至关重要。

当前的岩体质量评价或岩体结构面评价方法多针对浅部岩体工程，传统的评价方法^[2-10]对岩体结构面的考虑不够全面、深入，存在一些不足，可以在地下深部处置库工程中作为参考。而目前还未建成高放废物处置库，尽管国外的花岗岩处置库场址评价技术已取得阶段性成果，但国内外关于处置库工程的场址评价方法和体系仍处于探索阶段。我国具有与国外场址不同的地质和水文地质特征^[12-14]，针对我国高放废物处置库花岗岩场址评价的迫切需求，必须建立和掌握一套系统的、适用于我国干旱戈壁地区的处置库场址特性评价方法。鉴于岩体结构面对处置库工程的成败与否具有决定性作用，笔者提出一种多尺度、多维度的结构面综合评价指标来表征预选区内岩体结构面发育程度，具体表达式为

$$SCE = \lambda_0 + JSR + M \quad (1)$$

式中： SCE 为结构面综合评价指标； λ_0 为钻孔裂隙密度指标； JSR 为地表节理发育指标（jointing structure rating）； M 为大结构面（断层）密度指标。

需要说明的是：式（1）中等式右边三项分别是根据钻孔裂隙、地表节理和调查密度各指标的岩体质量评分大小之和，而不是各指标参数表征物理含义的数值相加，下面就各指标的具体计算公式和评分进行详细阐述。

（1）钻孔裂隙线密度 λ_0 指标的确定及评分。根据现场测量数据，求得裂隙优势产状的平均倾角。

从图 1 可知，裂隙真间距 d 与钻孔深度存在如下关系：

$$d = h \cos A / n \quad (2)$$

式中： d 为裂隙真实间距； h 为钻孔深度； A 为裂隙优势产状的平均倾角； n 为优势组裂隙条数。由于钻孔直径远小于钻孔深度，以轴线为基准线计算钻孔裂隙间距，间距倒数即为线密度：

$$\lambda_0 = 1 / d \quad (3)$$

根据高放废物处置库对预选区围岩体完整性的要求^[11-12]，结合野外测量得到的实际裂隙间距，根据 ISRM 关于间距划分的建议^[21]，对间距的下限和中等间距划分做了一定调整，调整后的间距划分标准可以更好地揭示野外大量出现的间距值（0.5~2.0 m）之间的分级差异。

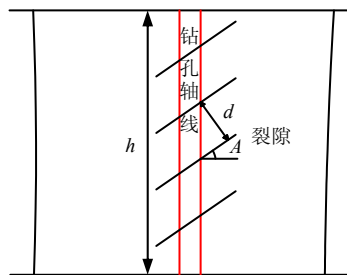


图 1 真间距与钻孔深度关系

Fig.1 The relation of actual spacing and borehole depth

表 1 钻孔裂隙线密度 λ_0 评分

Table 1 Score of linear density λ_0 for borehole fracture

间距划分 / m	间距描述	调整后间距划分 / m	裂隙线密度 / m ⁻¹	岩体质量评分
<0.06	很密	<0.1	>10	<20
0.06~0.20	密	0.1~0.5	10~2	20~40
0.20~0.60	中等	0.5~1.0	2~1	40~60
0.60~2.00	宽	1.0~2.0	1~0.5	60~80
>2.00	很宽	>2.0	<0.5	80~100

（2） JSR 指标的确定和评分。 JSR 是一个综合指标，其表达式为

$$JSR = W_n \bar{D}_a \bar{L} \quad (4)$$

式中： W_n 为节理组数； \bar{D}_a 为迹线中点面密度； \bar{L} 为节理平均迹长； JSR 表征了地表节理的发育程度，评分越高，表明地表节理越发育，岩体完整性就越差，岩体质量越低。根据测区内露头节理各参数大小及相应的评分，最后得出 JSR 值和岩体质量评分，各指标评分如表 2 所示。

表 2 节理组数、迹线中点面密度、平均迹长、地表节理值及相应的评分

Table 2 Joint group, trace midpoint density, mean trace length, The value of surface joint and corresponding scoring

