

DOI: 10.11779/CJGE2019S1030

# 云母石英片岩片理面力学特征试验研究

吴福宝

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 云母石英片岩的矿物成分和微观结构决定了其各向异性特征, 通过铸体磨片和电镜扫描试验, 获得了云母石英片岩的矿物组成和微观结构特征; 通过三轴剪切试验, 获得了微风化岩样片理面力学参数; 通过强风化和中风化岩块的点荷载试验, 结合强风化岩样的片理面剪切试验, 得出了强风化和中风化岩样的片理面力学参数; 按照材料力学理论, 采用片理面力学参数计算得出岩样的最小单轴抗压强度, 进而计算出岩样的各向异性系数; 以垂直片理面的抗压强度作为计算依据, 计算出岩样的风化系数, 进而总结出岩样的各向异性系数与风化系数的关系, 揭示了风化过程中片理面力学特征的变化规律。

**关键词:** 云母石英片岩; 微观结构; 三轴剪切试验; 各向异性系数; 风化系数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0117-04

**作者简介:** 吴福宝(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计工作。E-mail: 550234585@qq.com。

## Experimental study on mechanical characteristics of mica quartz schist foliation surface

WU Fu-bao

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Company Limited, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The mineral composition and microstructures of mica quartz schist determine its anisotropic characteristics. The mineral composition and microstructural characteristics of mica quartz schist are obtained by using the casting abrasive test and the scanning electron microscopy. Through the triaxial shear tests, the mechanical parameters of foliation surface of slightly weathered rock samples are obtained. Through the point load tests on strongly weathered and moderately weathered rock blocks, combined with the shear tests on foliation surface of strongly weathered rock samples, the mechanical parameters of schistose plane of strong weathering and medium weathering rock samples are obtained. According to the theory of material mechanics, the minimum uniaxial compressive strength of the rock samples is obtained by calculating the mechanical parameters of foliation surface, and then the anisotropic coefficient of the rock samples is calculated. Based on the compressive strength of vertical foliation surface, the weathering coefficient of the rock samples is calculated, and the relationship between the anisotropy coefficient and the weathering coefficient of the rock samples is summarized, and the variation laws of mechanical characteristics of foliation surface in weathering process are revealed.

**Key words:** mica quartz schist; microstructure; triaxial shear test; anisotropic coefficient; weathering coefficient

## 0 引言

中国东南沿海地区广泛分布云母石英片岩, 路堑边坡工程问题多发, 与片岩具有片理构造、力学性质具有各向异性特征有着密切关系。国内外对云母石英片岩的研究主要针对微风化岩样进行, 在微观结构、力学参数的各向异性等方面取得了一些成果<sup>[1-2]</sup>, 但在风化对片理面强度的影响方面研究少见。研究云母石英片岩片理面特征及风化对云母石英片岩各向异性的影响, 对于分层量化片理面力学参数有着指导作用, 进而对分析路堑边坡的稳定性起到重要作用。

## 1 试验原材料

微风化岩样在福建省厦门至沙县高速公路路堑边坡开挖过程中采取, 在室内进行三轴剪切试验。现场采取强—中风化岩样后, 进行了点荷载试验和强风化岩样片理面便携式直剪试验。全风化层在现场进行便携式直剪试验。微风化岩样物理指标如表1所示。全风化层物理指标试验成果见表2, 试验室定名为含砂粉质黏土<sup>[3]</sup>。

表 1 微风化岩样物理指标

Table 1 Physical indies of micro-weathered rock samples					
风化程度	试件个数	干密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	自由吸水率/%	饱和吸水率/%
微风化	89	2.62	2.64	0.10	0.18

表 2 全风化层试验成果表

Table 2 Test results of total weathering layer				
天然密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
1.66	27.20	42.0	28.3	13.7

