

# 基于分级颗粒成分分析的软弱夹层泥化机制

肖拥军\*, 王栋, 杨仙

(湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**以三峡库区黄土坡库岸斜坡巴东组第三段泥化夹层为例,采用颗粒筛分试验、X 射线衍射法、X 射线荧光光谱法,从不同颗粒组分的矿物成分、化学成分对比分析其泥化的物理化学机制.结果表明:软弱夹层泥化砾类土的分级颗粒在从粗变细的过程中存在泥化差异,方解石的含量表现为先降低再增加再降低的变化特征,而黏土矿物与方解石的含量变化呈现负相关,其中粒径 2~5 mm 和 <0.075 mm 颗粒中的方解石含量较低、黏土矿物含量较高,2~5 mm 颗粒表面溶蚀也最强烈;随着颗粒变细,绿泥石含量逐渐减少,绿蒙混层矿物逐渐增多;分级颗粒主量元素氧化物的含量变化特征也反映了泥化夹层的水岩作用过程.

**关键词:**软弱夹层;泥化机制;分级颗粒;矿物成分;化学成分

**中图分类号:**P642      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2022)03-0056-05

## Argillation Mechanism of Weak Intercalation Based on Component Analysis of Different Grading Particles

XIAO Yongjun, WANG Dong, YANG Xian

(School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to reveal the argillization mechanism of weak intercalation, the mineral component and chemical composition of different grading particles from argillaceous intercalation in  $T_2b^3$  rock mass in Huangtupo bank slope of Three Gorges Reservoir area are compared. Differences in argillization mechanism of grading particles are reflected by variation characteristics of mineral content of grading particles of gravelly soil from intercalation argillization. During particles' thinning process the content of calcite in the particles first decreases, then increases and then decreases, the content changes of clay minerals show negative correlation with calcite content. Calcite content is low, and clay mineral content is high in particles 2~5 mm and less than 0.075 mm, 2~5 mm particles' surfaces are strongly corroded. Chlorite content decreases gradually and chlorite-montmorillonite mixed minerals increase gradually during particle thinning process of argillaceous intercalation. The variation characteristics of the relative content of major element oxides in graded particles of argillaceous intercalation also reflect the water rock interaction process during particle thinning process.

**Keywords:** weak intercalation; argillation mechanism; grading particles; mineral composition; chemical composition

地层是组成斜坡的物质基础,软弱夹层易泥化为顺层基岩的滑坡滑带,如瓦依昂滑坡<sup>[1-2]</sup>、千将坪滑坡<sup>[3-4]</sup>.三峡库区典型顺层基岩滑坡的滑带形成可概化为层间软岩、层间剪切带、泥化夹层和滑带 4 个阶段<sup>[5]</sup>,在三峡库区滑坡勘查过程中,滑带与软弱夹层、层间剪切带的区别判定也是滑坡稳定性评价中的关

收稿日期:2021-08-12

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4298)

\*通信作者, E-mail: yongjunxiao2002@126.com

键问题<sup>[6-7]</sup>.地下水与岩土体之间的泥化作用也会改变软弱夹层的物理、化学及力学性质<sup>[8]</sup>,降水转化为地下水与岩石发生复杂的水岩化学作用是滑坡孕育过程和诱发滑坡的重要因素<sup>[9-10]</sup>.地下水与泥岩的水化作用、离子交换作用、溶蚀作用相互促进,改变了泥岩的组构和性质,使泥岩泥化,转变为泥化夹层<sup>[11]</sup>.矿物成分、特征地球化学组分对水在滑带形成中的作用具有指示意义<sup>[12]</sup>.

以上分析可见,软弱夹层的工程性质变化已经引起了高度重视,但从泥化夹层的颗粒粗细角度对比的研究较少.论文以三峡库区巴东组第三段库岸泥化夹层为例,从不同颗粒组分的矿物成分、化学成分对比分析其泥化的物理化学机制,该研究成果对于分析软弱夹层从岩石到土的工程性质变化具有一定的理论意义.

