

# 地下水封油库场区膨胀性蚀变岩的工程地质分析\*

袁广祥<sup>①</sup> 吴琦<sup>①</sup> 尚彦军<sup>②</sup> 黄志全<sup>①</sup> 崔江利<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>华北水利水电学院资源与环境学院 郑州 450011)

(<sup>②</sup>中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

**摘要** 地下水封油库作为国家的石油战略储备库,对库址区水文地质工程地质条件要求较高。然而,在实际的场区中,总是存在着各种不良地质体,直接影响着库址区的水文地质工程地质条件。本文以锦州地下水封油库为例,对地下水封油库场区膨胀性蚀变岩进行工程地质分析。场区的蚀变岩属中基性岩脉侵入的热液蚀变型,具有弱膨胀性。通过崩解试验,发现该蚀变岩具有一定的崩解性。通过岩矿薄片鉴定和 X 射线衍射分析,发现黏土矿物为蒙脱石。根据膨胀性蚀变岩的性质,地下水封油库在膨胀性蚀变岩段施工时应采取相应的治理措施。

**关键词** 地下水封油库 膨胀性蚀变岩 工程地质分析

中图分类号:P642 文献标识码:A

## ENGINEERING GEOLOGICAL ANALYSIS OF ALTERED ROCKS WITH EXPANSIBILITY IN UNLINED CAVERNS FOR UNDERGROUND OIL STORAGE

YUAN Guangxiang<sup>①</sup> WU Qi<sup>①</sup> SHANG Yanjun<sup>②</sup> HUANG Zhiquan<sup>①</sup> CUI Jiangli<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011)

(<sup>②</sup>Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029)

**Abstract** As petroleum strategic storages, unlined caverns for storage of oil need suitable hydrogeologic and engineering geological conditions. However, there are many bad geological bodies in the storage regions. They directly influence the hydrogeologic and engineering geological conditions in storage regions. In the paper, Jinzhou underground oil storages is considered as an example to analyze the altered rocks with expansibility in underground oil storages. There are many altered rocks in the region, and they belong to hydrothermal alteration by intrusion of basic dykes. The altered rocks have weak expansibility. It is found by disintegration test that the altered rocks can disintegrate. Through identification of minerals and rocks and X-ray diffraction analysis, it is found that clay mineral of the altered rocks is smectite. According to properties of the altered rocks with expansibility, the paper present control measures in the altered rock section during the construction of underground caverns for storage of oil.

**Key words** Unlined caverns for storage of oil, Altered rocks with expansibility, Engineering geological analysis

\* 收稿日期: 2010-03-04; 收到修改稿日期: 2010-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972198), 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目(200919).

第一作者简介: 袁广祥, 主要从事工程地质与地质灾害的研究与教学工作. Email: yuanguangxiang@ncwu.edu.cn

## 1 引言

为满足对石油的战略需求,许多国家制定了石油战略储备计划。由于地下水封油库与地上油罐相比存在着许多优点<sup>[1~9]</sup>,许多国家在制定石油战略储备计划时,将地下水封油库的建设提上了日程。地下水封油库是一种无衬砌洞库,利用周围水压力大于库室内油压力的方法储存石油,因此对库址区的水文地质工程地质条件要求较高<sup>[1]</sup>。

然而,实际的场区中总会存在着各种不良地质体,直接影响库址区的水文地质工程地质条件,如日本的串木野基地,在洞库建设过程中遇到了含黏土(热液蚀变)的断层破碎带,岩体质量降低,沿破碎带位移变化很大<sup>[10]</sup>。作者在对锦州地下水封油库进行工程地质评价时发现,场区岩体虽主体为花岗岩,但穿插其中的许多中-基性岩脉与花岗岩的接触带发生了热液蚀变,蒙脱石化,具有弱膨胀性。这种膨胀性蚀变岩对环境的温度、湿度、压力、地下水等因素的变化极为敏感,在地下洞室开挖中一旦暴露就极易风化干裂、卸荷胀裂、遇水软化膨胀,具有很差的工程地质性质。