节理组数	评分	平均中点面密度	评分	平均迹长	评分	JSR 值	岩体质量评分
≤1	1.0~2.0	0~0.2	1~4	0~1	1~3	≤24	80~100
2	2.0~3.0	0.2~0.6	4~8	2~3	3~6	24~144	60~80
3	3.0~4.0	0.6~2	8~12	3~10	6~9	144~432	40~60
4	4.0~5.0	2~6	12~16	10~20	9~12	432~960	20~40
≥5	5	>6	16~20	12~15	12~15	960~1 500	<20

（3）断层面密度指标 M 是指单位面积内所有断层长度的总和，其表达式为

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (5)$$

式中： M 为测区内断层面密度； S 为区域面积； L_i 为区域内第*i*条结构面长度； n 为结构面数量，长度和面积的单位一般用(km)。有研究者采用单位面积内的断层数量计算断层密度，但考虑到断层延伸长度相差很大，有几百米、数千米，也有断层延伸达几十甚至几百千米，从而导致连通性具有显著差异。例如1条5 km的断层和1条500 m的断层对区域岩体稳定性、渗流特性的控制范围和作用边界以及与相邻岩体的连通性和断层破碎带、节理影响带的大小等差别很大，而使用断层数量计算断层面密度则不能体现这样的差别。

表3 断层面密度 M 评分
Table 3 Score of fault density

断层面密度	断层发育程度	岩体质量评分
≥ 1.5	很高	< 20
1.0~1.5	高	20~40
0.5~1.0	中等	40~60
0.1~0.5	低	60~80
≤ 0.1	很低	80~100

(4) 式(1)包含了关于岩体结构面的3个评价指标， JSR 和 λ_0 分别表征小尺度结构面(节理)在地表面不同位置和垂直方向的发育程度， M 表征了断层在预选区内的发育程度，赋予各项指标一定权重。由于断层破坏了岩体的连续性，决定了岩体力学的作用范围，是控制了岩体变形破坏的演化方向，是稳定性计算的边界条件，也是与邻近地块进行地下水交换和转移的主体，其两侧一定范围是节理发育带，是地下水的主要集聚场所，对地下处置库围岩渗流特性具有促进作用。但一般而言，在一定区域内，断层发育数量有限，所以赋予断层40%的权重。节理则是结构面裂隙网络相互连通的桥梁和纽带，是地下水流动的主要通道，且在围岩体中广泛分布，因此，分别赋予地表平面和垂直方向的节理裂隙30%的权重。根据各指标关于结构面发育程度的评分，乘以相应权重，3项分值相加得到 SCE 值，将预选区内岩体结构面划分为5个等级进行分级描述，最后评价不同区域的岩体结构面发育程度和岩体完整性， SCE 分级方案见表4。

3 工程应用

3.1 研究区地质概况及结构面发育特征

天湖地段岩体位于新疆哈密市东南部，构造上处于东天山古生代构造带南缘阿齐克库都克尼亚深大断裂与库鲁克塔格星星峡大断裂之间，属塔里木

表4 结构面综合评价指标 SCE 分级及描述
Table 4 The classification and description for fracture comprehensive evaluation index

SCE	分级	结构面发育程度	岩体完整性
80~100	I	低	好
60~80	II	较低	较好
40~60	III	中等	一般
20~40	IV	较高	较差
< 20	V	高	差

板块北缘，准格尔板块和塔里木板块交界处。天湖岩体呈等轴状岩株产出，东西向最长约14 km，南北向最宽约12 km，大体呈不规则圆状，出露面积约123 km²。地势平坦，多为戈壁、丘陵，植被稀少，常年干旱少雨。岩性主要为花岗岩类，岩体东、西两侧及北部侵入中元古界天湖群变质岩及其内片麻状花岗岩体，南侧侵入下二叠统红柳河组，接触界面多外倾，其产状明显切割了片麻理，为突变式侵入接触关系，天湖岩体周围分布大量变质岩。

