

滇藏铁路滇西北段蒙脱石化蚀变岩的工程地质研究

张永双¹, 曲永新², 刘景儒¹, 郭长宝¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 滇西北地区是中国西南地区最重要的构造成矿带之一, 与其相伴出现的蚀变岩常引起一系列工程问题。野外地质调查和室内测试表明: 滇藏铁路滇西北段出露的多为蒙脱石化蚀变岩带, 蚀变岩的黏土矿物组成绝大多数都是单矿物的蒙脱石, 导致该地区的蚀变岩既是强度极低的软岩, 又是典型的膨胀岩。蒙脱石化蚀变岩的发育分布与三江地区热液矿床的分布具有相似的规律。本文以滇藏铁路滇西北段为例, 阐述了蒙脱石化蚀变岩的发育特征和工程特性, 并针对隧道建设中由蚀变岩引起的工程问题提出了相应的防治对策。

关键词: 蒙脱石化; 蚀变岩; 膨胀性; 热液作用; 滇藏铁路

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)04-0531-06

作者简介: 张永双(1968-), 男, 山东龙口人, 博士, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: zhys100@sohu.com。

Engineering geological research on altered rocks in the area of NW Yunnan along Yunnan-Tibet Railway line

ZHANG Yong-shuang¹, QU Yong-xin², LIU Jing-ru¹, GUO Chang-bao¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The NW Yunnan area is one of the famous tectonic-metallogenic regions in southwestern China, and a series of engineering problems always occur because of the existence of altered rocks formed by hydrothermal action. It was shown by field investigation and lab tests that the types of altered rocks were mostly those of montmorillonitization, and the altered clay mineral was mainly pure montmorillonite, which rendered the altered rock both soft and expansive. The altered rocks had a similar development with the hydrothermal ore deposits in the area of three paralleled rivers. Taking examples from the NW Yunnan area along the Yunnan-Tibet Railway line, the geological characteristics and engineering properties of the altered rocks were discussed, and a series of control measures were put forward for the engineering problems caused by them.

Key words: montmorillonitization; altered rock; swelling, hydrothermal action; Yunnan-Tibet Railway

0 引言

滇藏铁路滇西北段地处欧亚板块与印度板块间的三江(怒江、澜沧江和金沙江)造山带, 由于三江造山带经历了多期强烈的构造岩浆作用并伴随发生岩浆热液成矿和热液蚀变作用, 加之晚第三纪以来青藏高原强烈隆起为特色的差异性新构造活动及高山峡谷地貌环境, 使得滇藏铁路建设面临着极为复杂的工程地质环境, 遇到了多种多样的复杂工程地质问题。其中, 铁路沿线广泛分布、类型多样的火成岩侵入体在热液蚀变作用下常形成蒙脱石化蚀变岩带, 由其引起的隧道和边坡变形破坏问题比较突出。这不仅会造成工程投资增大、工期延长, 而且常危及施工人员和施工机械的安全。

长期以来, 矿床地质学对蚀变矿物和蚀变作用的研究主要关注与成矿作用有关的方面, 而对热液蚀变过程中的蒙脱石化作用和蒙脱石化蚀变岩的研究常被忽视。在云南省区域地质志和大理、丽江、鹤庆、中甸、古学、德钦等滇西北地区1:20万区域地质报告中, 涉及蚀变作用的研究成果均没有蒙脱石化蚀变作用的相关描述。因此, 很有必要根据三江地区的构造及热液作用和成矿规律, 对蒙脱石化蚀变岩的形成机理和发育规律进行分析, 并研究蚀变岩的不良工程地质特性, 从而指导滇藏铁路滇西北段蚀变岩分布区的工程地质预测及工程问题防治。

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010541404)

收稿日期: 2006-03-11

1 蒙脱石化蚀变岩的发育特征

笔者在滇藏铁路滇西北段野外地质调查过程中,发现了多处工程性质极差的火成岩和玄武岩的蚀变岩,它们主要分布在洱海东侧的禾洛山隧道、大墓坪隧道及公路边坡的露头上;在洱海东、鹤庆北衙等地还发现了多处岩脉遭受侵蚀后形成的深切槽谷,它们很可能标志着蚀变岩的分布。

