

钻孔岩体裂隙几何参数确定方法及其应用

魏翔¹, 杨春和^{1,2}

(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. 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: 裂隙岩体渗透性是高放废物处置库场址选择和评价的重要因素。钻孔岩体渗透性特征主要依靠钻孔电视获得的裂隙几何参数来确定。针对传统统计法确定裂隙几何参数存在的不足和误差, 提出新的统计方法和计算公式。研究结果如下: (1) 由于岩体裂隙空间分布多变性, 提出以裂隙密度和产状为基础的岩体均质区划分方法; (2) 钻孔岩体裂隙发育优势产状采用聚类分析方法进行统计; (3) 裂隙间距的确定考虑了测量误差的影响, 并提出修正公式; (4) 裂隙有效水力隙宽提出按照力学成因来确定。将获得的裂隙几何参数代入渗透张量计算程序中, 得到钻孔岩体的渗透张量以及渗透主值和主渗透方向, 从而为钻孔岩体渗透性分析提供依据。

关键字: 岩石力学; 裂隙; 几何参数; 统计方法; 渗透张量

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)09-1758-09

A METHOD OF GEOMETRIC PARAMETER DETERMINATION OF DRILLING ROCK FRACTURES

WEI Xiang¹, YANG Chunhe^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, 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: The permeability of jointed rock plays an important role in site selection and evaluation of high-level radioactive waste repository. The characteristics and magnitude of the permeability of rock obtained from the drilling borehole depend on the geometry parameters of fractures which are recorded with televised video in the borehole. To overcome the defects and errors of the traditional statistical method in determining the geometric parameters of fractures, a new statistical method was proposed. According to the spatial variability of the rock fractures, a homogeneous area partition was proposed based on the density and occurrence of fractures. The preponderant group of the fractures development was determined with the method of clustering analysis. An improved formula was proposed with the consideration of the influence of measurement error in determining the fracture distances. The effective hydraulic aperture of fracture was determined according to the mechanical causes. The permeability tensor, principal permeability and the main direction of seepage of rock was obtained after the geometry parameters of fracture were input into the program for the calculation of permeability tensor.

Key words: rock mechanics; fractures; geometry parameters; statistical method; permeability tensor

收稿日期: 2014-12-08; **修回日期:** 2015-02-22

作者简介: 魏翔(1989-), 男, 2012年毕业于重庆大学采矿工程专业, 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: 903153423@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1618

1 引言

在高放废物地质处置中，核素迁移是评价处置库安全性和可靠性的关键因素。裂隙是核素通过围岩伴随地下水向生物圈扩散的主要通道。因此，高放废物地质处置中岩体的水文特征研究显得尤为重要，其中裂隙岩体渗透性研究是关键问题。

目前裂隙岩体渗透性的确定主要有3种方法^[1]：(1) 几何测量方法；(2) 野外抽(压)水试验方法；(3) 数学模型反演求解方法。其中，基于岩体裂隙几何参数测量值，用统计学方法计算岩体的渗透系数张量的方法，由于其操作简单，并能反映出岩体渗透性各向异性而被广泛使用。D. T. Snow^[2]假定岩体中的裂隙无限延伸，根据裂隙的组数、间距、隙宽及产状要素，推导出裂隙岩体的渗透张量计算公式；许模^[3]通过岩体水力学理论分析了渗透张量的计算过程，认为根据裂隙水力参数(隙宽、间距、产状)的统计，计算渗透张量在理论上是可行的，实际应用效果较好；王贵宾^[4]将达西定律推广到各向异性介质中，导出多组裂隙渗透张量计算公式，并给出渗透张量主值和主渗透方向求法。这些计算公式都是建立在裂隙几何参数测量统计的基础上，因此统计方法对渗透系数的结果有直接的影响。而马峰等^[5]提出用钻孔成像提取裂隙发育产状和隙宽等渗透张量参数，计算基岩的渗透张量，并在钻孔的浅层和深层误差较大地段采用钻孔压水试验分别矫正的方法；殷黎明等^[6]在地下工程裂隙岩体渗透张量计算研究中，采用等效水力隙宽，并结合现场高压压水试验，确定岩体渗透系数。这些研究都是通过现场试验数据来间接对渗透张量计算结果矫正，并没有考虑裂隙几何参数测量过程和统计方法对计算结果的影响。

本文以高放废物处置新疆预选区天湖钻孔为研究对象，利用钻孔电视获得的天湖钻孔裂隙几何参数，提出了以裂隙密度和产状为依据的天湖钻孔均质区划分方法；采用了聚类分析方法对裂隙产状进行统计，考虑了测量误差对间距的影响，并提出了修正公式；提出了利用有效水力隙宽来表征隙宽并按照力学成因对其进行统计；最后将获得的裂隙产状、间距和隙宽这些几何参数代入渗透张量计算程序中，得到岩体的渗透张量以及渗透主值和主渗透方向，并对其进行分析，从而为钻孔岩体渗透性分析提供依据。

2 地质、水文条件

2.1 地质条件

天湖地段位于新疆维吾尔自治区哈密市，该区处于哈密盆地边缘地带，地处人烟稀少的戈壁荒漠区。地质调查结果表明，天湖地段地表岩性单一，岩性主要为花岗岩，呈大面积岩基广泛发育(见图1和2)，天湖地段岩体深部地质特征的确定主要通过钻孔电视。通过对天湖钻孔岩芯的系统观察和对比分析得出，天湖深部岩体岩性单一，主要为花岗闪长岩。这些是天湖地段作为高放废物处置场址的有利地质条件。