2 云母石英片岩微观结构研究

2.1 微观结构试验

本次微观结构试验研究方法有铸体薄片和电镜扫描试验<sup>[4]</sup>。铸体薄片试验显示云母石英片岩呈细粒鳞片粒状变晶结构，显微片状构造，云母定向排列明显。如图 1 所示，电镜扫描试验扫描照片中白色区域为微粒状磁铁矿，在岩体中集合体成不规则团块状或细条带状；深灰色区域为石英，不规则粒状；中灰色区域为云母，细小片状，呈定向分布。岩石镜下岩矿鉴定结果为绢云母石英片岩，石英含量 75%~85%，云母含量 8%~15%，另外含有少量长石、绿泥石、绿帘石、磁铁矿、褐铁矿、黄铁矿等。

2.2 各向异性特征分析

如图 1 所示，试样晶粒边界主要为云母颗粒相接面、石英颗粒相接面以及云母颗粒和石英颗粒相接面，体现为云母晶间断裂和石英晶间断裂。穿晶断裂体现为石英穿晶断裂。同时，矿物间的相互挤压也会造成矿物内部产生许多微裂隙，这种细小的裂隙同样对岩体力学性质有重大影响。这些微观结构上的微结构面同样具有明显的方向性，严重影响云母石英片岩在实际工程中所体现的强度、变形等力学特征。

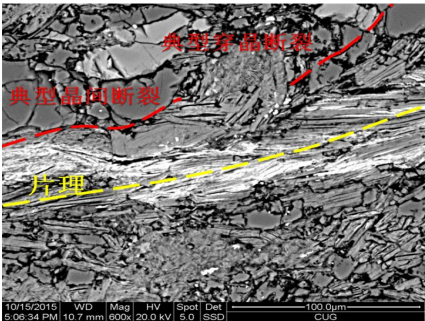


图 1 放大 600 倍电镜扫描图像

Fig.1 SEM image of after amplification of 600 times

3 云母石英片岩的三轴剪切试验

3.1 试验过程

试验采用普遍性三轴剪切试验。分别制作了片理

面水平(编号 10)、倾角 30°(编号 9)、倾角 60°(编号 8)、竖直(编号 7)等共 4 组岩样，每组岩样 4 个，三轴试验的围压分别为 3，6，9，12 MPa，试样为圆柱形，高度 10 cm，直径 5 cm。

3.2 试验成果分析

岩样以剪切破坏为主，对于垂直片理加压，其剪切破裂面基本上与轴向加压方向呈 15°~20° 夹角(基本上与 45-φ/2 一致)，该破裂面与原有片理面无关。对于轴压与片理面斜交的试样，破裂面总体上与片理面一致。平行片理面加压时，剪切面形式与垂直片理面加压基本相似，但破坏面规则性变差，局部受到片理面的影响。岩样破坏形式如图 2 所示。

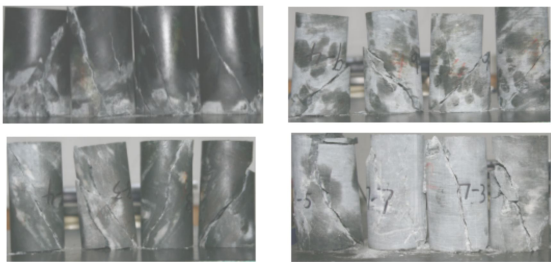


图 2 岩样破坏后照片

Fig. 2 Photos of destroyed rock samples

根据材料力学理论，单元体在三向应力作用下，剪切破坏面上的剪切力  $\tau_\alpha$  和法向力  $F_\alpha$  可以根据最大主应力  $\sigma_1$ 、最小主应力  $\sigma_3$  以及破裂面与最大主应力夹角  $\alpha$  计算得出 ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ):

$$\tau_\alpha = F_1 \cos \alpha + F_3 \sin \alpha \quad , \quad (1)$$

$$F_\alpha = F_1 \sin \alpha + F_3 \cos \alpha \quad . \quad (2)$$

三轴剪切试验完成后，测量破裂面与轴向压力的夹角，根据上述公式列表计算，可以得到单位轴向面积时剪切面上的剪切力  $\tau_\alpha$  和法向力  $F_\alpha$ ，详见表 3。