工程岩体作为历经漫长地质历史过程的地质体，往往具有复杂的结构特征，这种特征不仅表现在几何尺度上，同时也表现在性质上。对复杂岩体的研究首先是科学的分类和合理的分级，再针对不同类型、级别的结构面分别提出采用不同的研究方法，从而达到系统提出岩体结构量化参数和建立岩体结构面评价指标^[22]的目的。此次研究主要以规模为第一要素作为划分依据。根据规模分为：大尺度结构面和小尺度结构面，对于延伸小于1 m的非贯通型岩体结构面，因其裂隙连通率低，不作专门的调查研究。

天湖岩体结构面发育及范围如图2所示，研究区内有大量岩脉和蚀变带，现场测量时重点对延伸大于400 m的大尺度结构面进行追踪测量。其中，岩脉包括闪斜煌斑岩、辉绿岩和细粒花岗岩；走向以NNW向为主，NE向和EW向次之；延伸较远，多在1 km以上，脉宽从几十厘米至几米不等；在多数测点处，岩脉与围岩呈焊接式接触，少数测点与围岩呈裂隙式接触。蚀变带走向几乎均为NNW向，集中分布在天湖岩体中部略偏西位置，蚀变类型主要有绿泥石化、绿帘石化、钠化、褐铁矿化和硅化等，这些蚀变作用增强了岩体的渗流特性，降低了岩体的力学性质，极大弱化了岩体稳定性。由于被第四纪沉积物覆盖，部分区域地表出露露头较少，地表节理发育程度较低，仅在规模较大的岩脉和蚀变带附近相对发育。在天湖岩体内有TH01和TH02两个钻孔，通过钻孔电视获得了钻孔裂隙数据信息。

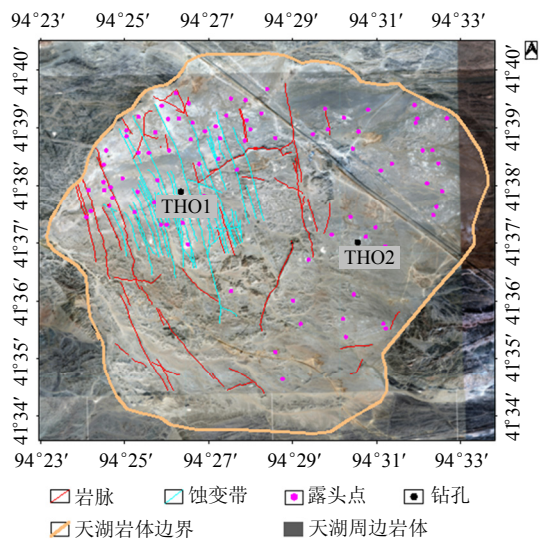


图 2 天湖岩体地表结构面分布

Fig.2 Distribution of surface fracture for Tianhu section

3.2 天湖地段岩体质量评价

通过数学与概率统计法对天湖岩体 TH01 和 TH02 两个钻孔周边测得的结构面数据及钻孔电视得到的裂隙数据进行处理，采用第 2 节提出的岩体结构面评价指标 *SCE* 进行计算。

钻孔裂隙线密度 λ_b 计算：根据钻孔示意图 1 及式 (2) 和 (3) 得到天湖岩体内两个钻孔 TH01 和 TH02 钻孔裂隙线密度分别为：0.99 和 1.97 m^{-1} 。由于得出的裂隙密度是整个钻孔裂隙的总体发育程度。因此，为了研究、体现不同钻孔深度裂隙发育程度的差别，天湖岩体两个钻孔深度均为 600 m，分 30 个区段，每段 20 m，得到各钻孔裂隙密度随钻孔深度变化关系如图 3、4 所示。

根据图 3、4 可知，天湖岩体两个钻孔裂隙发育随深度变化均呈现显著的分段特征，即裂隙发育高峰段与低谷段随深度交替出现，其中在钻孔深度约 110、250 和 360 m 几个区段附近，2 个钻孔的裂隙发育程度均较高。总体而言，TH02 钻孔裂隙发育程度明显高于 TH01 钻孔，裂隙密度位于 1~2.5 的区段较多，有 5 个区段、累计深度 100 m 的区段密度在 4 左右；而 TH01 钻孔裂隙密度则多小于 1，仅有 2 个区段裂隙密度在 3.5 左右。