在地下工程施工中,遇到膨胀岩时,经常发生围岩膨胀坍塌、偏压、支撑变形折断、隧底上鼓、衬砌开裂等严重病害<sup>[11~17]</sup>,对工程建筑物将产生很大的危害,严重影响工程的稳定性。

迄今为止已发现存在膨胀岩的国家和地区达40多个,遍及五大洲,涉及到铁路、公路、水利水电、矿山、房屋地基等所有工程类型<sup>[11~25]</sup>。但在地下水封油库施工及运营过程中,有关膨胀岩的工程地质问题却鲜见报到。因此,本文以锦州地下水封油库为例,对地下水封油库场区膨胀性蚀变岩进行工程地质分析。

## 2 蚀变岩的成因

锦州地下水封油库场区岩体的主体为花岗岩,许多中-基性岩脉穿插其中并在与花岗岩的接触带发生了蚀变。为了探讨这些蚀变岩的成因,首先进行了岩石矿物薄片鉴定。穿插于花岗岩体中的酸性和基性岩脉、岩墙有辉绿岩、细晶花岗岩、花岗斑岩、闪长玢岩、安山玢岩、煌斑岩等。岩脉分布很不均匀,且厚度从几厘米到十几米不等,其中基性岩脉较为发育,应该是多次岩浆活动的产物。个别岩脉与

花岗岩在深部的接触带关系如图1所示。通过对地表122条基性岩脉进行统计,发现岩脉的走向主要以近SN向为主,其中30°左右缓倾岩脉最为发育(图2)。



图1 钻孔ZK3中基性岩脉与花岗岩的接触关系  
Fig. 1 Contact between basic dykes and granite in ZK3

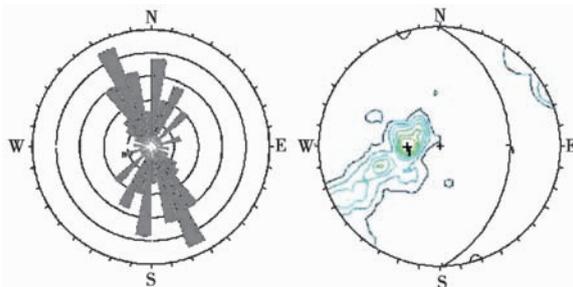


图2 基性岩脉走向玫瑰花图和极点等密图  
Fig. 2 Strike rose and pole isopycnic diagram of basic dykes

在岩脉侵入部位,不仅节理发育,且热液往往使中-基性岩脉和花岗岩的接触带发生蒙脱石化蚀变。如图3所示,沿断层分布的微晶闪长岩岩脉,经室内XRD测试结果显示该岩脉黏土矿物成分中含蒙脱石(15%)、高岭石(5%)、石英(10%)和少量伊利石,具有弱膨胀性(图4)。

场区地下水的pH值平均值为8.37,属于弱碱性环境。伴随基性岩浆侵入,热液沿陡倾节理产生了蚀变作用,在花岗岩与岩脉接触带形成热液蚀变带,包括基性岩脉的蚀变带和基性岩外接触带花岗岩的蚀变作用。由于基性岩浆富含 $Mg^{2+}$ ,在碱性的条件下易形成蒙脱石化蚀变带,造成在深部完整岩体中局部出现类似强风化的岩石,但这与表层风化岩体的形成机理完全不同,应是与风化营力无关的黏土化现象。在油库建设的过程中不能把蚀变岩当成风化岩体来处理。以钻孔ZK9为例(图5),95m