表 3 三轴剪切试验成果表

Table 3 Results of triaxial shear tests					
试样编号	$\sigma_3$ /MPa	$\sigma_1$ /MPa	剪切面与 $\sigma_1$ 夹角 (°)	剪切面 法向力 /10 <sup>6</sup> N	剪切面 剪切力 /10 <sup>6</sup> N
7-2-3	3	150.1	24.4	64.79	137.91
7-3-6	6	199.0	21.4	78.23	187.46
7-7-9	9	210.2	26.2	100.82	192.61
7-5-12*	12	169.6	31.4	98.65	150.99
8-1-3	3	42.5	29.2	23.32	38.58
8-2-6	6	100.0	21.8	42.74	95.07
8-3-9	9	101.1	29.1	57.03	92.72
8-4-12	12	116.9	25.4	60.95	110.76
9-1-3	3	81.1	36.0	50.10	67.37
9-2-6	6	104.9	44.1	77.31	79.51
9-3-6	9	134.0	39.4	92.08	109.20
9-4-12*	12	91.4	49.4	77.19	68.61
10-2-3	3	117.9	22.2	47.38	110.27
10-3-6	6	138.8	17.2	46.82	134.35
10-4-9	9	146.2	19.2	56.51	141.05
10-6-12	12	153.5	16.0	53.92	150.85

#8 和 #9 试样均是沿片理面剪切破坏的, 对剪切面上的法向力和剪切力进行线性相关分析, 可以得到回归方程  $\tau_\alpha = 45.2 + 0.624 \sigma_\alpha$ , 即片理面的内摩擦角为  $32.0^\circ$ , 凝聚力  $c$  为  $21.9 (45.2 \times \sin(45^\circ - 32^\circ / 2) = 21.9)$  MPa。

根据材料力学理论, 均质材料施加轴向压力时, 最大剪应力面与轴向应力夹角为  $45^\circ - \varphi/2$ , 据此原理, 根据材料  $c$ ,  $\phi$  参数, 可以计算出材料的单轴抗压强度 (本文称作换算单轴抗压强度):

$$\sigma = \frac{c}{\sin\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - \tan\varphi\sin^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

将#7 试样和#10 试样分别进行回归分析, 结合上文的分析结果, 可以得到如表 4 所示的换算单轴抗压强度。

表 4 换算单轴抗压强度计算表

Table 4 Converted values of uniaxial compressive strength

试样 编号	$c$ /MPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	剪切面 /片理面	换算单轴抗压 强度/MPa
#8, #9	21.9	32.0	片理面	79.1
#7	61.6	35.5	剪切面	188.6
#10	57.2	49.9	剪切面	140.5

从表 4 可以看出, #7 岩样片理方向与轴向应力方向一致, 岩样剪切破坏时, 剪切面发展受到了片理面影响, 有劈裂破坏趋势, #7~#3 试样表现比较明显,  $c$  值和换算单轴抗压强度最大; #10 试样表现为完全的剪切破坏模式, 剪切破坏面顺直, 内摩擦角最大; #8 和 #9 试样沿片理面剪切破坏, 剪切面呈波浪形, 换算单轴抗压强度、 $c$  值和内摩擦角均最小。

4 风化对片理面强度的影响

对于强风化岩<sup>[5]</sup>, 在现场进行了沿片理面的便携式直剪试验和岩块的点荷载试验; 对于全风化层, 在现场进行便携式直剪试验; 中风化岩样制样最为困难, 在现场进行点荷载试验<sup>[6]</sup>。

4.1 强—中风化云母石英片岩的点荷载试验

现场将肉眼可辨的、风化程度相同的岩石试样分为一组, 每一组分为平行、垂直和斜交 ( $45^\circ$ ) 片理面 3 种状态加荷。其统计结果见表 5。

表 5 点荷载试验成果表

Table 5 Results of point load tests

风化 程度	组数	加压 方向	标准点荷载 强度/MPa	换算抗压 强度/MPa
中风化	7	垂直	2.96	51.54
	3	斜交	1.39	29.22
	5	平行	1.24	26.76
强风化 (1)	15	垂直	1.12	24.76
	15	斜交	0.49	13.38
	15	平行	0.62	15.96
强风化 (2)	45	垂直	0.14	5.35
	46	斜交	0.13	5.21
	45	平行	0.10	4.14