1.1 蚀变岩的宏观地质特征

(1) 康廊村蚀变岩带

在洱海东岸康廊村一带,沿 D_{1k} 白云质灰岩中的裂隙带发育闪长岩脉,岩脉宽达 4.5 m,走向 80° ,近直立,岩脉与灰岩交界处形成钟乳状的方解石,在后期的构造活动和热液作用下闪长岩脉发生蚀变,呈软弱泥状(见图 1)。

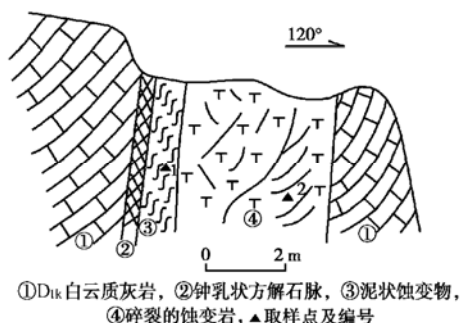


图 1 洱海东岸康廊村一带蚀变岩特征

Fig.1 Characteristics of altered rock in Kanglang village near the eastern bank of Erhai Lake

(2) 禾洛山隧道的蚀变岩带

在禾洛山隧道一带,发育近 SN 向的断裂带,二叠纪玄武岩常沿断裂带遭受热液作用、产生蚀变。在隧道北口西侧,玄武岩挤压破碎明显,蚀变程度不同的深褐色蚀变岩与褐黄色蚀变岩交替出现,构成宽达 15 m 的蚀变带(见图 2)。由于蚀变岩体与隧道近于平行,隧道断面不得不扩挖并采用弧形板支护。在山体西侧,施工便道开挖的边坡在半年内即风化成砂,覆盖于母岩之上,厚达 3~5 cm,这显然与玄武岩蚀变作用引起的性质蜕化有关。

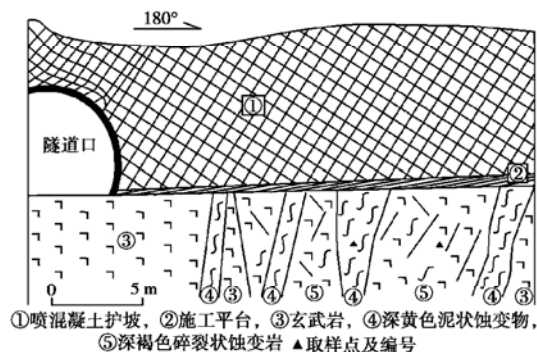


图 2 禾洛山隧道北口蚀变岩特征

Fig. 2 Characteristics of altered rock in the north side of Heluoshan tunnel

(3) 康海村蚀变岩带

位于双廊镇康海村北的山体主要由二叠纪灰色石灰岩构成,沿断裂带间断出现玄武岩。受蚀变作用影响,玄武岩风化程度高。二叠纪石灰岩常沿断层方向或岩脉产生溶蚀,出现岩溶裂隙或宽大裂缝。铁路从该蚀变带附近以边坡形式通过,在断裂带和玄武岩复合部位的边坡易于风化剥落。

(4) 大墓坪隧道的蚀变岩带

大墓坪隧道的围岩为层状玄武岩,产状 $290^\circ \angle 30^\circ$,洞轴走向 340° ,围岩中发育较多的 NE 向构造节理,且有煌斑岩侵入迹象。玄武岩沿节理蚀变现象明显,蚀变后呈紫红色、灰绿色、米黄色等,且性质软弱。

(5) 奔子栏西北的蚀变岩

在德钦奔子栏西北,214 国道边坡由玄武岩构成,节理密集发育,属断层影响带。斜坡表层蚀变风化现象明显,玄武岩成为浅黄绿色泥砾质蚀变物,其中夹杂石膏脉和黄铁矿斑点,说明它们遭受过低温热液矿化作用。蚀变岩风化后呈豆腐渣状,在蚀变岩分布区出现多处边坡滑塌现象。

1.2 蚀变岩的物质组成

经蚀变的岩体多呈松散状,经后期错动或风化后呈土状。在不少情况下,蚀变物与原岩或围岩交错镶嵌在一起。通过野外系统取样进行粒度分析,蚀变岩的粒度组成因蚀变程度的不同而有所差异,不少蚀变岩 $<5 \mu\text{m}$ 黏粒含量达 50% 以上,最高达 71.84% (见表 1),这也是蚀变后的岩石极易风化的原因之一。