图3 沿断层分布的微晶闪长岩岩脉

Fig. 3 Distribution of microcrystalline diorite dykes along a fault

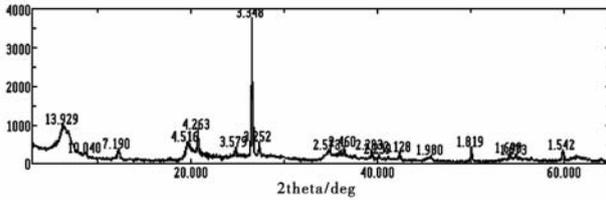


图4 蚀变微晶闪长岩黏土成份 X-射线衍射图谱

Fig. 4 X-ray diffraction of altered microcrystalline diorite

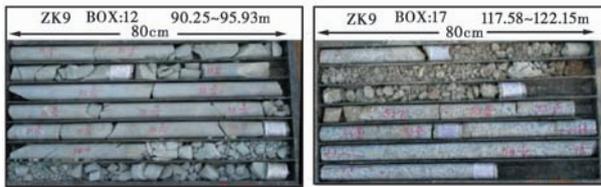


图5 钻孔 ZK9 中的蚀变现象

Fig. 5 Alteration in borehole ZK9

深度处基性蚀变岩脉破碎成碎石土,岩芯采取率非常低,岩芯箱中完整蚀变岩很快因干燥收缩呈土状,其附近的岩体节理非常发育, *RQD* 仅在 10% 左右; 在 117 ~ 120m 深度范围钻孔取出的花岗岩岩芯成砂砾状,部分为碎块。

### 3 膨胀性蚀变岩的特性

为了对油库场区蚀变岩进行判别和分类,从而对油库区蚀变岩的工程特性有个基本了解,在钻孔 ZK2 的 150.85 ~ 150.90m 深度处取强蚀变基性岩试样进行崩解测试和矿物成分测定等。

#### 3.1 蚀变岩的崩解特性

此段岩样呈砂砾土状,个别见 5 ~ 10cm 直径的块状胶结岩块,用两块风干岩块测定其崩解特性。如图 6,较大岩块为黄绿色,小岩块为深灰色。把两

块试样用线绑好,按先后顺序分别放到烧杯中用自来水浸泡,岩块浸水后马上开始强烈吸水并有气泡析出,同时有鳞片状和颗粒状碎屑剥落、分散,崩落到杯底的小块体继续湿化成砂砾状散体。大约 10min 后崩解速度变缓甚至停止;在水中浸泡 7h 后岩块的内部即残余岩体不再发生崩解,这是蚀变岩中游离子氧化物胶结作用的结果。

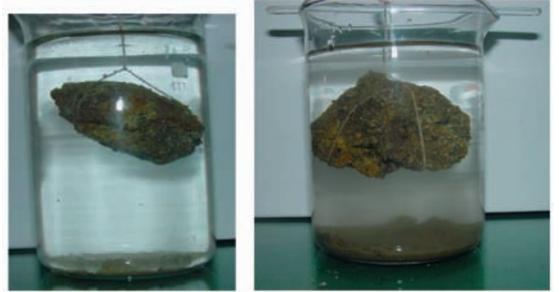


图6 蒙脱石化闪长岩脉浸水崩解试验

Fig. 6 Disintegration test of diorite dykes

#### 3.2 黏土矿物的测定

在 ZK2 钻孔的 152 ~ 154m 深度分别取两块中度蚀变和新鲜的岩脉岩石做薄片鉴定以确定该岩脉的原岩岩性。蚀变母岩为闪长岩,中蚀变试样的主要矿物成分为普通角闪石、中长石(表 1)。中长石的化学组成为富含钠钙而贫钾和镁的硅铝酸盐,为易分解的矿物;角闪石是抗蚀变抗风化性能稳定的矿物,因此在闪长岩脉侵入过程中,在充足的挥发份和残余热水溶液作用下,随着中长石中钠钙离子的分解和析出而使溶液呈碱性,导致了脱硅作用的发生,并从介质中吸收水分子和化学性质较活泼的镁离子,进而结晶成新矿物蒙脱石,但由于贫钾而不能形成伊利石。