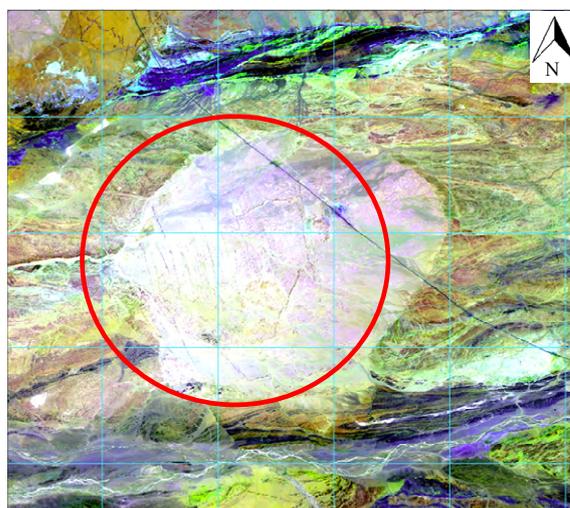


图1 天湖岩体范围

Fig.1 Range of Tianhu rock



图2 天湖岩体地貌

Fig.2 Physiognomy of Tianhu rock

2.2 水文条件

天湖地段气候干旱，降水稀少，蒸发强烈，年降水量只有22.5~30.3 mm。该地段地下水主要源自当地大气降雨入渗来补给，由于降水量不足，区内地下水资源相对贫乏。天湖地段地面地质调查发现，该地段内有几条构造均未延伸到岩体内，无活动迹

象，可以认为岩体内无导水构造发育。天湖地段独特的水文地质环境是作为高放废物处置场址的优势条件。

3 钻孔裂隙几何参数统计及分析

1978年，国际岩石力学学会实验室建议使用10个参数来描述岩体结构面，其中包括结构面产状、间距(密集程度)、延续性(迹长)、粗糙程度、起伏度、充填情况和组数等。对于地下岩体渗透张量计算而言，产状影响裂隙岩体渗透方向，间距和隙宽控制裂隙岩体渗透性大小，粗糙度对岩体渗透性也有一定影响。因此利用钻孔电视调查的裂隙几何参数主要包括裂隙产状、间距、隙宽和粗糙度。

3.1 钻孔岩体均质区划分

岩体中裂隙空间分布具有随机性、不均匀性和组合复杂性，因此在进行裂隙分布特征分析之前，确定裂隙的空间变化规律、划分岩体相似区域是非常重要的工作。针对岩体均质区划分，国内外已有成熟的划分方法，但大多数都是建立在地表露头的基础上，对于纵向区域，如钻孔、隧道，连续性是其最大的特点，因此纵向均质区划分方法也有其特殊性。在钻孔中，裂隙空间分布的密集程度是天然的，容易计算，裂隙的产状通过钻孔电视可以准确获得，因此采用以密度和产状为依据的均质区划分方法是比较合理的。

针对以产状为依据的均质区划分方法，M. Stanley 和 A. Miller^[7]的方法是最普遍的一种方法，即采用概率论中的列联表和施密特等面积投影网结合的办法，利用卡方检验分析相关性来进行岩体结构均质区划分。表1给出了天湖钻孔相邻区间卡方检验的结果，由此可以将天湖钻孔划分为[0 m, 90 m]，[120 m, 240 m]，[270 m, 360 m]和[390 m, 600 m]共4个均质区。

针对以密度为依据的均质区划分方法，对钻孔来说，只需要对上、下相邻区域比较，但是区域划分过长可能忽略变化的细节，而过短则可能因为数据不够而不能进行有意义的划分。因此选择重叠窗口的方法来解决上述问题，该方法的关键是窗口宽度和窗口步距的确定^[8]。

图3给出了不同窗口宽度和步距的天湖钻孔密度分布图，可以看出，天湖钻孔有[90 m, 120 m]，[240 m, 270 m]和[360 m, 390 m]三个裂隙发育区(破碎带)，其余区段是均质区。

表1 相邻区间卡方检验结果表

Table 1 Chi-square test results for adjacent interval

区间/m	自由度	显著水平	临界卡方值	卡方值	是否为均质区
[0, 30]与[30, 60]	9	0.05	16.919	14.25	是
[30, 60]与[60, 90]	8	0.05	15.507	13.42	是
[60, 90]与[90, 120]	8	0.05	15.507	22.38	否
[90, 120]与[120, 150]	9	0.05	16.919	18.52	否
[120, 150]与[150, 180]	7	0.05	14.067	12.93	是
[150, 180]与[180, 210]	8	0.05	15.507	13.71	是
[180, 210]与[210, 240]	9	0.05	16.919	14.86	是
[210, 240]与[240, 270]	9	0.05	16.919	23.59	否
[240, 270]与[270, 300]	8	0.05	15.507	18.36	否
[270, 300]与[300, 330]	9	0.05	16.919	10.64	是
[300, 330]与[330, 360]	9	0.05	16.919	15.42	是
[330, 360]与[360, 390]	8	0.05	15.507	22.69	否
[360, 390]与[390, 420]	9	0.05	16.919	19.63	否
[390, 420]与[420, 450]	7	0.05	14.067	12.43	是
[420, 450]与[450, 480]	8	0.05	15.507	14.17	是
[450, 480]与[480, 510]	9	0.05	16.919	15.73	是
[480, 510]与[510, 540]	8	0.05	15.507	12.94	是
[510, 540]与[540, 570]	9	0.05	16.919	14.79	是
[540, 570]与[570, 600]	9	0.05	16.919	13.28	是