黏土矿物含量和组成是决定蚀变岩工程地质特性的物质基础^[1]。本次研究中,分别采用三种方法处理的样品(悬液制成的定向片、乙二醇饱和处理的定向片、 550°C 条件下加热的定向片)对黏土矿物进行定量测定。测试结果表明:强烈蚀变的土状蚀变岩的黏土矿物成分全部为蒙脱石,蒙脱石相对含量达 100%;蚀变程度较低的斑块状蚀变岩的黏土矿物成分由蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石组成,但蒙脱石相对含量也达到 35%~82% (见表 2、图 3)。值得一提的是,组成蚀变岩黏土矿物的蒙脱石是以单矿物形式出现的,而不以混层形式出现。采用 SnCl_2 容量法测得的有效蒙脱石含量(绝对含量)多数在 50% 以上。这说明所研究的蚀变岩类型全部为蒙脱石化蚀变岩。

2 蚀变岩的工程地质特性

2.1 物理性质和物理化学活性

室内测试表明:由于大量蒙脱石的存在,蚀变岩

表 1 滇藏铁路滇西北段蚀变岩的粒度分析结果

Table 1 Granulometric analysis results of altered rocks in NW Yunnan along Yunnan-Tibet Railway line						
编号	地 点	岩 性	颗粒组成/%			
			>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	<0.002 mm
E040	奔子兰北 214 边坡	灰色泥质物	74.19	17.50	8.30	8.10
E192-1	禾洛山隧道北口	褐黄色蚀变物	10.62	36.62	52.72	44.96
E192-2	禾洛山隧道北口	深褐色蚀变岩	64.13	22.83	13.04	12.12
E194	大磨坪隧道南口	棕色蚀变岩	5.31	43.92	50.76	43.36
E196	洱海东康海村南	棕色蚀变岩	0.58	27.58	71.84	66.32

表 2 蚀变带黏土矿物组成定量测试结果

Table 2 Quantitative analysis results of clay mineral composition of altered rocks											
编 号	地点	颜色	黏土矿物相对含量 /%				<5 μm 黏粒 含量/%	黏土矿物绝对含量/%			
			S	I	K	C		S	I	K	C
E40	德钦奔子兰	灰色	35	25		40	8.30	2.91	2.08	3.32	
E192-1	大理禾洛山隧道	褐黄色	100				52.72	52.72			
E194	洱海东大磨坪隧道	棕黄色	100				50.76	50.76			
E196	洱海东康海村	棕黄色	82	1	17		71.84	58.91	0.72	12.21	