## 1 巴东组第三段库岸软弱夹层发育特征

三峡库区的滑坡分布特征揭示三叠系中统巴东组为易滑地层<sup>[13]</sup>,三峡库区巴东、巫山、奉节新县城是由巴东组组成的.巴东组第三段岩体中发育多层软弱夹层,巴东县新城区的滑坡也主要发生在巴东组第三段内,如赵树岭滑坡、谭家坪滑坡、红石包滑坡,特别是黄土坡深层滑坡体原岩对应巴东组第三段上部地层,此处软弱夹层发育较密集<sup>[14-15]</sup>.

巴东组第三段岩体中软弱夹层以泥质灰岩、钙质泥岩为主,黏土矿物质量分数为30%~60%,有泥化的物质基础.巴东城区近东西走向的官渡口向斜是控制本区的主要地质构造,在褶皱形成过程中库岸斜坡巴东组第三段泥灰岩中的软弱夹层发生了顺层剪切滑动,由于层间剪切错动产生挤压和摩擦,上下岩层接触部分或原生软弱夹层遭到一定程度的破坏,形成一些破碎产物.可见软弱夹层层间剪切作用破坏了软弱夹层的完整性,使岩石岩化过程中形成的岩化连接被破坏,还有利于地下水的渗透和泥化.

## 2 泥化夹层颗粒级配特征

本文中的泥化夹层取自三峡库区巴东库岸黄土坡斜坡的巴东组第三段上部岩体,粗粒含量多,风干后按规范进行颗粒筛分,得到40~60 mm,20~40 mm,10~20 mm,5~10 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1.0 mm,0.25~0.50 mm,0.075~0.250 mm以及<0.075 mm这10组分级颗粒.

该泥化夹层大部分颗粒粒径集中在2 mm以上,碎石含量较多,粒径大于2 mm的颗粒质量占土体总质量的80%,粒径<0.075 mm的颗粒质量仅占土体总质量的0.34%,由此可知该泥化夹层黏性较差.该泥化夹层样品的不均匀系数 $C_u$ 远大于5,同时曲率系数 $C_c$ 大于1且小于3,由此可知该泥化夹层为级配良好的均匀土.按土的颗粒级配分类,根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001),该泥化夹层为碎石土中的砾类土.

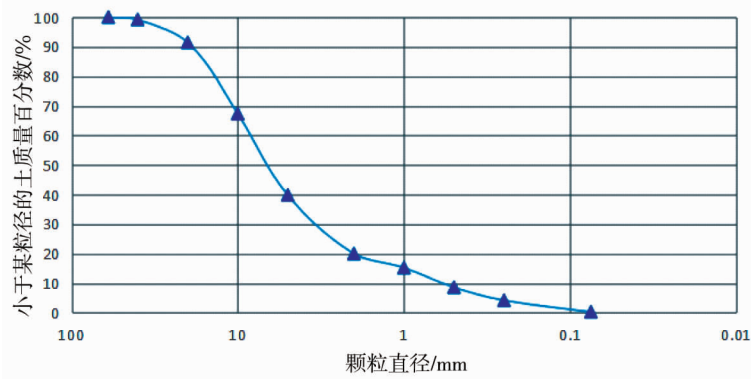


图1 巴东组第三段泥化夹层颗粒累计分布曲线

## 3 分级颗粒的成分变化

### 3.1 测试分析方法

采用X射线衍射法(XRD)、X射线荧光光谱法(XRF)分别测试泥化夹层各分级颗粒组分的矿物成分

和化学成分.由于20~60 mm只有3个颗粒样品,分析时选取了20~40 mm的一个样品进行矿物分析.X射线衍射(XRD)分析采用日本理学TTR III多功能X射线衍射仪,XRF元素分析采用Axios公司的Axios mAX能量色散X射线荧光光谱仪,测试分析在北京青辰寰宇石油地质科技有限公司完成.