根据福建省地方经验, 参考花岗岩强风化划分标准 (石英含量高), 将强风化划分为碎块状强风化 (开挖坡面呈碎块状) 和砂土状强风化 (坡面以砂土状为主, 选取残留的岩块进行试验) 两个亚级。由于点荷载试验接触面积小, 平行于片理方向加载时, 容易产生沿片理面的劈裂破坏, 其强度往往小于斜交片理方向加载的点荷载强度, 故评价岩块的抗压强度、风化系数和各向异性时, 以垂直片理加载的强度作为依据。

4.2 强风化云母石英片岩的直剪试验

对于砂土状强风化云母石英片岩, 选取了 6 组试样沿片理面分别进行天然状态和饱水状态的抗剪强度测试, 对于每个岩样, 采用在不同法向应力条件下反复剪切试验, 得到天然状态凝聚力  $c=19.5$  kPa, 内摩擦角为  $29.0^\circ$ , 饱水状态凝聚力  $c=4.4$  kPa, 内摩擦角为  $25.2^\circ$ 。强风化岩样的直剪试验强度要明显小于点荷载试验成果, 主要是制样过程中不可避免地扰动了片理面结构, 表现为凝聚力  $c$  值大幅下降, 内摩擦角受扰动影响小。强风化云母石英片岩饱水后, 片理面强度急剧降低, 黏聚力下降了 77.5%, 仅剩 4.4 kPa, 内摩擦角也从  $29.0^\circ$  降低到  $25.2^\circ$ , 说明云母的亲水特性起了控制作用, 这也是强风化云母石英片岩边坡受开挖影响大, 雨季大量破坏的内在原因。

4.3 全风化云母石英片岩的直剪试验

现场进行了 3 组全风化试样的天然以及饱和直剪试验, 得到天然状态凝聚力  $c=19.0$  kPa, 内摩擦角为  $32.9^\circ$ 。饱水状态凝聚力  $c=13.2$  kPa, 内摩擦角为  $29.3^\circ$ 。全风化层的抗剪强度要高于砂土状强风化岩块片理面的剪切强度, 说明片理面上的云母完全风化成黏土矿物后, 亲水特性明显减弱, 石英颗粒作用增加。

4.4 风化对片理面强度的影响

取微风化岩样的风化系数为 0.9, 以垂直片理面加压的单轴抗压强度作为计算依据, 可以计算得到试验岩样的风化系数。中风化岩样取样 (露头少) 和试样加工均困难, 没能直接取得片理面的强度参数, 考虑到岩样片理面内摩擦角变化范围小 ( $29^\circ \sim 32^\circ$ ), 以风化系数来内插计算其内摩擦角是可行的。根据单轴抗压强度、加压方向与片理面夹角、片理面内摩擦角等参数便可计算得出强风化和中风化岩样的片理面凝聚力  $c$  值, 进而计算得到换算单轴抗压强度, 计算结果见表 6。

以风化系数为横坐标, 各向异性系数为纵坐标作图 (图 3), 可以得到风化系数与各向异性系数之间的关系。

表6 片理面力学特征成果表

Table 6 Mechanical characteristics of schist foliation surface

风化程度	单轴抗压强度/MPa	风化系数	片理面内摩擦角/(°)	片理面凝聚力/MPa	换算单轴抗压强度/MPa	各向异性系数
微风化	140.50	0.90	32.0	21.90	79.10	1.78
中风化	51.54	0.33	30.0	10.10	21.11	2.44
碎块状强风化	24.76	0.16	29.4	4.70	9.76	2.54
砂土状强风化	5.35	0.03	29.0	1.90	3.83	1.40
全风化	—	0.00	32.9	0.02	—	1.00