注：蚀变岩中多为自生粘土矿物，故黏粒含量采用<5 μm 粒级计算。

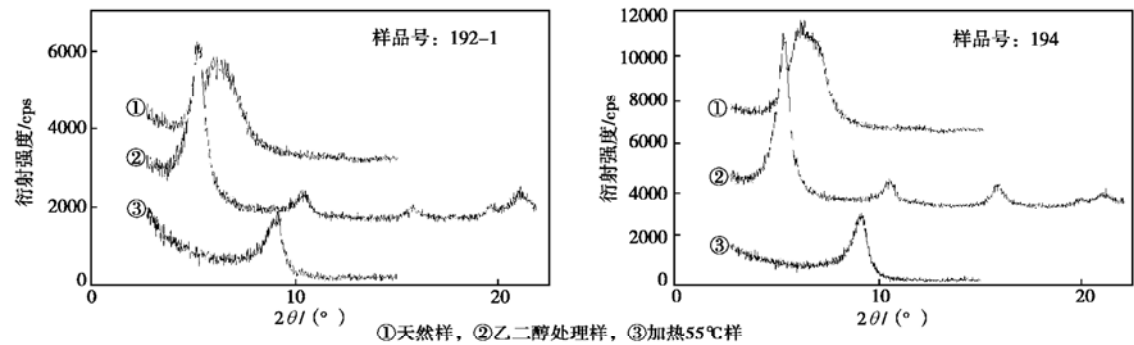


图 3 蚀变岩<5 μm 黏粒的 XRD 定量测试结果

Fig. 3 Oriented X-ray diffractograms of <5μm clay fraction in altered rocks

表 3 蒙脱石化蚀变岩的物性指标和工程特性测试结果

Table 3 Results of physical and engineering properties of montmorillonite-altered rocks												
编号	取样地点	颜色	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	干岩块的浸水性状	岩块干燥饱和吸水率/%	岩粉干燥饱和吸水率/%	蚀变系数	表面积/(m ² ·g ⁻¹)	有效蒙脱石含量/%	膨胀势判别
E40	德钦奔子兰	灰色				碎屑泥状	14.58			70.76	8.01	微
E192-1	大理北禾洛山隧道	褐黄色	49.65	1.72	1.15	泥状	86.90	103.72	0.84	493.73	72.24	强
E192-2	大理北禾洛山隧道	深褐色	11.20	2.18	1.96	碎屑状	15.08	34.99	0.43	209.18	15.53	微
E194	洱海东大磨坪隧道	棕色	40.16	1.69	1.21	泥状	81.85	88.85	0.92	447.30	60.11	强
E196	洱海东康海村北	棕色				泥状	91.29	100.52	0.91	507.66	64.71	强
E201-1	洱海东康廊村南	灰棕色				泥状	74.63	95.61	0.78	449.61	59.23	强
E201-2	洱海东康廊村南	黄绿色				变软	19.84	50.92	0.39	256.16	26.08	微

在天然状态下可保持较高的含水率（达 40%以上），而干燥后在水中崩解成泥状、碎屑泥状（见表 3）。蚀变岩的比表面积通常很高，一般在 200 m²/g 以上，有的高达 507.66 m²/g，具有蚀变程度越高、比表面积越大的特点，也说明蚀变岩通常具有较高或很高的物理化学活性，在环境变化的条件下，极易诱发工程问题。

2.2 膨胀势

蒙脱石化蚀变岩属于膨胀岩的一种地质成因类

型，国外虽有现场膨胀势的快速判别方法^[2]，但没有定量指标。目前国内尚无统一的膨胀岩判别标准，多采用曲永新提出的不规则岩块干燥饱和吸水率指标进行判别^[3]，吸水率的大小反映膨胀势的强弱。测试表明：多数样品为强膨胀性的，少数为微膨胀性的（见图 4）。为了揭示蚀变作用的工程效应和环境效应，作者认为可以采用“蚀变系数”来反映蚀变岩的蚀变程度，其值为岩块干燥包和吸水率与<0.005 mm 岩粉干

燥饱和和吸水率的比值, 表达式为

$$\xi = W_b / W_p, \quad (\xi \leq 1.0),$$

式中, ξ 为蚀变系数, W_b 为岩块干燥饱和和吸水率(%); W_p 为岩粉干燥饱和和吸水率(%).

蚀变系数反映岩石的蚀变程度, 值越大蚀变程度越高, 蚀变岩的膨胀性越强。

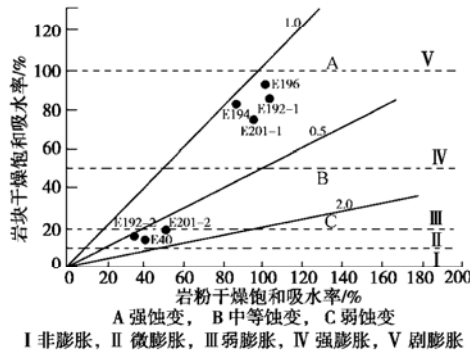


图 4 蚀变岩的蚀变程度和膨胀势判别图

Fig. 4 Alteration degree and swelling potential of altered rocks

3 蚀变岩的形成条件及其分布规律

3.1 岩石蒙脱石化作用的形成条件

大面积区域蚀变岩区的形成, 常受控于区域内重大地质事件和地质作用, 尤其是区域蚀变带常与区域深断裂的构造岩浆活动有关^[4-5]。因此, 岩石类型、活动断裂和流体作用是产生区域蚀变带的前提, 具有一定规模且稳定的热源是促使岩石蚀变的动力条件。由于不同地区岩浆侵入体的规模、成分、类型和围岩的成分有所差异, 因而蚀变作用和蚀变岩的类型是极其复杂和多种多样的。从工程地质和地质工程的角度, 蒙脱石化、黄铁矿化、高岭石化尤其是蒙脱石化对工程的危害最严重, 常常成为工程地质研究中最受关注的对象。