### 3.2 分级颗粒矿物成分变化特征

XRD全岩分析结果显示泥化夹层各分级颗粒均以石英、方解石、黏土矿物、长石为主.粒径为20~40 mm的颗粒样品可以当成软弱夹层泥化前的原岩,其石英质量分数30.5%,方解石质量分数38.3%,黏土矿物质量分数29.9%,斜长石质量分数1.3%.以此为基础分析颗粒变细过程中矿物成分的相对变化规律.图2展示了泥化夹层不同分级颗粒主要矿物质量分数的变化,表明颗粒变细过程中方解石质量分数与黏土矿物质量分数的变化呈现负相关.

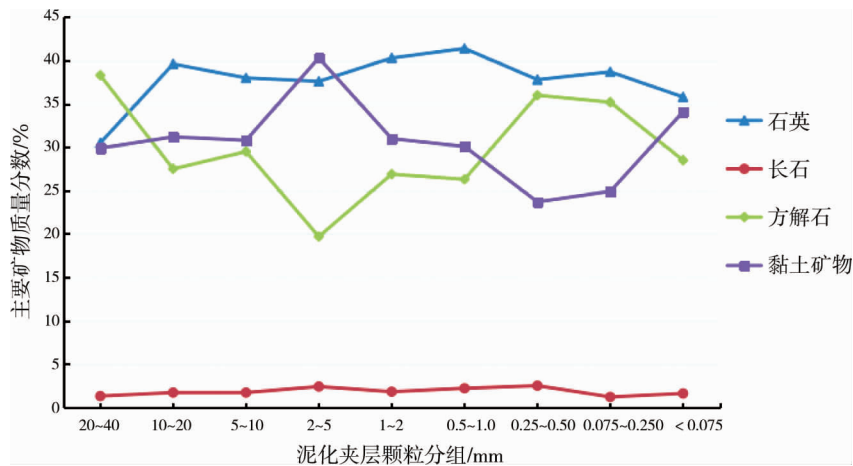


图2 泥化夹层分级颗粒主要矿物质量分数变化曲线

从粒径为20~40 mm,10~20 mm,5~10 mm,2~5 mm的颗粒变细过程中,方解石质量分数逐渐降低,表明在粗颗粒中方解石发生溶解,且具有一定的体积效应,粒径为2~5 mm的颗粒中方解石质量分数达到最低值19.7%.从粒径为2~5 mm,1~2 mm,0.5~1.0 mm,0.25~0.50 mm的颗粒变细过程中,方解石质量分数反而逐渐增加,粒径为0.25~0.50 mm,0.075~0.250 mm颗粒中方解石质量分数达到36%的高值,说明这2种粒径的颗粒中方解石晶体较多.而在粒径<0.075 mm的颗粒中,方解石质量分数又降低.

从粒径为20~40 mm,10~20 mm,5~10 mm的颗粒变细过程中,黏土矿物质量分数变化不大.但粒径为2~5 mm的颗粒黏土矿物质量分数达到最高值40.3%,表明此颗粒级别泥化最强烈.图3为粒径2~5 mm颗粒表面图片,由图3可见方解石溶解后的颗粒表面溶蚀孔洞发育,颜色变化明显.当颗粒变细到2 mm以下时,黏土矿物质量分数有所降低,但在粒径<0.075 mm的颗粒中黏土矿物质量分数达到另一高值34.1%,表明泥化分散后的黏土矿物以细颗粒为主.



图3 粒径为2~5 mm的颗粒表面泥化形态(标尺间距为1 mm)

单独考虑黏土矿物,泥化夹层分级颗粒中不同黏土矿物的质量分数变化特征如图4所示,20~40 mm粗颗粒(相当于原岩)中蒙皂石类质量分数较低,为4%,在颗粒变细过程有所增加,2~5 mm组分中蒙皂石

类质量分数达到了最高值8%.

20~40 mm 粗颗粒(相当于原岩)中绿泥石的质量分数高达13%,当颗粒变细后,绿泥石的质量分数降到了5%~8%.但绿蒙混层矿物的质量分数基本上随颗粒组分变细的过程逐渐增加,绿蒙混层矿物质量分数从20~40 mm 颗粒中的18%增加到<0.075 mm 颗粒的25%.说明在颗粒泥化变细过程中,绿泥石含量降低,但绿蒙混层矿物含量增加,膨胀性增加.