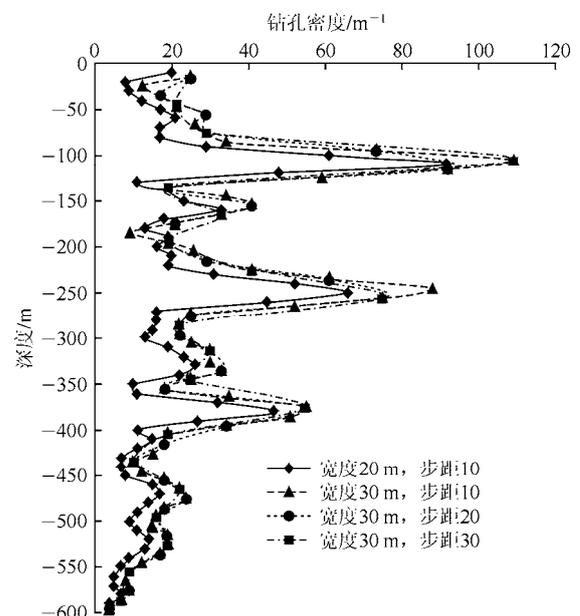


图3 不同窗口宽度和步距的天湖钻孔密度分布图

Fig.3 Drilling density distributions under different window widths and paces at Tianhu

图4为裂隙产状随深度变化的散点图。结合以密度和产状为依据的天湖钻孔均质区划分结果，将天湖钻孔划分为[0 m, 90 m]，[120 m, 240 m]，[270 m, 360 m]和[390 m, 600 m]四个均质区(分别用I，II，

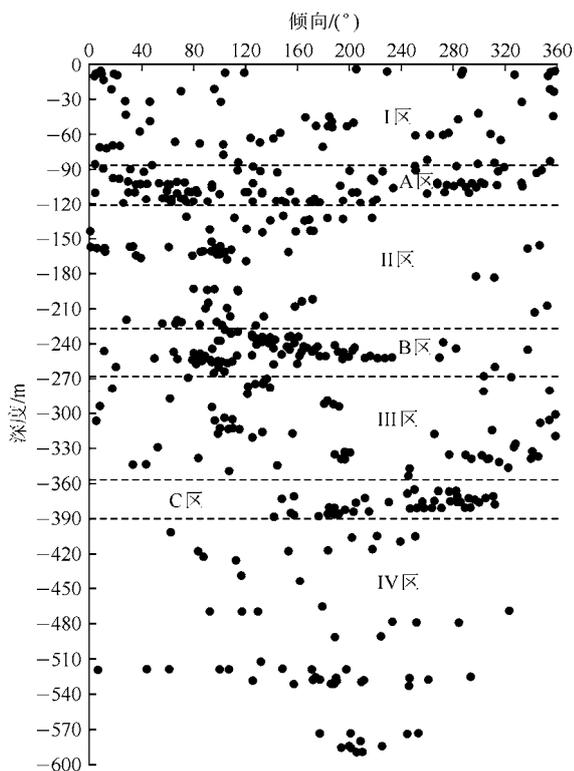


图 4 裂隙产状随钻孔深度变化散点图
Fig.4 Scatterplot of fracture occurrence variation with drilling depth

III 和 IV 区表示)和[90 m, 120 m], [240 m, 270 m]和[360 m, 390 m]三个破碎带(分别用 A, B 和 C 区表示)。

3.2 钻孔裂隙产状统计

由于钻孔裂隙主要表现为节理，故本次调查的主要对象是节理。节理是岩体在特定的地质环境和构造应力场作用下的产物，在特定的应力条件下，节理产状的空间分布具有统计规律。

在节理产状统计方面，主要是根据节理产状图解(如产状玫瑰花图、等角度或等面积散点图和等密度图)进行优势组划分。此方法操作简单，但要求数据样本足够多，否则导致统计结果误差较大。田开铭和万力^[9]从聚类分析的基本原理出发，提出进行节理分组的方法，可以有效避免样本数量的影响。本次采用聚类分析法，利用统计分析软件(SPSS)对天湖钻孔进行节理产状统计，得到天湖钻孔全孔节理倾向和倾角的优势组(见表 2)。

从表 2 可知，天湖钻孔均质区中岩体主要发育有 NNE 和 NWW 向 2 个节理组，随着深度的增加，NNE 向节理组密度迅速衰减，倾角由倾斜变为缓倾斜，而 NWW 向节理组密度衰减缓慢，倾角始终为缓倾斜。这主要是由于天湖岩体所处构造应力场为主压应力为近 10°，主张应力为近 100°，岩体整体上呈南北向压缩，东西向拉伸。天湖钻孔破碎带中