地表典型露头节理发育指标 *JSR* 计算及评分：采用综合测线法对出露较好的地表露头进行现场测量，所得数据采用杨春和等^[23]改进后的圆形窗口法原理计算各典型露头的节理平均迹长和迹线中点面密度，综合节理组数，计算得到 TH01 和 TH02 周围岩体节理发育的 *JSR* 评分平均值如表 5 所示。

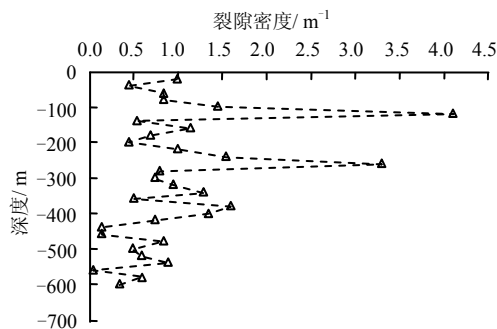


图 3 TH01 钻孔裂隙密度随深度变化
Fig.3 Fracture density with borehole depth for TH01

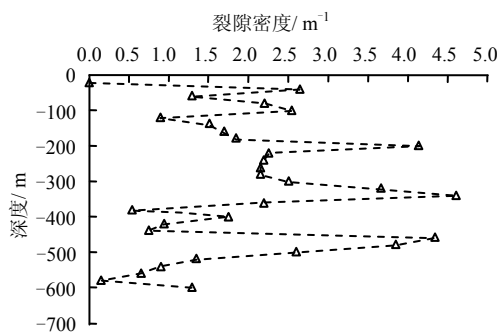


图 4 TH02 钻孔裂隙密度随深度变化
Fig.4 Fracture density with borehole depth for TH02

表 5 TH01 和 TH02 钻孔周边地表节理 *JSR* 评分
Table 5 *JSR* of joints around borehole for TH01 and TH02

钻孔号	W_n		\bar{D}_n		\bar{L}		<i>JSR</i> 评分
	数值	评分	数值	评分	数值	评分	
TH01	4.0	4.5	0.032	2.500	19.6	12.0	140
TH02	4.0	4.5	0.026	2.000	23.4	15.0	135

表 5 中 2 个钻孔周围地表露头节理 *JSR* 的总体发育情况，相当于一个均值，为了体现地表不同位置的节理发育程度和差异。选取节理数大于 25 条的典型露头（数据较多，计算得到的结果更准确），计算各露头 *JSR* 值，计算结果及根据表 2 各参数对应的评分，得出 *JSR* 评分结果如表 6 所示。

天湖岩体内大量的岩脉和蚀变带严重破坏了岩体完整性，决定了岩体的演化方向和作用边界，在分析时均把岩脉和蚀变带当作断层处理。采用式 (4) 计算得到天湖岩体 TH01 和 TH02 钻孔周边的断层密度分别为

$$\left. \begin{aligned} M_{01} &= \frac{\sum L_i}{S} = \frac{103.2}{75.4} = 1.37 \\ M_{02} &= \frac{\sum L_i}{S} = \frac{15.4}{47.9} = 0.32 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

表6 TH01、TH02 两个钻孔周边典型露头迹线中点面密度 \bar{D}_a 、平均迹长 \bar{L} 、节理组数 W_n 及 JSR 评分表
Table 6 Trace midpoint density, mean trace length and the number of joint group of typical outcrops around borehole for TH01 and TH02