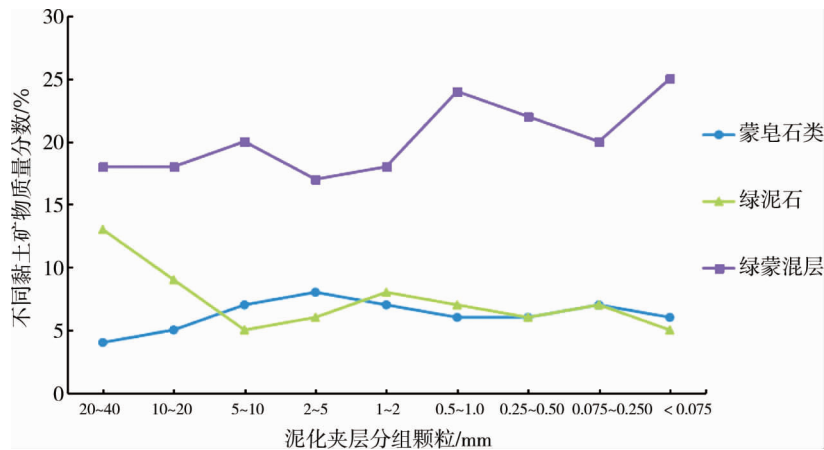


图4 泥化夹层分级颗粒不同黏土矿物质量分数变化曲线

### 3.3 分级颗粒化学成分变化特征

表1给出了泥化夹层分级颗粒主量元素氧化物质量分数.如果以主量元素氧化物含量表示该元素含量,在泥化夹层分级颗粒变细的过程中,MgO 含量变化不明显,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,K<sub>2</sub>O,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量呈现增加趋势,CaO 含量总体呈现降低趋势.

表1 泥化夹层分级颗粒主量元素氧化物及其质量分数

地层	颗粒粒径/mm	样品编号	主量元素氧化物质量分数/%						
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
巴东组第三段泥化夹层	20~40	H9	41.047	14.037	5.977	2.582	30.886	0.189	2.909
	10~20	H8	43.388	14.539	6.438	2.496	28.019	0	3.123
	5~10	H7	45.229	15.473	6.569	2.442	25.155	0.009	3.291
	2~5	H6	44.007	14.943	6.691	2.362	26.752	0	3.302
	1~2	H5	44.702	15.186	6.530	2.440	26.162	0	3.258
	0.5~1.0	H4	45.226	15.568	6.855	2.425	24.562	0	3.417
	0.25~0.50	H3	45.573	16.095	6.120	2.608	23.990	0.022	3.227
	0.075~0.250	H2	47.254	16.562	6.805	2.528	21.656	0	3.516
	<0.075	H1	45.419	15.575	7.031	2.426	23.931	0	3.431

## 4 泥化夹层水岩作用机理

水对方解石及黏土矿物的作用相对强烈,泥化夹层从粗到细各颗粒组分中的方解石、黏土矿物含量变化趋势,能够反映泥化夹层形成过程中的水岩作用机理.

地下水在软弱夹层层间剪切破碎部位流动过程中,水中侵蚀型CO<sub>2</sub>会与方解石发生化学反应,方解石溶解后Ca<sup>2+</sup>也随水流走,所以,泥化夹层粒径大于2 mm 粗颗粒中的方解石含量随颗粒变细而降低,说明方解石发生溶解,其中粒径2~5 mm 颗粒表面溶蚀最强烈,溶蚀孔洞发育;另一方面,地下水的作用引起软弱夹层层间破碎部位颗粒物的水解泥化,造成泥化夹层粒径大于2 mm 粗颗粒中黏土矿物含量增高.

在泥化夹层细颗粒(粒径0.25~2.00 mm)中,由于颗粒形态变化,方解石含量增加,黏土矿物含量反而降低.但在粒径<0.075 mm 的泥化夹层细颗粒中,黏土矿物含量达到新高,方解石含量相应降低.