大量研究表明: 虽然硅酸盐岩经过热液作用都可以形成蒙脱石(蒙脱石), 但不同岩石形成蒙脱石所需要的条件是不同的。由于蒙脱石硅氧四面体和铝氧八面体晶层中普遍存在着 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 的同晶置换作用, 即 Mg^{2+} 是蒙脱石矿物晶格中不可缺少的化学成分, 因此蒙脱石的形成必须有足够的 Mg^{2+} 参与。 Mg^{2+} 的来源一般有三种途径: ①富含 Mg 的火成岩体本身, 如辉绿岩、辉长岩、玄武岩等基性岩; ②富 Mg 的围岩, 如白云岩、白云质灰岩、白云质大理岩; ③存在富含 Mg^{2+} 的地下热水作用。在对侵入体蒙脱石化工程地质预报中, 不仅要充分注意侵入体和围岩的矿物化学成分, 还必须分析是否出现过热液作用。通常, 对后者的宏观判别并不容易, 可行的判别办法主要有两个, 一是调查热液矿床和热液蚀变岩带的分布, 二是调查

温泉和地下热水的分布。横断山区是我国地热活动高异常区, 有大量温泉分布, 其中大理至德钦所经县区已发现温泉(群)达 69 个之多, 为围岩蚀变提供了极为充分的条件。

3.2 滇西北地区的主要热液蚀变带

滇藏铁路所经滇西北地区属三江成矿带, 而三江成矿带是喜马拉雅—三江成矿域的重要组成部分, 跨越青藏东部、川滇西部的横断山区, 面积 $50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该带地处特提斯—喜马拉雅构造带的东部及向南急转弯部位, 是中国最重要的岩浆热液成矿域之一。通过对三江成矿带构造—岩浆活动和构造—流体作用规律分析, 大致可划分出 4 个蚀变岩带(见图 5)。

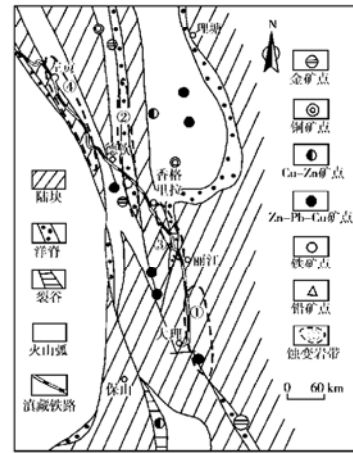


图 5 三江地区地质背景和主要蚀变岩带分布图

(据翟裕生等, 1999; 略有补充)

Fig. 5 Geological distribution of main altered rock zones in the area of three paralleled rivers (after Zhai Yu-sheng et al, 1999)

3.2.1 大理—金坪基性和超基性岩带

位于金沙江—哀牢山缝合带东缘, 扬子准地台的西缘, 中小型火成岩体密集成群分布在大理海东一带和南端的金坪地区, 单个岩体延伸排列与所处构造方位一致。其岩石组合主要可分为环状和层状两种类型:

(1) 环状基性: 超基性岩体多呈 NW~SE 向呈带状分布, 单个岩体呈似层状、扁豆状和扁柱状。岩体通常内部为超基性、外部为基性, 多与围岩呈近似整合状接触, 少数切穿围岩。岩体长度一般小于 1.0 km, 宽数百米, MgO 含量 28.8%~39.2%。

(2) 层状基性: 超基性岩体主要为众多分布广但规模小的岩墙, 厚数米~数十米, 少数呈岩株状, 其岩石类型包括辉绿岩、辉长辉绿岩或辉绿玢岩。这些岩脉大多沿区内次级断裂及其交汇部位分布。

3.2.2 金沙江基性和超基性岩带

主要位于金沙江断裂与德钦—雪龙山断裂之间, 岩带长 240 km、宽 25 km 的南北地带, 已知岩体不下 200 个, 组成 20 余个岩群, 如德钦白马雪山垭口、东

表 4 蚀变岩的全岩矿物组成的 XRD 测试结果
Table 4 Analysis results of mineral composition of altered rocks

编号	取样地点	颜色	非黏土矿物组成/%									黏土矿物总量/%
			石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿 ⁺	菱铁矿 ⁺	角闪石	石膏	
E40	德钦奔子兰	灰色	25.1	2.5	9.5	6.5		1.2		1.3	0.2	53.8(S, K,I)
E192-1	大理北禾洛山隧道	褐黄色	6.6		2.7							90.7 (S)
E192-2	大理北禾洛山隧道	深褐色	9.1		25.9							65.0 (S, K)
E194	洱海东大磨坪隧道	棕色	5.0		27.8							67.2 (S)
E196	洱海东康海村北	棕色	19.2									80.8 (S, K)
E201-1	洱海东康廊村南	灰棕色	18.0	6.6	1.7	19.8	1.3	2.5	10			49.1 (S, K)