点号	\bar{D}_a	\bar{L}	W_n	JSR	点号	\bar{D}_a	\bar{L}	W_n	JSR	点号	\bar{D}_a	\bar{L}	W_n	JSR
A3	0.03	29.9	3	120	A42	0.01	19.4	2	144	A67	0.05	16.6	2	60
A9	0.02	10.9	3	80	A43	0.01	23.6	2	105	A68	0.01	28.8	3	104
A10	0.06	7.9	3	144	A44	0.04	18.7	2	152	A69	0.03	30.2	2	180
A14	0.02	24.0	2	135	A45	0.02	23.5	2	135	A70	0.02	23.7	3	168
A19	0.01	19.5	3	152	A52	0.01	23.8	2	90	A71	0.02	18.2	1	45
A25	0.03	19.7	4	180	A53	0.03	24.0	2	156	A73	0.04	17.5	3	212
A26	0.01	22.8	4	168	A54	0.01	31.5	2	135	A74	0.04	16.6	2	152
A29	0.04	22.2	3	135	A56	0.05	11.1	3	192	A75	0.03	28.7	2	135
A31	0.01	27.5	4	210	A57	0.04	21.0	2	135	A76	0.04	29.3	3	110
A32	0.01	33.5	3	190	A60	0.03	24.0	3	210	A78	0.03	29.3	2	90
A36	0.01	23.8	2	135	A62	0.02	28.1	2	130	A80	0.02	21.2	2	60
A39	0.05	15.7	2	108	A63	0.05	16.8	3	152					
A41	0.03	13.5	3	144	A66	0.02	24.7	3	136					

根据计算结果,对比表 7 可知: TH01 周围大尺度结构面发育程度高, 1 km^2 的范围内发育约 1.37 km 长的岩脉或蚀变带; TH02 周围大尺度结构面发育程度低, 1 km^2 仅发育有约 0.32 km 的岩脉或蚀变带。根据钻孔裂隙密度 λ_b 、地表节理 JSR 和断层密度 M 各指标值及评分细则进行评分,并乘以相应权重,得到新疆预选区天湖地段岩体 TH01 和 TH02 两个钻孔周围岩体结构面发育的综合评价指标 SCE 结果如表 7 所示。

根据表 7 评分结果知道,采用 SCE 指标评价得到 TH01 和 TH02 两个钻孔周围岩体结构面,分值分别为 50.3 和 61.0,按照表 7 关于不同 SCE 分值

给出的结构面等级、结构面发育程度及岩体完整性描述: TH01 钻孔周边属 III 级岩体,结构面中等发育,岩体完整性一般; TH02 钻孔周边属 II 级岩体,结构面发育程度较低,岩体完整性较好,但评分仅处于好与一般的边缘。综合考虑 2 个钻孔裂隙密度及钻孔周边地表节理和断层密度的发育程度,天湖岩体的结构面中等发育,岩体质量不高,对于高放废物处置库这样安全等级高、时间跨度长的大型地下工程,若在天湖地段岩体建设处置库,在安全性和可靠性方面不能得到足够保证,存在不小风险和隐患,不宜继续对该地段岩体展开进一步的调查和深入研究。

表7 TH01 和 TH02 钻孔周边地表节理 JSR 平均值
Table 7 The average value of surface joint's JSR around borehole for TH01 and TH02

钻孔号	$\lambda_b / \text{m}^{-1}$			JSR			断层密度 M/m^{-2}			SCE 评分
	数值	评分	权重	数值	评分	权重	数值	评分	权重	
TH01	0.99	60	$60 \times 30\%$	140	65	$65 \times 30\%$	1.37	32	$32 \times 40\%$	50.3
TH02	1.97	42	$42 \times 30\%$	135	68	$68 \times 30\%$	0.32	70	$70 \times 30\%$	61.0

4 讨论

文中提出的岩体结构面综合评价指标 SCE 可以较为全面、准确、客观地从多维度、多尺度的角度体现研究区内最常见、对工程岩体具有重要影响的节理和断层这两种不同尺度的结构面发育程度。由于岩芯钻取需要大量经费、时间和人力,在没有钻孔裂隙数据的特殊情况下,也可适当调整地表节理和区内断层的权重,采用 SCE 中的 JSR 和 M 两个指标对研究区内地表岩体不同尺度的结构面发育程度进行评价,也可直接用式中 JSR 指标评价地表

节理(研究区没有断层分布和钻孔数据的情况下)。由此可见,该指标具有方便、快捷、经济、易于工作者实施等优势。

钻孔裂隙的评价指标可以用线密度、岩体体积节理数 J_v 、钻孔岩石质量指标 RQD 等,鉴于 J_v 指标的实质是各个节理组的线密度和考虑随机节理的线密度之和,但计算时岩体体积单元的大小和形状存在争议^[24];而 RQD 值中 10 cm 这个阈值能否作为最合理地区分岩体完整性的界线并没有充分的依据,RQD 指标对于结构面间距大于 10 cm 的岩体很难进行区分和评价^[8, 11],因此,笔者采用线密度指