黏土矿物对环境较敏感,在水的长期作用下,绿泥石形成膨胀层,逐渐向蒙脱石方向转变,造成泥化夹层内绿泥石矿物减少、绿蒙混层矿物增多,而绿蒙混层矿物较绿泥石具有更强的膨胀性,因此泥化夹层内绿蒙混层矿物的增多也会引起其抗剪强度的变化。

随着泥化夹层颗粒变细,Ca元素含量逐渐减少,说明方解石溶解后 $\text{Ca}^{2+}$ 随地下水流失;元素K,Al含量逐渐增多,这与泥化作用后黏土矿物含量增高有关; $\text{Fe}^{3+}$ 含量随着泥化颗粒变细却呈现增加趋势,表明泥化夹层部位的氧化作用比较活跃,说明有大气降水渗入到深部软弱夹层位置,参与了水岩反应。

总的来说,软弱夹层泥化过程主要表现为层间剪切破碎作用、碎屑颗粒的水解泥化作用、方解石溶解作用和绿泥石向绿蒙混层矿物的转化作用。

## 5 结论

1) 三峡库区巴东库岸黄土坡斜坡巴东组第三段上部岩体的泥化夹层为砾类土。

2) 泥化夹层各分级颗粒均以石英、方解石、黏土矿物、长石为主,分级颗粒在从粗变细的过程中,方解石的含量表现为先降低再增加再降低的变化特征,方解石与黏土矿物的质量分数变化呈现负相关。粒径2~5 mm的颗粒表面溶蚀作用表现强烈。

3) 泥化夹层分级颗粒的主量元素氧化物,在颗粒变细的过程中, $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{K}_2\text{O}$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量呈现增加趋势, $\text{CaO}$ 含量总体呈现降低趋势,反映了泥化夹层的水岩作用过程。

4) 软弱夹层泥化砾类土的分级颗粒在从粗变细的过程中存在泥化差异。

## 参考文献:

- [1] SEMENZA E, GHIROTTI M. History of 1963 vajont slide: The importance of geological factors[J]. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2000, 59(2): 87-97.
- [2] KILBURN C R J, PETLEY D N. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy[J]. Geomorphology, 2003, 54(1/2): 21-32.
- [3] WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T, et al. Mechanism for the rapid motion of the Qianjiangping landslide during reactivation by the first impoundment of the Three Gorges Dam reservoir, China[J]. Landslides, 2008, 5(4): 379-386.
- [4] 肖诗荣,刘德富,胡志宇.世界三大典型水库型顺层岩质滑坡工程地质比较研究[J].工程地质学报,2010,18(1):52-59.
- [5] 李晓,李守定,陈剑,等.地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1792-1806.
- [6] 李守定,李晓,吴疆,等.大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2473-2480.
- [7] 贾淑霞.湖北省三峡库区滑坡勘查评价几个问题的商榷[J].湖北地矿,2002,16(4):44-46.
- [8] 周翠英,彭泽英,尚伟,等.论岩土工程中水-岩相互作用研究的焦点问题:特殊软岩的力学变异性[J].岩土力学,2002,23(1):124-128.
- [9] 徐则民,黄润秋,杨立中.斜坡水-岩化学作用问题[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2778-2787.
- [10] 徐则民,黄润秋,范国柱.滑坡灾害孕育—激发过程中的水-岩相互作用[J].自然灾害学报,2005,14(1):1-9.
- [11] 李守定,李晓,张年学,等.三峡库区宝塔滑坡泥化夹层泥化过程的水岩作用[J].岩土力学,2006,27(1):1841-1846.
- [12] 文宝萍,陈海洋.矿物成分、特征地球化学组分对水在滑带形成中作用的指示意义:以三峡库区大型滑坡为例[J].地学前缘,2007,14(6):98-106.
- [13] 王治华.三峡水库区城镇滑坡分布及发育规律[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):33-38.
- [14] 肖拥军,殷坤龙,柴波.含软弱夹层库岸滑坡滑带发育特征研究[J].工程地质学报,2011,19(1):65-69.
- [15] 肖拥军,杨昌才,何惠军.三峡库区黄土坡滑坡体原岩结构特征及演化模式研究[J].水文地质工程地质,2012,39(5):121-125.