

泥质岩膨胀势判断及其破坏机理分析*

李曼 曲永新 秦四清 冶小平 孙强 马平

(中国科学院工程地质力学重点实验室 北京 100029)

摘要 应用曲永新提出的“不规则岩块干燥饱和吸水率判别法”和成岩胶结系数指标法,对山西某一煤矿巷道中泥质岩的膨胀性进行综合判定,其属于非膨胀性泥质岩。并对巷道中岩样的矿物组成成分进行分析,岩石中石英和铁矿的含量较多,且分布极不均匀,所含粘土矿物主要为高岭石。最后,从岩石的矿物组成、结构构造、节理面及微节理面的特征以及岩石在受压力时裂隙的扩张情况等角度,综合分析得出泥质岩以脆性破坏为主。

关键词 泥质岩 胶结系数 膨胀性 脆性破坏 节理面

中图分类号:P642.13 文献标识码:A

CRITERIA OF SWELLING POTENTIAL AND ANALYSIS ON FAILURE MECHANISM FOR MUD ROCK

LI Man QU Yongxin QIN Siqing YE Xiaoping SUN Qiang MA Ping

(Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract This paper adopts the two methods: water absorption of irregular rock in both dry and saturated conditions and cemented coefficient of rock, proposed by Qu Yongxin, to study the swelling potential of mud rock. The mud rock is in some tunnel coal mine in Shanxi. The results show that the mud rock does not swell. On the other hand, the paper examines the mineral composition of the mud rock. It is found that the mud rock has much, non-uniform distributed quartz and iron, as well as kaolinite. The kaolinite is the main clay mineral. The mud rock shows brittle failure when it is compressed under uniaxial and triaxial tests with low confining pressure. Finally, the paper introduces several factors influencing the failure of rock. The factors include mineral composition, configuration and conformation, characteristic of joint or tiny joint surface and extension cranny in rock.

Key words Mud rock, Cemented coefficient, Swelling, Brittle failure, Joint surface, Tunneling

1 引言

山西某煤矿巷道开挖过程中,遇到的岩性主要为泥质岩或条带状砂质泥岩。在一般情况下,泥岩在含水的环境下具有膨胀性,造成岩石强度值大幅度降低,对工程安全稳定性具有不良影响。因此,本文首先利用曲永新提出的泥质岩膨胀势的“不规则

岩块干燥饱和吸水率判别法”和成岩胶结系数法^[1],从两个角度综合评判煤矿巷道中的泥质岩是否具有膨胀性,以便进行必要的工程处理,防止各种工程问题的发生。同时这对于巷道选择合理的支护形式、保障施工安全,降低工程造价都具有重要的意义。另一方面,目前虽然已有大量文献对岩石的脆性破坏机理进行分析^[9~11],但其侧重点都是讨论岩石脆性破裂时所需满足的破坏准则,并没有详细分

* 收稿日期:2008-04-21;收到修改稿日期:2009-03-04。

第一作者简介:李曼,工程地质、岩土工程专业。Email: digong820@163.com

析制约岩石脆性破裂的主要因素,因此,从微观角度研究岩石脆性破坏的机理很有必要。

2 泥质岩的膨胀势判断

山西某煤矿巷道中的岩石主要是泥质岩或砂质泥岩,利用曲永新提出的泥质岩膨胀势的“不规则岩块干燥饱和吸水率判别方法”和用于工程目的的泥质岩成岩胶结程度的综合定量指标——成岩胶结系数^[1~4](该指标是指破坏了泥质岩结构的岩石粉末($<0.25\text{mm}$)饱和含水率与保持原岩结构的不规则岩块干燥饱和吸水率的比值,其指标的大小综合反映了成岩胶结程度的高低或结构稳定性,其指标越大成岩胶结程度越高,其岩石强度和耐久性也越强),来综合判断该巷道中的泥质岩是否具有膨胀

性。

岩块膨胀势的判别标准:

- (1) 岩块干燥饱和吸水率 $W_{RDW} < 10$, 胶结系数 > 5 , 泥质岩具有非膨胀性;
- (2) 岩块干燥饱和吸水率 $10 \leq W_{RDW} < 50$, 胶结系数 $2 \sim 5$, 泥质岩具有微或弱膨胀性;
- (3) 岩块干燥饱和吸水率 $50 \leq W_{RDW} < 100$, 泥质岩具有强膨胀性;
- (4) 岩块干燥饱和吸水率 $W_{RDW} > 100$, 泥质岩具有剧膨胀性。

根据岩块膨胀势的判别标准,研究巷道内取得的泥质岩,岩块干燥饱和吸水率都小于 10, 胶结系数都大于 5(表 1), 符合条件(1), 因此该煤矿巷道中的泥质岩具有强胶结或极强胶结特性, 属于非膨胀性泥岩。

表 1 某煤矿巷道泥质岩膨胀势判别试验结果

Table 1 The results of potential inflation for the mud rock in some tunnel coal mine

分析号	名称	干燥岩块在水中性状	岩块干燥饱和吸水率/(%)	岩粉吸水率/(%)	胶结系数	工程评价		
						膨胀势	胶结程度	软硬程度/MPa
5436	粉砂质泥岩	碎裂化	3.31	28.18	8.51	非膨胀	强胶结	$10 < R_c \leq 20$
5437	粉砂质泥岩	不破坏	1.59	27.14	16.06	非膨胀	极强胶结	$20 < R_c < 40$
5438	泥质条带粉砂岩	不破坏	1.13	26.51	23.46	非膨胀	极强胶结	$20 < R_c < 40$
5439	粉砂质泥岩	不破坏	1.56	27.90	17.89	非膨胀	极强胶结	$20 < R_c < 40$

注:(1)按岩块干燥饱和吸水率膨胀势判别标准: $<10\%$ 为非膨胀性;

(2)胶结系数也称成岩胶结系数,为岩粉($<0.25\text{mm}$)吸水率与岩块干燥饱和吸水率的比值,数值越大,胶结程度越高,强度和崩解耐久性越大。 $1 \sim 2$ 为弱胶结, $2 \sim 5$ 为中等胶结, $5 \sim 10$ 为强胶结, >10 为极强胶结;

(3)表中岩石强和极强的成岩胶结程度与成岩过程中粘土矿物的重结晶作用及有机质的胶结作用有关;

(4) R_c 代表单轴抗压强度(MPa)

同时又对巷道中岩样碾碎提纯后进行 X-射线衍射定量分析^[5~7]及颗粒组成分析,得到 X 射线衍射谱图和岩样颗粒组成分析结果。将得到的 X 射线衍射图(图 1)与蒙脱石、伊利石、高岭石各个定向样品的 X 射线衍射谱图进行比较,发现该泥质岩中粘土矿物的组成成分主要为高岭石,同时还有少量的伊利石/蒙脱石混层。根据岩样颗粒组成分析结果可知(表 2),伊利石/蒙脱石混层在粘土矿物中的相对含量仅为 5%,占整个泥质岩含量的 0.77%,虽然粘土矿物占泥质岩含量较大,为 15.32%,但主要成分是高岭石。

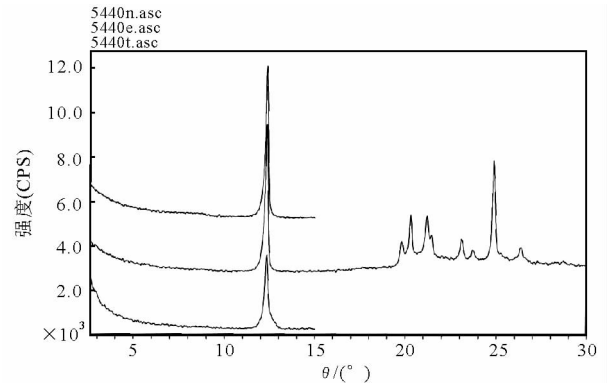


图 1 巷道中粘土矿物 X 射线衍射图

Fig. 1 X-radial diffraction of clay mineral in the tunnel

表2 泥岩颗粒组成及粘土矿物组成 XRD 定量测试结果

Table 2 Quantitative analysis of XRD for gain composition and clay mineral of the mud rock