表 1 蚀变原岩成分鉴定

Table 1 Component of altered rock

编号	名称	主要成分	副矿物	次生矿物
a	细粒含黑云母闪长岩	更-中长石 (55%~60%) 普通角闪石 (35%~40%)	黑云母 (2%) 磁铁矿 磷灰石	绿泥石
b	细粒辉长闪长岩	更-斜长石 (55%~61%) 普通角闪石 (25%~30%)	黑云母 (少量) 磁铁矿 磷灰石	绿泥石

为了确定黏土矿物组成,对蚀变样品干燥后加分散剂和超声处理后,提取出小于 2 $\mu$ m 的黏土矿物颗粒,对其进行 X 射线衍射(图 7)。其黏土矿物为

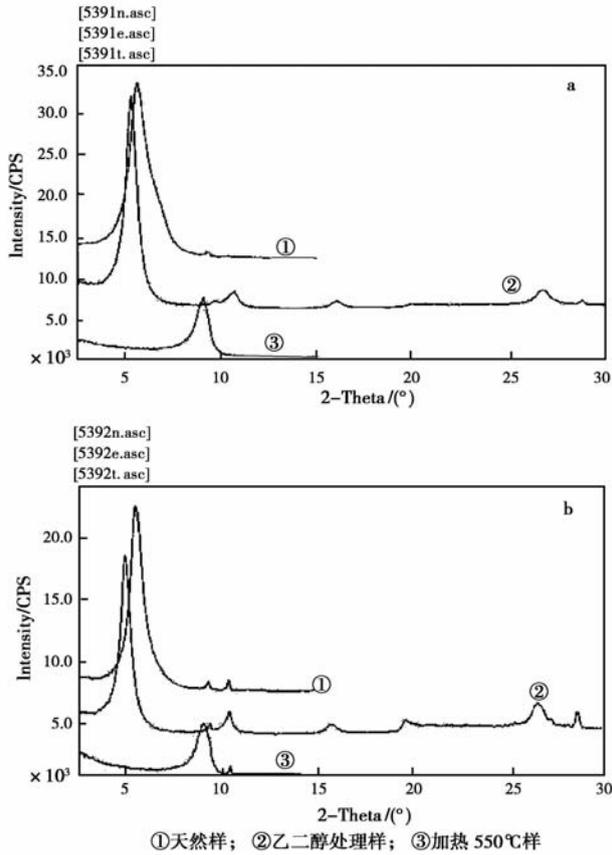


图7 样品小于2微米颗粒黏土矿物当量X-射线衍射谱  
Fig. 7 X-ray diffraction of clay mineral  
(less than  $2\mu\text{m}$  diameter)

蒙脱石,其他黏土矿物不存在或含量极低。

### 3.3 膨胀性评价

为对地下水封油库区膨胀性蚀变岩的膨胀性进行评价,采用曲永新提出的“干燥饱和吸水率”指标进行评价。“干燥饱和吸水率”指标系绝对干燥的岩块,在水中所吸附的非重力水的百分数,是泥质岩黏土矿物组成(特别是蒙脱石含量)、物理化学性质和成岩胶结特性的综合反映,数值越大膨胀势越高(表2)<sup>[26]</sup>。

表3 中性火成岩侵入体蚀变岩工程特性及矿物成分测试结果

Table 3 Engineering characteristics and mineral composition of altered rock

编号	干燥岩块 浸水崩解现象	岩块干燥饱和 吸水率/(%)	岩粉吸水率 /(%)	胶结 系数	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	矿物组成/(%)				工程地质定名	膨胀性
						斜长石	角闪石	滑石	蒙脱石		
a	外层快速崩解, 内层未破坏	30.54	56.90	1.86	298.23	6.0	18.0	√	75.6	蒙脱石化蚀变岩	弱膨胀性
b	外层快速崩解, 内层未破坏	30.78	60.18	1.96	229.05	11.0	28.0	√	61.6	蒙脱石化蚀变岩	弱膨胀性

注:(1)纯蒙脱石比表面积为 $808\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ; (2)胶结物可能为滑石等蚀变矿物; (3)岩粉为小于 $0.25\text{mm}$ 碾磨颗粒; (4)蒙脱石含量测定采用次甲基蓝选择吸附法(化学法); (5)胶结系数是指岩粉的干燥饱和吸水率与岩块干燥饱和吸水率的比值,数值越大性质越稳定。