标表征钻孔裂隙。由于不同的岩性具有不同的物理和力学特征，其岩体裂隙发育程度、渗透率和孔隙率等均存在明显差异，比如强度较低的岩石在构造作用过程中可能更多产生塑性变形，节理裂隙发育程度较硬脆性岩石反而低，岩体结构面综合评价指标 *SCE* 对强度较低的岩体其适用性有待验证。此外，*SCE* 指标中各指标权重分配的合理性需更多的实践检验。

5 结 论

(1) 从地质建造和构造改造两方面出发，结合高放废物处置库工程 2 个重点问题——核素迁移和围岩稳定，充分考虑这些原则和工程目标，作为岩体结构面综合评价指标选取的依据。

(2) 岩体质量分级评价对工程岩体意义重大，针对以 *RQD*、*RMR*、*Q* 和 *BQ* 等为代表的传统的岩体质量分级评价方法在高放废物处置库这样安全等级高、服务年限长、系统、复杂的大型地下工程中存在的不足。提出了包括钻孔裂隙密度 λ_b 、地表节理 *JSR* 和断层密度 *M* 的结构面综合评价指标 *SCE*。

(3) 将 *SCE* 指标应用于天湖地段岩体结构面发育评价，结果表明：TH01 钻孔周边结构面中等发育，岩体完整性一般；TH02 钻孔周边结构面发育程度较低，岩体完整性较好，总体而言，天湖地段岩体完整性不高，不利于建造高放废物处置库。与传统的岩体完整性评价方法相比，*SCE* 指标能更全面、客观、准确地体现研究区内大小结构面在三维空间的分布和发育程度，更符合岩体结构面实际情况。

高放废物处置库是一个复杂、系统的万年工程，从场址筛选到处置库建成，需要建立一套包括岩体质量评价在内、适用于高放废物处置库的评价体系。建立的结构面综合评价指标 *SCE* 对我国高放废物处置库场址筛选和适宜性评价以及核素迁移规律研究具有一定的理论价值和工程指导意义。

参 考 文 献

[1] 张鹏, 陈剑平, 邱道宏. 基于粗糙集的隧道围岩质量可拓学评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 246—251.
ZHANG Peng, CHEN Jian-ping, QIU Dao-hong. Evaluation of tunnel surrounding rock quality with extenics based on rough set[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 246—251.

[2] DEERE D U, DEERE D W, The Rock Qanlity Designation(RQD) Index in Practics[R]. Philadelphia:

American Sociery for Testing and Materials, 1998: 91—101.

[3] BARTON N W, LINE R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. **Rock Mechanics**, 1974, 6(4): 189—239.

[4] BIENIAWSKI Z T. Engineering classification of jointed rock masses[J]. **Transactions of the South African Institution of civil Engineers**, 1973, 15: 335—344.

[5] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1—129.
GU De-zhen. Basement of engineering geomechanics of rock mass[M]. Beijing: Science Press, 1979: 1—129.

[6] 冯夏庭, 王泳嘉. 岩体质量评价神经网络专家系统知识库的建立[J]. 金属矿山, 1994, 9: 5—8, 35.
FENG Xia-ting, WANG Yong-jia. The knowledge base establishment of neural net expert system for the qualitative evaluation of rock body[J]. **Metal Mine**, 1994, 9: 5—8, 35.

[7] 唐海, 万文, 刘金海. 基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价[J]. 岩土力学, 2011, 4: 1181—1185.
TANG Hai, WAN Wen, LIU Jin-hai. Evaluation of underground cavern rock quality based on uncertainty measure theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 4: 1181—1185.

[8] 刘树新, 张飞. 三维岩体质量的多重分形评价及分类[J]. 岩土力学, 2004, 7: 1116—1121
LIU Shu-xin, ZHANG-fei. Multifractal evaluation and classification of 3-D jointed rock mass quality[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 7: 1116—1121.