分析号	名称	地点	颗粒组成/mm%				粘土矿物相对含量		混层比/	粘土矿物绝对含量/(%)		
			>0.25	0.075 ~ 0.25	0.005 ~ 0.075	<0.005	<0.002	I/S	K	I/S	I/S	K
										(%)	(%)	(%)
5436	黑色粉砂质泥岩	西大巷	2.67	42.19	39.83	15.32	11.25	5	95	25	0.77	14.55

注:(1)I/S为伊利石/蒙脱石混层矿物,K为高岭石;

(2)粘土矿物组成鉴定采用<0.002mm提纯样;

(3)粘土矿物相对含量是指不同粘土矿物间的百分含量,绝对含量为各种粘土矿物占整个天然岩石质量的百分数,因而有工程意义;

(4)混层比指混层矿物中蒙脱石在整个混层矿物中百分数,数值越小,性质愈稳定;

(5)巷道泥岩成岩程度炭质(有机质)胶结作用强,粘土矿物为95%非活性高岭石组成,5%混层矿物因含量低,而且混层比也低,对岩石工程性质不起作用;

(6)考虑此泥质岩成岩程度高,粘土矿物的重结晶作用,粘土矿物尺寸上限定为0.005mm

通过上述分析,进一步证实巷道中泥质岩基本没有膨胀性,泥质岩属于非膨胀性泥岩,且属于泥质岩中的硬岩。

3 泥质岩的压缩实验成果

对所研究煤矿巷道中的岩样,进行天然和饱和状态下单轴压缩以及天然状态下的三轴压缩试验,得出其应力应变曲线(图2,图3)。

实验结果表明,巷道中的泥质岩在单轴和围压较低的三轴压缩下,试样的破坏形式为张剪性破坏,以脆性变形破坏为主。

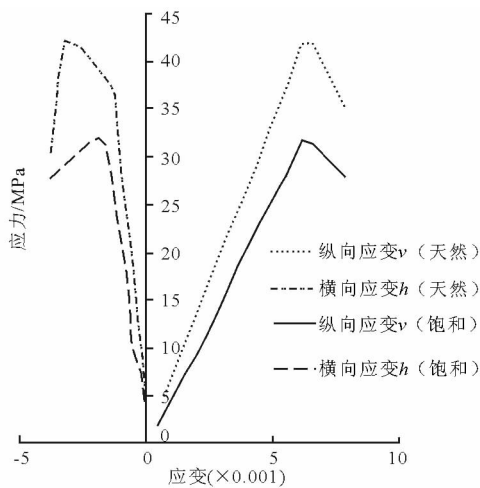


图2 岩样在天然和饱和状态下单轴压缩的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for the mud rock under both nature and saturated conditions of uniaxial pressure

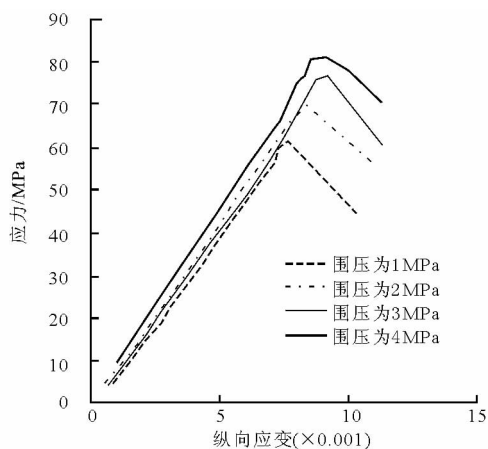


图3 岩样在天然状态下三轴压缩的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves for the mud rock under nature condition of triaxial pressure