表 2 天湖钻孔节理优势产状
Table 2 Drilling advantage occurrence at Tianhu

区带	深度/m	优势组 编号	优势产状		密度/m	走向	
			倾向/(°)	倾角/(°)			
均质区	0 ~ 100	1	19.55	39.28	0.21	NWW	
		2	121.72	40.66	0.28	NE	
		3	227.84	37.72	0.24	NW	
		4	328.53	37.38	0.19	NE	
	120 ~ 240	1	12.40	24.79	0.30	NWW	
		2	123.22	48.04	0.60	NE	
	260 ~ 370	1	113.11	57.15	0.27	NNE	
		2	239.84	45.22	0.22	NNW	
	390 ~ 600	3	330.72	27.05	0.18	NEE	
		1	115.12	17.17	0.09	NNE	
	破碎带	100 ~ 120	2	206.84	18.41	0.17	NWW
			1	18.22	13.21	1.10	NWW
240 ~ 260		2	101.17	23.98	1.80	NNE	
		3	215.79	17.54	0.90	NW	
370 ~ 390		4	300.12	43.68	0.50	NNE	
		1	1.67	7.77	0.35	W-E	
240 ~ 260		2	110.37	67.26	1.70	NNE	
		3	200.97	57.67	1.15	NWW	
370 ~ 390		1	171.10	54.05	0.55	NEE	
		2	259.59	18.48	1.25	NNW	

岩体节理分布密集，节理空间相对复杂，这主要是由于岩体局部应力集中导致的。岩体破碎带是主要导水媒介，在进行裂隙岩体渗透特征分析中应重点考虑；在岩体均质区中，缓倾斜节理是主要导水通道，因此应对 NWW 向节理组进行详细分析。

3.3 钻孔裂隙间距

裂隙间距是指同一组裂隙相邻裂隙之间的垂直距离，它的大小往往反映了岩体的完整性和块体的大小，是岩体质量的重要指标。由于岩性、多期构造运动迭加、应力不均匀分布和岩层厚度等多种因素综合作用影响，使裂隙间距分布十分复杂。因此，在统计分析时，首先要研究裂隙间距的地质规律及其形成机制，然后在此基础上建立起有效的数理统计模型，这样才能更真实地反映结构面间距特征。

对于钻孔，裂隙间距通过几何分析得到。根据钻孔电视测量数据，可得裂隙间距与区段深度的关系(见图 5)：

$$d = h \cos \alpha / n \tag{1}$$

式中： d 为裂隙间距， h 为区段深度， α 为裂隙优势产状的平均倾角， n 为优势组裂隙条数。

由式(1)获得的裂隙间距并不能反映真实的情况，存在对小裂纹和大间距未测形成的误差，因此

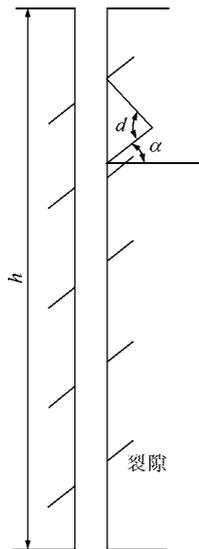


图 5 裂隙间距与钻孔深度关系

Fig.5 Relationship between fracture interval and drilling depth

需要对钻孔裂隙间距进行校正。针对大间距值未测引起的误差，主要与测线 L 的长度有关，在钻孔中假设钻孔轴线为测线，由于测线足够长，大间距引起的截尾误差可以忽略。针对未测量小裂纹的影响，做如下讨论和校正。

假设裂隙迹长服从负指数分布，则在迹长区间 $[l, l+d]$ 内裂隙数应为

$$dN = Nf(l)dl = N\mu e^{-\mu l} dl \quad (2)$$

式中： μ 为裂隙平均间距的倒数， N 为全部裂隙数， $f(l)$ 为裂隙迹长分布函数。

对 dN 做全区间积分可得到 N ，但是由于 $l < l_0$ (其中， $l_0 = C / \cos \alpha$ ， C 为钻孔直径，取 0.8 m) 的裂隙未测量，则所得的裂隙数为

$$N' = \int_{l_0}^{\infty} dN \quad (3)$$

式中： N' 为实际测量裂隙数。

将式(2)代入式(3)得

$$N' = Ne^{-\mu l_0} \quad (4)$$

由式(4)可得裂隙真实间距 D 与裂隙间距 d 的关系为

$$D = de^{-\mu l_0} \quad (5)$$

由式(5)和(1)可得

$$D = h \cos \alpha e^{-\mu C / \cos \alpha} / n \quad (6)$$

根据式(6)得出天湖钻孔裂隙真实间距如表 3 所示。由表 3 可以看出，NNE 和 NW 向节理组裂隙间距整体随深度增加呈增大趋势，NNE 向节理组在某些区段裂隙间距突然减小，这可能是由于局部应

表 3 天湖钻孔全孔裂隙真实间距

Table 3 Real interval of apertures in drilling holes at Tianhu

深度/m	优势组编号	条数	倾角/(°)	裂隙测量间距/m	裂隙真实间距/m
0 ~ 100	1	21	39.28	3.69	2.78
	2	28	40.66	2.71	1.84
	3	24	37.72	3.30	2.42
	4	19	37.38	4.18	3.29
120 ~ 240	1	36	24.79	3.03	2.26
	2	72	48.04	1.11	0.38
260 ~ 370	1	27	57.15	2.21	1.13
	2	22	45.22	3.52	2.55
	3	18	27.05	5.44	4.61
390 ~ 600	1	17	17.17	11.80	10.99
	2	34	18.41	5.86	5.08
100 ~ 120	1	22	13.21	0.89	0.35
	2	36	23.98	0.51	0.09
	3	18	17.54	1.06	0.48
	4	10	43.68	1.45	0.67
240 ~ 260	1	7	7.77	2.83	2.13
	2	34	67.26	0.23	0.01
	3	23	57.67	0.47	0.02
370 ~ 390	1	11	54.05	1.07	0.30
	2	25	18.48	0.76	0.25