[9] 肖云华, 王清, 陈剑平. 基于优化技术的权重计算方法在岩体质量评价中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 9: 2686—2690.
XIAO Yun-hua, WANG Qing, CHEN Jian-ping. Application of method for weight calculation based on optimization technique to evaluate rock mass quality[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 9: 2686—2690.

[10] 钟登华, 李明超, 王刚, 等. 基于三维地层模型的岩体质量可视化分级[J]. 岩土力学, 2005, 1: 11—16.
ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, WANG Gang, et al. Visualization of rock mass quality classification based on 3-D strata model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 1: 11—16.

[11] 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 Wei-ming, 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.
- [12] 罗嗣海, 钱七虎, 赖敏慧, 等. 高放废物处置库的工程设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3904—3911.
- LUO Si-hai, QIAN Qi-hu, LAI Min-hui, et al. Design of high-level radioactive waste repository[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26 (Supp.2): 3904—3911.
- [13] 苏锐, 程琦福, 王驹, 等. 我国高放废物地质处置库场址筛选总体技术思路探讨[J]. 世界核地质科学, 2011, 1: 45—51.
- SU Rui, CHENG Qi-fu, WANG Ju, et al. Discussion on technical ideas of site selection of geological disposal repository for high-level radioactive waste in china[J]. **World Nuclear Geoscience**, 2011, 1: 45—51.
- [14] 郭永海, 王驹, 金远新. 世界高放废物地质处置库选址研究概况及国内进展[J]. 地学前缘, 2001, 2: 327—332.
- GUO Yong-hai, WANG Ju, JIN Yuan-xin. The general situation of geological disposal repository siting in the world and research progress in china[J]. **Earth Science Frontiers**, 2001, 2: 327—332.
- [15] 郭永海, 王海龙, 董建楠, 等. 高放废物处置库预选场址深部地下水同位素研究[J]. 地质学报, 2013, 9: 1477—1485.
- GUO Yong-hai, WANG Hai-long, DONG Jian-nan, et al. Isotopic study of deep groundwater in Jijicao preselected site for china level radioactive waste disposal repository[J]. **Sacta Geologica Sinica**, 2013, 9: 1477—1485.
- [16] 王驹, 苏锐, 陈伟明, 等. 中国高放废物深地质处置[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 649—658.
- WANG Ju, SU Rui, CHEN Wei-ming, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(4): 649—658.
- [17] 徐国庆. 对我国高放废物处置研发工作的几点建议[J]. 世界核地质科学, 2012, 4: 227—231.
- XU Guo-qing. Suggestions on R & D work of high-level radioactive waste disposal in China[J]. **World Nuclear Geoscience**, 2012, 4: 227—231.
- [18] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433—450.
- WANG Si-jing. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 433—450.
- [19] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 16: 2854—2858.
- HE Man-chao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 16: 2854—2858.
- [20] 高敬, 杨春和, 王贵宾. 甘肃北山岩体结构均质区划分方法的探讨[J]. 岩土力学, 2010, 2: 588—592, 598.
- GAO Jing, YANG Chun-he, WANG Gui-bin. Discussion on zoning method of structural homogeneity of rock mass in Beishan of Gansu province[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 2: 588—592, 598.
- [21] 国际岩石力学学会实验室和现场实验标准化委员会. 岩石力学试验建议方法(上)[M]. 北京: 北京煤炭工业出版社, 1982.
- International Society For Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Test. Suggested method for rock mechanics test (Vol.1)[M]. Beijing: Beijing China Coal Industry Publishing House, 1982.
- [22] 黄润秋, 许模, 陈剑平. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HUANG Run-qiu, XU Mo, CHEN Jian-ping. Accurate description of complicated rockmass structure and its application to engineering[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [23] 杨春和, 包宏涛, 王贵宾, 等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2475—2480.
- YANG Chun-he, BAO Hong-tao, WANG Gui-bin, et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2475—2480.
- [24] 张显志, 于俊清. 对国际岩石力学委员会 J_v 公式的质疑[J]. 长江科学院院报, 2001, 3: 47—48, 56.
- ZHANG Xian-zhi, YU Jun-qing. A query to J_v formula suggested by international rock mechanics committee[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2001, 3: 47—48, 56.