4 泥质岩脆性破坏机理分析

影响泥质岩脆性破坏的因素较多,而岩石的胶结程度、矿物组成以及岩石内部节理、裂隙的特征是影响岩石脆性破坏的主要因素。

4.1 岩石的物理力学性质决定岩石的破坏形式

在对巷道中泥质岩膨胀性判断的过程中,测得的泥质岩的成岩胶结系数都大于5,说明岩石的胶结程度很强,在水中的崩解耐久性差,干燥岩样浸水后基本不破坏,有的可能呈碎块状。因此可定性判断该巷道中泥质岩属于硬岩。在岩样的单轴压缩实验中,岩样的饱和单轴抗压强度分别约为31.8MPa、30.5MPa、23.2MPa,且在实验过程中观察到,岩样的单轴压缩,甚至在围压分别为1MPa、2MPa、3MPa、4MPa时三轴压缩时,其破坏形式都为张剪性破坏,这进一步印证煤矿巷道中的泥质岩属于硬岩,变形

破坏以脆性破坏为主。

4.2 岩石中的矿物组成影响岩石的破坏形式

煤矿巷道中的岩石所含的主要矿物为石英、粘土矿物和铁质,它们的含量分布不均匀,形成不规则的条带状,石英含量多的地方,含量可高达 50% ~ 60%,其颗粒大小在 0.18mm 以下,为砂岩-粉砂岩间级别,但绝大部分都在 0.05mm 以下;以粘土矿物为主的地方,石英的含量则很少,在 10% 以下,石英的颗粒也比较小,一般在 0.02mm 以下。同时岩石中铁质的含量也较多,其分布及颗粒大小也极不均匀,从微小颗粒到大的片,主要为褐铁矿和赤铁矿。

由上述可知,岩石中石英和铁矿的含量较多,且极不均匀,而石英和铁矿间的胶结物质——高岭石,胶结系数大,胶结程度高,这就造成了岩石硬度大,破坏时破坏程度剧烈,容易发生脆性破坏。

4.3 岩石颗粒与胶结物界面处的力学效应对岩石破坏形式的影响

岩石既是一种复合材料,又是一种多孔材料,石英和铁矿呈颗粒状,粘土矿物为胶结物,一般情况下,颗粒的强度较胶结物高而且坚实,在胶结物和颗粒的接合面(界面)上,其孔隙率要比其余部分大得多,这种界面也是岩石体积变形过程中最易发生损伤破坏的部位。颗粒的尺寸越大,岩石损伤破坏程度也越大^[8],因而可以认为,胶结物和颗粒的界面上是岩石薄弱的部位(除岩石中存在的微空隙、微裂纹外)。于是可假设一理想模型,用于形象描述岩石在压缩过程中其内部结构损伤破坏的动态过程(图 4),用不规则多变形代表石英、铁矿等颗粒,多边形与多边形之间代表岩石中的胶结物^[8]。

整个模型承受单向压力,压力逐渐增大,首先并行排列的颗粒与颗粒之间的胶结物,与并行的颗粒之间的裂隙逐渐扩展(图 4 中①和②所示)。随后,压力继续增加,垂直方向上排列的颗粒间的胶结物中开始出现裂纹,继续扩展形成宏观裂纹(图 4 中③所示),这两种形式的裂纹都大致与加载方向平行,且基本在一条直线上,因而易于使岩石产生张性破坏。

4.4 岩石中微结构面上小量起伏对岩石破坏形式的影响

泥质岩中的层理及微层理具有小量的起伏,当 σ_1 垂直作用于这些层理面上时,层理面上的这些小量起伏使试件内的应力传递和应力分布发生了变化,这相当于点荷载的作用机理,在岩样的轴向上作用一压力,试样的破坏形式与在岩样周围施加拉力使其破坏的形