力集中导致的。2 组节理在 400 ~ 600 m 区段裂隙间距明显大于 400 m 以上区段，这主要是由于随深度增加垂直应力变为最大主应力，部分裂隙发生闭合所致。在对岩体进行渗透特征分析时，400 ~ 600 m 区段裂隙发育程度低，岩体相对完整，渗透性较差。因此，400 ~ 600 m 区段可以认为是高放废物比较合适的处置深度。破碎带裂隙间距密集，某些节理组甚至是很密集，是地下水主要通道，因此在高放废物处置地下工程中应尽量避免开破碎带。

3.4 钻孔裂隙有效水力隙宽

裂隙隙宽是指张开裂隙两壁之间的垂直距离。现有裂隙隙宽的调查主要是使用塞尺和游标卡尺来测量，或利用图像解译软件对钻孔电视图像进行统计。本文主要研究钻孔电视图像解译来获得裂隙隙宽。在统计隙宽时，通常将图像放大到最大比例尺，这无疑会扩大裂隙隙宽，同时受机械扰动的影响，裂隙表面上的充填物丢失后，沿裂隙两侧会出现小的破碎，尤其是在靠近孔壁内的一侧，这种现象会比较普遍，且破碎程度也严重一些，从而会造成隙宽扩大^[10]。图像解译法获得了裂隙平均隙宽，而在计算渗透流量时，应采用水力隙宽，因此需要对平均隙宽和水力隙宽的关系进行研究。

D. T. Snow^[11]提出了等效水力隙宽，通过试验方法获得实测渗流量，然后利用立方定律反求隙宽，即为等效水力隙宽。该方法主要是使用现场压水试验值，一般钻孔直径比较小，隙宽值受钻孔大小和位置的影响，求得的隙宽是各向同性的。同时，后期在利用压水试验取得的平均渗透系数值来修正裂隙几何测量法(利用等效水力隙宽计算)取得的渗透张量时，修正系数间接忽略了隙宽的影响。N. Barton^[12-13]采用有效水力隙宽(e)来计算渗透张量，并给出了计算公式：

$$e = \frac{E^2}{JRC^{2.5}} \quad (7)$$

式中： E 为裂隙平均隙宽； JRC 为裂隙粗糙度，取值 0~20。

裂隙是在特定应力条件下产生的，按照其力学成因，可将其分为剪节理(J)和张节理(Z) 2 种，不同节理裂隙粗糙度和隙宽差别较大。对张性节理，节理沿岩石粒间扩展贯通，壁面粗糙不平，张开度较大，且随深度增加迅速减小，剪节理则壁面平整光滑，张开度较小，随深度衰减缓慢。殷黎明^[14]进行了不同取样长度下剪节理和张节理 JRC 值研究，发现张节理 JRC 大约为剪节理的 1.24 倍。根据国际岩石力学学会对结构面粗糙程度的描述，假定剪节理 JRC 值约为 8，张节理 JRC 值约为 10。

现有测试技术表明，裂隙平均隙宽(张开度)的下限是 10^{-3} mm，地下裂隙张开度一般在几十微米级别。周创兵等^[15]根据含贯通节理的花岗岩岩样压缩变形特征，确定节理的平均力学张开度为 75 μm 。伯尔布斯基等曾证明，在张开度为 0.25 μm 的裂隙中，液体运动仍遵循达西定律。因此可以用测量平均隙宽值计算渗透张量。裂隙是在特定应力作用形成的，裂隙隙宽与应力状态相关，徐光黎^[16]根据裂隙的法向变形性质，得出在某一应力场作用下，应力与隙宽的关系式：

$$E = E_0 - \sigma_{ij} n_i n_j / R_n \quad (8)$$

式中： E_0 为初始隙宽， σ_{ij} 为有效应力张量， R_n 为裂隙法向刚度， n_i 为 i 方向法向矢量方向余弦， n_j 为 j 方向法向矢量方向余弦。

根据式(8)，徐光黎^[16]还推导了裂隙隙宽随深度的变化关系式：

$$E = E_0 - mz/(n+z) \quad (9)$$

式中： z 为钻孔深度； m, n 均为与岩石有关的常数。

针对花岗岩，徐光黎^[16]给出了 m 和 n 分别为

200 和 20， E_0 取值假定为 200 μm 。对于张节理来说，由于其随深度增加隙宽迅速减小，可以采用式(9)计算，而剪节理隙宽随深度衰减慢，隙宽可以认为是常数，在 400~600 m 时岩体垂直应力为最大主应力，可以认为张节理和剪节理平均隙宽基本相同。

天湖岩体所处构造应力场为主压应力为近 10° ，主张应力为近 100° ，岩体整体上呈南北向压缩，东西向拉伸。钻孔岩体中主要发育有 NNE 和 NWW 向 2 个节理组，可以认为 NNE 向为张节理，NWW 向为剪节理(见图 6)。根据上述结论可以得出天湖钻孔有效水力隙宽(见表 4)。