竹林等岩群, 每个岩群由几至十几个岩体组成。超基性岩体的分布通常与断裂一致, 单个岩体长数十至数百米, 长宽比一般 5:1~20:1, 岩体多呈单斜层状或透镜状, 与围岩产状近乎一致。基性岩一般呈长条状出露, 长数十至数百米, 宽数米至数十米。岩石类型主要为辉绿玢岩、辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长岩等, 也有中性、酸性侵入体分布。德钦白马雪山北麓冰碛物中的大量蒙脱石矿物即来自于该蚀变岩带。

3.2.3 中甸—丽江中性和中酸性斑(玢)岩带

单个岩体形态复杂, 规模较小, 主要岩石类型为闪长玢岩、花岗闪长玢岩、石英二长斑岩、二长花岗斑岩、花岗斑岩, 它们多分布在区域性大断裂两侧。

3.2.4 澜沧江基性和超基性岩带

主要位于澜沧江断裂东侧, 已知岩体近百个, 其展布与构造线一致, 多呈 NNW 至近 SN 向。

3.3 滇藏铁路滇西北段的主要蚀变岩类型

前人成果和野外实地调查表明: 滇藏铁路滇西北段的蚀变岩主要属于岩浆期后的热液蚀变岩, 少量为火山岩的热液蚀变。岩浆期后的热液蚀变作用通常伴随着浅成(次火山岩)的岩浆活动, 由残余热液和挥发分的作用而发生的蚀变作用。一般遭受碱性—微碱性热液作用的火成岩侵入体均可以发生蒙脱石化作用。岩浆期后的热液蚀变岩按照母岩的岩性大致可划分为: ①辉绿岩、辉长岩脉的蚀变岩; ②安山玢岩、闪长玢岩脉的蚀变岩; ③酸性和碱性岩脉的蚀变岩。在某些火山岩分布区, 火山岩的蚀变通常是在碱性—微碱性富 Mg 热水的作用下形成的。遭受蒙脱石化蚀变作用的岩体, 其工程性质迅速蜕化, 成为容易诱发工程问题的特殊岩土体。

根据蚀变岩的全岩 XRD 测定结果推测, 洱海东侧康廊、康海一带蚀变岩的母岩可能为辉绿岩, 禾洛山隧道北口为蚀变玄武岩, 奔子栏北和康朗村蚀变岩的母岩可能为闪长玢岩, 蚀变岩样品中黄铁矿和石膏的存在, 表明它们为低温热液蚀变的产物(见表 4)。

4 蚀变岩工程问题的防治对策

前已叙及, 由于蒙脱石化蚀变岩不良的工程地质

特性, 在隧道掘进和边坡开挖中常出现岩体变形破坏问题。例如, 滇藏铁路大理—丽江段的禾洛山隧道, 围岩为遭受热液蚀变的玄武岩, 在宏观上表现为相对较完整的玄武岩夹蒙脱石化蚀变岩组合。在 2005 年工程施工过程中, 自 DK55+622 至 DK61+710 约 5 km 的范围内, 曾发生过 5 次与蒙脱石化蚀变岩有关的塌方问题, 有时甚至不到 100 m 就会出现一次塌方, 塌方体积一般 20~30 m³。由于强烈蚀变的岩体常呈土状或泥状, 现场技术人员常把它们看作是凝灰岩及其全一强风化的产物。而实际上塌方的出现主要是由于蚀变岩富含蒙脱石且性质软弱, 在干湿交替和松弛条件下极易发生膨胀变形, 加上围岩节理发育、破碎程度高, 开挖后自稳能力差, 从而造成围岩坍塌(见图 6)。

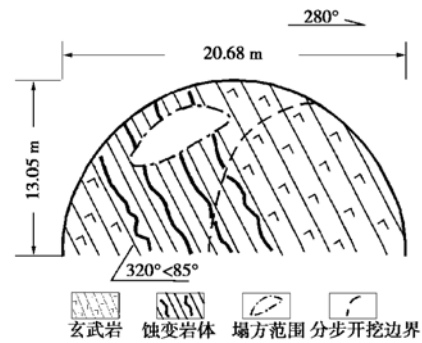


图 6 禾洛山隧道掌子面(DK61+235)处的蚀变岩破坏特征
Fig. 6 The failure characteristics of altered rocks from the workface (DK61+235) of Heluoshan tunnel