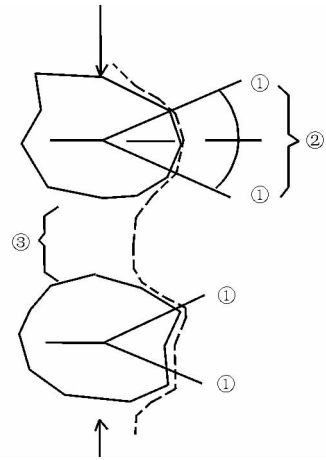


图 4 岩样受压过程中损伤的理想模式

Fig. 4 Ideal damage model of mud rock under pressure

①损伤萌发,以剪切型(Ⅱ型)模式出现微裂纹;②损伤稳定成长,一个方向的压缩引起垂直方向的伸长变形,环绕颗粒以张开型(Ⅰ型)模式发生裂纹;③不稳定扩展和破裂,在基体内以Ⅰ型和Ⅱ型的复合模式发生微裂纹并导致与加载方向大致平行的宏观裂纹

式是等效的,即由于岩样中层理面上的凸起部分的存在,当岩样承受轴向的压力作用时,使层理面上下岩石形成局部楔张应力场而发生微小张裂隙区,这些张裂隙发展、连通,从而使试件呈张剪性破坏。

4.5 岩石中裂纹对破坏形式的影响

在岩石材料中,一开始就存在有格里菲斯裂纹^[9-12],岩石中的格里菲斯裂纹可以由孔隙、空隙、软的或硬的结核或颗粒、颗粒边界等所形成。另外,所取岩样为巷道中爆破后塌落在洞中的岩块,岩样中肯定存在由于爆破作用产生的各种裂纹。在爆破冲击力作用下,容易使岩石中原来就存在的格里菲斯裂纹进一步扩展,或者激发岩石中胶结的层面、微层理面及其他潜在结构面开裂,形成局部的楔张裂隙。

单纯从岩石中存在的裂纹角度来看,当岩石中存在的裂纹延伸方向与压应力作用方向近似平行时,在压应力作用下,裂纹的尖端部位会产生拉应力集中,如果拉应力集中较大,达到材料的抗拉强度,裂纹会开始扩展,在这种情况下,压力继续增大,裂纹迅速扩展,最终可能导致岩石失去控制,产生宏观断裂。如果岩石中存在的裂纹延伸方向与压应力方向小角度相交(图 5),从岩样中沿轴向取出一个包含倾斜裂纹 AB 的“隔离体”,随着轴向压力逐渐增大,在岩样内部会沿裂纹面产生剪切滑移。在剪切滑移面上有正应力 N 和摩擦力 F ,两者沿轴向的合应力小于岩样的轴向应力,否则就不会滑移破坏。

因而在 BG 面上必然存在剪应力以平衡轴向载荷。剪切滑移作用还会产生垂直于轴向的拉力,其大小随该滑移面增大而增大。显然在没有围压或围压很小的压缩过程中,随着剪切滑移面的增大,将会产生沿轴向的张拉破坏。某一拉张破坏面出现之后,其下方(沿滑移面)的岩石材料在轴向的剪切和拉应力将减为零。其后随着剪切面的不断扩大,拉张破坏又将逐个地发生^[13]。因此,当岩石中存在的与压应力方向近似平行或夹角较小的格里菲斯裂纹较多时,岩石很容易产生张剪性破坏。