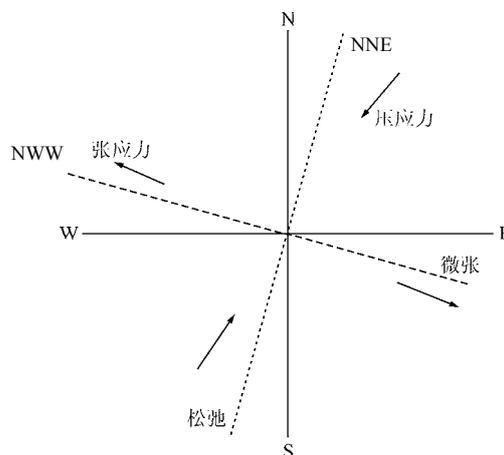


图 6 裂隙力学性质示意图

Fig.6 Sketch of mechanical properties of fractures

表 4 天湖钻孔有效水力隙宽

Table 4 Effective hydraulic opening in drilling hole at Tianhu

深度/m	优势组编号	节理类型	平均隙宽/ μm	有效水力隙宽/ μm
0~100	1	J	27	4.03
	2	Z	71	15.94
	3	J	27	4.03
	4	Z	71	15.94
120~240	1	J	27	4.03
	2	Z	38	4.57
260~370	1	Z	31	3.04
	2	J	27	4.03
	3	Z	31	3.04
390~600	1	Z	27	2.31
	2	J	27	4.03
100~120	1	J	27	4.03
	2	Z	48	7.29
	3	J	27	4.03
	4	Z	48	7.29
240~260	1	J	27	4.03
	2	Z	33	3.44
	3	J	27	4.03
370~390	1	J	27	4.03
	2	Z	29	2.66

4 钻孔岩体渗透张量计算

裂隙介质的渗透性几乎全部取决于裂隙系统的渗透空间结构，因此在研究裂隙介质渗透特征时，只需要建立单纯裂隙的介质模型^[9]。渗透张量的概念首先是 D. T. Snow^[2]以单裂隙地下水运动的立方定律为基础提出的，其研究考虑了岩体中裂隙产状、隙宽和隙间距等几何要素，提出了渗透率张量的概念，并运用裂隙的几何要素的测量值计算裂隙渗透率张量。假设岩体渗透性可叠加，可以得出裂隙岩体渗透张量的求解公式^[4, 17]：

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n K_{ei} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \cos^2 \beta_i \sin^2 \gamma_i & -\sin \beta_i \cdot \cos \beta_i \sin^2 \gamma_i & -\cos \beta_i \sin \gamma_i \cos \gamma_i \\ -\sin \beta_i \cos \beta_i \sin^2 \gamma_i & 1 - \sin^2 \beta_i \cdot \sin^2 \gamma_i & -\sin \beta_i \sin \gamma_i \cos \gamma_i \\ -\cos \beta_i \sin \gamma_i \cos \gamma_i & -\sin \beta_i \cdot \sin \gamma_i \cos \gamma_i & 1 - \cos^2 \gamma_i \end{bmatrix} \quad (10a)$$

$$K_{ei} = \frac{ge^3}{12\nu_w D} \quad (10b)$$

式中： K_i 为第*i*组裂隙渗透张量， β_i 为第*i*组裂隙倾向， γ_i 为第*i*组裂隙倾角， ν_w 为运动黏滞系数， g 为重力加速度。

根据钻孔电视获得的裂隙几何参数，利用课题组编制的渗透张量计算程序，计算出天湖钻孔岩体渗透张量，如表 5 所示。

对渗透张量 K 求其特征值和特征向量，即可得到裂隙岩体的渗透系数张量主值(K_1, K_2, K_3)及渗透主方向，取 3 个渗透系数主值的几何平均值作为综合渗透系数 k_0 (见表 5)：

$$k_0 = \sqrt[3]{K_1 K_2 K_3} \quad (11)$$

图 7 给出了 k_0 随深度变化的散点图，从图 7 和表 5 可以看出，钻孔岩体渗透性大小随深度的增加呈递减趋势。这是因为地应力随深度增加而增加，而地应力增加引起裂隙开度的减小甚至闭合，从而导致裂隙间距变大而平均隙宽变小，又由于岩体渗透性大小主要受间距和隙宽影响，因此呈现出这种变化趋势。岩体主渗透方向由 NWW 向转为 NNE