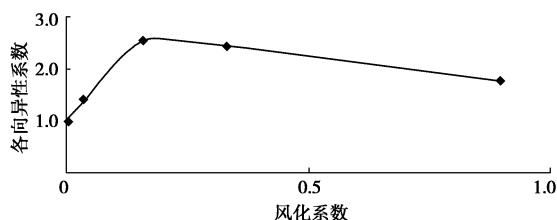


图3 各向异性系数与风化系数关系图

Fig. 3 Relationship between anisotropic coefficient and weathering coefficient

从图3和表6可知:随着岩石的风化,岩石的各向异性系数逐渐增加,碎块状强风化岩石的各向异性系数达到最大值,说明片理面的风化要强于岩石的整体风化;从碎块状强风化向全风化发展过程中,各向异性系数快速减小,岩石完全风化后,内摩擦角反而有所提高,说明云母在风化成黏土矿物后,石英对风化层的内摩擦角影响逐步增大。

## 5 结 论

微观结构试验揭示了云母石英片岩矿物组成和定向排列方式是各向异性的内在原因。通过对不同风化程度的岩样进行系统性试验研究,在得到了不同风化程度的岩石片理面力学参数的同时,也揭示了各向异性系数随着风化系数的变化规律,主要结论有:

(1) 云母石英片岩矿物组成以石英和云母为主,呈细粒鳞片粒状变晶结构,显微片状构造,云母定向排列尤为明显,为岩石强度各向异性的主要控制因素。

(2) 微风化岩样的三轴剪切试验呈剪切破坏形式,片理面对抗压强度有显著影响;根据剪切破坏面与主应力方向的夹角可以计算得出片理面的力学参数,即微风化岩样片理面  $c=21.9$  MPa,  $\varphi=32.0^\circ$ 。

(3) 随着岩石风化的进行,片理面的内摩擦角变化范围为  $32.9^\circ \sim 29.0^\circ$ ,幅度很小, $c$ 值急剧减小,从 21.9 MPa 减小至 0.02 MPa。

(4) 饱水状态下,强风化岩样的片理面抗剪强度急剧减小, $c$ 值减低了 77.5%,内摩擦角也从  $29.0^\circ$  降

低到 25.2,进一步说明云母的亲水特性对片理面强度有着控制作用。

(5) 片理面的风化要强于岩石的整体风化,碎块状强风化状态,岩石的各向异性系数达到最大值,然后各向异性系数快速减小,岩石完全风化后,内摩擦角反而有所提高,说明云母在风化成黏土矿物过程中,石英对风化层的内摩擦角影响逐步增大。

## 参考文献:

- [1] 王家兴. 石英云母片岩各向异性特征及其对围岩稳定性影响的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. (WANG Jia-xing. Anisotropic characteristics of quartz mica schist and its influence on stability of surrounding rock[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [2] 单治钢, 陈国庆, 周春宏, 等. 丹巴水电站石英云母片岩力学特性及岩体质量分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2070 - 2078. (SHAN Zhi-gang, CHEN Guo-qing, ZHOU Chun-hong, et al. Quartz mica schist mechanical properties and rock mass quality classification of Danba Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2070 - 2078. (in Chinese))
- [3] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. (JTG E40—2007 Highway geotechnical test code[S]. (in Chinese))
- [4] 王家兴, 石豫川, 段伟锋, 等. 基于微观试验的片岩力学特性研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 73 - 78. (WANG Jia-xing, SHI Yu-chuan, DUAN Wei-feng, et al. Study on mechanical properties of schist based on micro-test[J]. Modern Tunnel Technology, 2014, 51(3): 73 - 78. (in Chinese))
- [5] 杨帆, 侯克鹏, 谢永利. 强风化云母石英片岩力学参数确定方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(2): 29 - 33, 38. (YANG Fan, HOU Ke-peng, XIE Yong-li. Method for determining mechanical parameters of strongly weathered mica quartz schist[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(2): 29 - 33, 38. (in Chinese))
- [6] 张宇, 干泉, 余飞, 等. 基于点荷载试验武当群片岩的风化分组及强度特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊1): 229 - 232. (ZHANG Yu, GAN Quan, YU Fei, et al. Weathering grouping and strength characteristics of Wudang Group schist based on point load test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 229 - 232. (in Chinese))

(责编: 明经平)