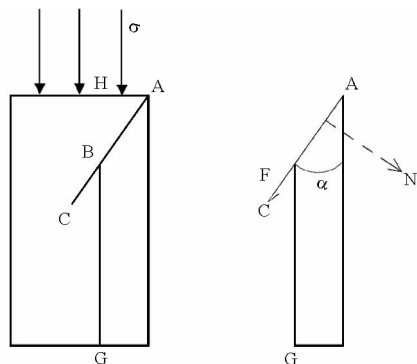


图5 岩样沿轴向拉张破坏机理

Fig. 5 The axial tensile failure mechanism analysis of rock

5 结论

本文讨论了山西某煤矿巷道泥质岩是否具有膨胀性,并针对巷道中泥质岩在单轴压缩和较低围压的三轴压缩下的破坏形式,从岩石的物理力学性质、矿物组成、结构构造、岩石内部节理、裂隙特征以及爆破等角度分析造成岩石脆性破坏的主要原因,但所阐述的影响因素都只是粗略地进行阐述,并没有定量地表征这几个因素对岩石脆性破坏的影响程度,例如,在开挖巷道过程中,只是提到爆破对岩石强度肯定有弱化的影响,但其影响的程度如何以及在岩石强度及破坏方式方面起多大的作用,本文并没有提出合理的参数来进行具体评价分析,因此仍需作进一步的深入研究工作。

参 考 文 献

- [1] 王思敬,黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京:地质出版社,2004.
Wang Sijing, Huang Dingcheng. The Chinese century achievement of engineering geology. Beijing: Geology Press, 2004.
- [2] 张永双,曲永新,周瑞光. 南水北调中线工程上第三系膨胀性硬粘土的工程地质特性研究[J]. 工程地质学报,2002,10(4): 367~377.
Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Zhou Ruiguang. Engineering geological properties of Neogene Hard clay along the middle line of the North-South diversion water project in China. Journal of Engineering Geology, 2002,10(4):367~377.
- [3] 曲永新. 软岩巷道变形破坏的快速工程地质预报[J]. 水文地质工程地质学报,1986,(5):48~53.
Qu Yongxin. The rapid Engineering Geology forecast of soft rock roadway deformation failure. Journal of Hydrogeology and Engineering Geology, 1986,(5):48~53.
- [4] 曲永新,徐晓岚,时梦熊,吴芝兰. 泥质岩的工程分类和膨胀势的快速预测[J]. 水文地质工程地质,1988,(5):36~39.
Qu Yongxin, Xu Xiaolan, Shi Mengxiong, Wu Zhilan. The engineering classification of mud rock and its rapid forecast of swelling power. Journal of Hydrogeology and Engineering Geology, 1988,(5):36~39.
- [5] 曲永新,张永双,冯玉勇,张加桂. 中国膨胀土粘土矿物组成的定量研究[J]. 工程地质学报,2002,10(增刊):416~422.
Qu Yongxin, Zhang Yongshuang, Feng Yuyong, Zhang Jiagui. Quantitative research of clay mineral composition in Chinese expansive soil. Journal of Engineering Geology, 2002,10(supplement):416~422.
- [6] 冯玉勇,张永双,曲永新等. 南昆铁路百色盆地膨胀土路堤病害机理研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):463~467.
Feng Yuyong, Zhang Yongshuang, Qu Yongxin. Mechanism of embankment defects caused by expansive soils in Baise basin, Nankun railway. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(4):463~467.
- [7] 张加桂,曲永新. 三峡库区膨胀土的发现和研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(6):724~727.
Zhang Jiagui, Qu Yongxin. Research on the expansive soils in Three-Gorge reservoir region. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(6):724~727.
- [8] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991.
Lou Zhiwen. Damage mechanics foundation. Xian: Xian Jiaotong University Press, 1991.
- [9] L. 米勒. 岩石力学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1981.
L. Miller. Rock mechanics. Beijing: Coal Industry Press, 1981.
- [10] E. Hock (1968): Brittle failure of rock. Rock Mech. Publ. by Stagg and Zienkiewicz, Ch. 4, S., 1968, 99~124.
- [11] J. C. Jaeger (1966): The brittle fracture of rocks. 8th Symp. Rock Mech, Minnesota, 1966, AIME Proc. 1967.
- [12] W. Wawersik (1968): A detailed analysis of rock failure in laboratory compression tests. PhD thesis, Univ. of M., 1968.
- [13] 陈津民,李树森. 岩石断裂破坏的机理研究[J]. 地球科学进展,2004,19(6):275~278.
Chen Jinmin, Li Shusen. Fracture failure mechanism of rock. Advance in Earth Sciences, 2004,19(6):275~278.