表 5 天湖钻孔岩体渗透张量
Table 5 Permeability tensors of drilling rock mass at Tianhu

深度/m	渗透张量值/(m·s ⁻¹)	渗透系数主值/(m·s ⁻¹)	主渗透方向		k_0 /(m·s ⁻¹)		
			倾向/(°)	倾角/(°)			
0 ~ 100	1.52×10 ⁻⁹	6.45×10 ⁻¹⁰	6.70×10 ⁻¹¹	2.16×10 ⁻¹⁰ (K_1)	330.7	48.4	8.4×10 ⁻¹⁰
	6.45×10 ⁻¹⁰	1.41×10 ⁻⁹	-6.43×10 ⁻¹⁰	1.23×10 ⁻⁹ (K_2)	118.3	36.8	
	6.70×10 ⁻¹¹	-6.43×10 ⁻¹⁰	7.42×10 ⁻¹⁰	2.23×10 ⁻⁹ (K_3)	221.1	16.5	
120 ~ 240	1.24×10 ⁻¹⁰	6.67×10 ⁻¹¹	6.18×10 ⁻¹¹	6.98×10 ⁻¹¹ (K_1)	325.6	41.3	1.3×10 ⁻¹⁰
	6.67×10 ⁻¹¹	9.65×10 ⁻¹¹	-1.14×10 ⁻¹⁰	1.65×10 ⁻¹⁰ (K_2)	80.6	25.7	
	6.18×10 ⁻¹¹	-1.14×10 ⁻¹⁰	7.64×10 ⁻¹¹	2.02×10 ⁻¹⁰ (K_3)	192.6	37.8	
260 ~ 370	2.51×10 ⁻¹¹	1.16×10 ⁻¹²	8.87×10 ⁻¹²	1.03×10 ⁻¹¹ (K_1)	247.2	57.7	1.7×10 ⁻¹¹
	1.16×10 ⁻¹²	1.61×10 ⁻¹¹	2.08×10 ⁻¹²	1.60×10 ⁻¹¹ (K_2)	346.0	6.0	
	8.87×10 ⁻¹²	2.08×10 ⁻¹²	1.60×10 ⁻¹¹	3.08×10 ⁻¹¹ (K_3)	80.5	31.6	
390 ~ 600	6.61×10 ⁻¹²	-4.89×10 ⁻¹³	3.65×10 ⁻¹²	-1.33×10 ⁻¹² (K_1)	246.4	62.7	4.3×10 ⁻¹²
	-4.89×10 ⁻¹³	6.97×10 ⁻¹²	1.48×10 ⁻¹²	7.22×10 ⁻¹² (K_2)	346.6	5.2	
	3.65×10 ⁻¹²	1.48×10 ⁻¹²	7.05×10 ⁻¹³	8.39×10 ⁻¹² (K_3)	79.3	26.7	
100 ~ 120	2.66×10 ⁻⁸	2.58×10 ⁻⁹	1.65×10 ⁻⁹	-2.54×10 ⁻⁹ (K_1)	349.3	60.4	1.3×10 ⁻⁸
	2.58×10 ⁻⁹	6.97×10 ⁻¹²	-1.37×10 ⁻⁸	2.63×10 ⁻⁸ (K_2)	106.3	14.5	
	1.65×10 ⁻⁹	-1.37×10 ⁻⁸	5.28×10 ⁻⁹	3.06×10 ⁻⁸ (K_3)	203.3	25.2	
240 ~ 260	3.62×10 ⁻⁹	3.81×10 ⁻⁹	1.64×10 ⁻⁹	1.21×10 ⁻⁹ (K_1)	308.1	45.5	3.6×10 ⁻⁹
	3.81×10 ⁻⁹	3.16×10 ⁻⁹	-8.87×10 ⁻⁹	3.56×10 ⁻⁹ (K_2)	204.7	12.8	
	1.64×10 ⁻⁹	-8.87×10 ⁻⁹	3.02×10 ⁻⁹	5.03×10 ⁻⁹ (K_3)	103.0	41.7	
370 ~ 390	7.92×10 ⁻¹⁰	2.09×10 ⁻¹⁰	1.09×10 ⁻⁹	-3.12×10 ⁻¹⁰ (K_1)	274.6	44.9	9.4×10 ⁻¹⁰
	2.09×10 ⁻¹⁰	1.45×10 ⁻⁹	6.85×10 ⁻¹¹	1.38×10 ⁻⁹ (K_2)	166.3	17.4	
	1.09×10 ⁻⁹	6.85×10 ⁻¹¹	7.68×10 ⁻¹⁰	1.95×10 ⁻⁹ (K_3)	61.1	39.9	

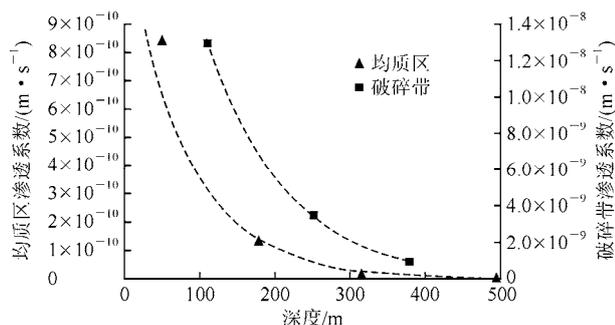


图7 渗透系数随钻孔深度变化散点图

Fig.7 Coefficient of permeability varied with drilling depth

向，这是由于剪节理和张节理的力学成因导致其对渗透性的影响程度不同。破碎带的渗透性为均质区的1~2个数量级，这是因为破碎带裂隙分布密集，连通率和导水性好。

通过非线性回归可以得出岩体渗透性与钻孔深度基本呈负指数关系，这与殷黎明等^[6]的研究结果相符。由图7可知，在400 m以下可以认为岩体渗透性保持不变，因此高放废物处置库的埋深应在400 m以下，这与国际处置库的埋深要求500~700 m基本相符。

5 讨论与结论

针对高放废物地质处置工程中，确定裂隙岩体渗透性的重要性，本文在钻孔电视获得裂隙几何参数的基础上，对裂隙几何参数的统计方法和计算公式进行了研究，并将其应用到天湖钻孔岩体渗透性分析中。取得如下的研究成果：

(1) 以产状为依据的均质区划分主要采用Miller法，以密度为依据的均质区划分采用重叠窗口法对相邻区域进行密度统计来确定；最后结合钻孔岩体裂隙发育情况，将天湖钻孔划分为4个均质区和3个破碎带。