根据现场调查和室内测试结果认为, 隧道建设中主要应从以下方面加强与蚀变岩有关的工程问题防治工作:

- (1) 根据工程区蚀变岩的发育特征和分布规律, 结合前期地质勘察成果, 开展隧道工程地质超前预报, 主要可以采用深入细致的隧道地质编录与水平超前钻及 TSP 综合预报相结合, 及时掌握蚀变岩的分布及其工程性质变化。
- (2) 在蚀变岩发育带, 应加强超前支护, 根据蚀变岩的厚度加长超前支护导管的长度, 并在蚀变岩出

露部位缩短环向支护间距,适时实施全封闭支护,稳定开挖面。

(3)对于正常支护的径向锚杆,应根据围岩情况长短结合。在软弱破碎岩体区,锚杆可适当加密、加长。

(4)在蚀变岩分布区,应合理选择施工方法,隧道开挖宜采用微台阶法,少爆、多挖,减少扰动。此外,蚀变岩分布区的隧道围岩通常软硬变化较大,使用TBM施工时,可能因软弱围岩不均一变形而造成卡机事故,因此,TBM不适合该类围岩的施工。

(5)蚀变岩的物质组成和结构决定了在有水的情况下隧道塌方问题更为显著,因此,在富水地段应采取堵排结合的方法,采用帷幕注浆或超前钻引水,尽量减少隧道围岩与地下水的作用。

5 结 语

本文较系统地研究了滇藏铁路滇西北段蒙脱石化蚀变岩的形成条件、发育特征和工程特性,获得如下主要认识:

(1)滇藏铁路滇西北段出露的多为蒙脱石化蚀变岩带,蚀变岩的黏土矿物组成绝大多数都是单矿物的蒙脱石,导致该地区的蚀变岩既是强度极低的软岩,又是典型的膨胀岩。

(2)蒙脱石化蚀变岩的发育分布与三江地区热液矿床的分布具有相似的规律。在蚀变岩工程地质调查和研究中,不仅要搞清热液矿床和区域热液蚀变岩带的分布,还要注意温泉和地下热水的分布。

(3)在蚀变岩工程问题的防治工作中要加强工程地质超前预报,根据工程区蚀变岩的发育特征和分布规律,预测蚀变岩的类型及工程性状,为采取相应的工程措施提供依据。

(4)由于研究区蚀变岩分布的隐蔽性和性质的复杂性,加之高山峡谷的自然环境,使得现场调查和地质测绘十分困难,因此对蒙脱石化蚀变岩的基础研究

显得十分重要。

参考文献:

- [1] 曲永新. 地下工程建设中潜在膨胀性岩体的工程地质问题[M]//岩体工程地质力学问题(五). 北京: 科学出版社, 1985. (QU Yong-xin. The engineering geological problems of swelling rock in underground construction[M]// Engineering geomechanics problems of rockmass (No. 5). Beijing: Science Press, 1985.(in Chinese))
- [2] ISRM Commission on Swelling Rocks. Suggest methods for rapid field identification of swelling and slaking[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1994, 31(5): 69 - 72.
- [3] 曲永新, 徐晓岚, 吴芝兰, 等. 中国东部泥质岩成岩胶结作用的工程地质研究[C]//中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室 1991 年报, 北京: 地震出版社, 1992: 1 - 18. (QU Yong-xin, XU Xiao-lan, WU Zhi-lan, et al. Engineering geological research on cementation of mudrock from Eastern China[C]//Annual Report 1991 of Engineering Geomechanics Laboratory Institute of Geology of Chinese Academy of Sciences. Beijing: Seismological Press, 1992: 1 - 18.(in Chinese))
- [4] 翟裕生. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (ZHAI Yu-sheng. Regional metallogeny[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [5] 叶同庆. 怒江、澜沧江、金沙江地区铅锌矿床特征和成矿系列[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1991. (YE Tong-qing. Research on the characteristic of Pb-Zn mine ore and the metallogenesis system in Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang region[M]. Beijing: Beijing Press of Science and Technology, 1991. (in Chinese))