(2) 为了避免由于样本数量不足而引起的统计误差，采用聚类方法对裂隙产状进行统计。考虑了未测量小裂纹引起的裂隙间距误差，提出了裂隙间距计算的修正公式；采用裂隙有效水力隙宽来表征隙宽，给出了裂隙有效水力隙宽与裂隙粗糙度和平均隙宽的关系，按力学成因对裂隙分类来统计裂隙平均隙宽和粗糙度。

(3) 将获得的裂隙产状、间距和隙宽这些几何

参数代入渗透张量计算程序中，得到天湖钻孔岩体的渗透张量以及渗透主值和主渗透方向，为钻孔岩体渗透性分析提供依据。

采用测量法获得的裂隙岩体渗透系数，构成一个三维渗透系数张量场，准确地刻画岩体的渗透特性，为高放废物处置库设计中岩体渗流场分析提供重要参数。但是本文渗透系数的计算都是以理论研究为依托，并没有与现场试验结果比较，因此，有必要将地下水位观测资料和压水试验数据与统计学方法相结合来对裂隙岩体渗透性的各向异性特征做进一步研究。

参考文献(References)：

- [1] 仵彦卿. 岩体水力学基础(七)——岩体水力学参数的确定方法[J]. 水文地质工程地质, 1998, (2): 44-50. (WU Yanqing. Rock mass hydraulics(7)—a determination method of rock mass hydraulics parameters[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, (2): 44-50. (in Chinese))
- [2] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [3] 许模. 岩体水力学参数的确定方法[M]. 成都: 成都理工大学, 2007: 44-50. (XU Mo. A determination method of rock mass hydraulics parameters[M]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007: 44-50. (in Chinese))
- [4] 王贵宾. 岩体节理三维模拟及渗透张量分析[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006. (WANG Guibin. Three-dimensional simulation of rock joints and permeability tensor analysis[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese academy of sciences, 2006. (in Chinese))
- [5] 马峰, 陈刚, 胡成, 等. 利用钻孔成像研究基岩地区的渗透张量变化规律[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 496-500. (MA Feng, CHEN Gang, HU Cheng, et al. Change of permeability tensors in fractured rock mass based on intelligent drillhole optical imager[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 496-500. (in Chinese))
- [6] 殷黎明, 杨春和, 王贵宾. 地下工程裂隙岩体渗透张量计算分析[J]. 矿业研究与开发, 2009, (1): 18-19. (YIN Liming, YANG Chunhe, WANG Guibin. Seepage tensor calculation of fractured rock-mass for underground engineering[J]. Mining Research and Development, 2009, (1): 18-19. (in Chinese))
- [7] STANLEY M, MILLER A. statistical method to evaluate homogeneity

- of structural populations[J]. *Mathematical Geology*, 1983, 15(2): 317–328.
- [8] 范留明, 黄润秋, 丁秀美. 一种基于结构面密度的岩体结构均质区划分方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): 1132–1136. (FAN Liuming, HUANG Runqiu, DING Xiumei. Analysis on structural homogeneity of rock mass based on discontinuity density[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1132–1136. (in Chinese))
- [9] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989: 32. (TIAN Kaiming, WAN Li. Research and evaluation of anisotropic permeability fractured medium[M]. Beijing: Academy Press, 1989: 32. (in Chinese))
- [10] 王锡勇, 苏锐, 陈亮, 等. 基于超声波钻孔电视的深部岩体结构面特征研究[J]. *世界核地质科学*, 2014, (1): 39–44. (WANG Xiyong, SU Rui, CHEN Liang, et al. Study on structural plane characteristics of deep rock mass based on acoustic borehole TV[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2014, (1): 39–44. (in Chinese))
- [11] SNOW D T. A parallel plate model of fractured permeable media[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1965.
- [12] BARTON N. The theory behind high pressure grouting-part 1[J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 2004, 36(9): 28–30.
- [13] BARTON N. The theory behind high pressure grouting-Part 2[J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 2004, 36(10): 33–35.
- [14] 殷黎明. 甘肃北山花岗岩节理水力、力学特性研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008. (YIN Liming. Research of Gansu Beishan granite joint hydraulic and mechanical characteristics[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))
- [15] 周创兵, 叶自桐, 何炬林, 等. 岩石节理张开度的概率模型与随机模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(3): 267–272. (ZHOU Chuangbing, YE Zitong, HE Julin, et al. Probability models and stochastic simulation of rock joints opening[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 267–272. (in Chinese))
- [16] 徐光黎. 节理张开度水力学分析[J]. *勘察科学技术*, 1993, (2): 3–6. (XU Guangli. Hydraulic analysis of the joint aperture[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1993, (2): 3–6. (in Chinese))
- [17] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 2004: 25–40. (ZHOU Zhifang, WANG Jinguo. Fissure medium hydrodynamics[M]. Beijing: Water and Power Press, 2004: 25–40. (in Chinese))

本刊 2015 年第 4, 5, 6, 7 期被 EI COMPENDEX 分别 收录 24, 23, 23, 23 篇(100%收录)

据“EI 中国”公布的数据显示, 本刊 2015 年第 34 卷 4, 5, 6, 7 期分别发表论文 24, 23, 23, 23 篇, 被 EI COMPENDEX 收录论文共 93 篇, 收录率为 100%。

(摘自“EI 中国”)

2015 年 8 月 20 日