场区钻孔岩脉蚀变岩样品的物理和水理性质见表3。岩块的干燥饱和和吸水率均值为30.66%,胶结系数均值为1.91,蒙脱石含量25.66%~39.24%,比表面积 $229.05\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1} \sim 298.28\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,综合上述各指标可以判定试样为弱胶结(弱胶结)的弱膨胀性软岩。

表2 泥质岩成岩胶结系数与岩石强度和崩解耐久性关系  
Table 2 The relationship between degree of cementation  
and rock strength & disintegration

成岩胶结系数	胶结程度	单轴抗压强度/MPa	崩解耐久性
1~2	弱胶结	0.4~15.0	极差
2~5	中等胶结	10.0~25.0	差
5~10	强胶结	20.0~30.0	较差
>10	极强胶结	30.0~75.0	稍差

## 4 防治对策

膨胀性蚀变花岗岩的力学性质较原岩显著降低,与全强风化岩的力学性质接近,尤其在干湿变化的环境下,浸水后又具有膨胀的特殊性,进一步恶化了膨胀性蚀变岩的工程性质。由于膨胀性蚀变岩的上述性质,因此在锦州地下油库修建时,储油洞室在膨胀性蚀变岩发育地段可能发生坍塌、偏压、大变形等病害,处理不当将给工程带来巨大的经济损失,严重影响施工进度和威胁人员的生命安全。由于蒙脱石化蚀变花岗岩浸水后迅速膨胀,48h内膨胀基本完成,且膨胀主要发生在表层,通常在深度超过15cm后膨胀性就很微弱了,这就要求施工期间对膨胀性蚀变岩的处理要及时得当。

潜在膨胀性岩石,尤其是地下水位之下的潜在膨胀性岩石,只要不发生风干脱水作用,或者湿度损失不超过临界值,尽管有水的作用也不会产生膨胀变形。因此,风干脱水作用是潜在膨胀性岩石产生膨胀变形所不可缺少的先决条件。鉴于此,在遇到

蒙脱石化膨胀岩地段,为了减少膨胀灾害,应采取有效措施来减少或避免蒙脱石化蚀变岩给油库洞室造成的潜在危害<sup>[27]</sup>。

根据油库区蚀变岩发育特征和分布规律,结合前期地质勘察成果,开展工程地质综合超前地质预报,主要可以采取深入细致的地质编录和水平超前钻与 TSP 等物探方法结合,参照膨胀岩的快速判别及时查清蚀变岩的分布及规模、性状。在蚀变岩出露段则宜采用微台阶法施工,少爆、多挖,减少扰动,并及时采取锚喷(网)联合支护,根据蚀变岩的厚度加长超前支护导管的长度。在喷浆前最好采用干洗,如以水冲洗岩面后,则必须将已膨胀松弛的蚀变岩清理干净。如在蚀变岩带附近有沿裂隙渗出的地下水,在喷浆前要打排水孔引导出来。在 2d 后先喷一层厚度小于 5cm 的砂浆保护层。用干钻造孔插锚杆。在蚀变岩较或密集处,锚杆应穿过蚀变带深入 1~2m 的深度,并加垫板后挂网。在半个月或 20d 后达到设计喷层厚度。喷层厚度除满足一般喷锚设计要求外,需考虑膨胀力的大小,使围岩基本上恢复到开挖前的状态,使蒙脱石化蚀变岩的膨胀变形真正起到约束作用,达到围岩稳定的目的。在强烈蚀变地段喷锚支护难于解决围岩稳定的问题,必须采用 40cm 厚的钢筋混凝土衬砌,并进行回填灌浆,打排水孔将地下水引到两侧排水沟,混凝土的衬砌应具有足够的强度承受山体压力和膨胀力。

## 5 结 论

锦州地下油库场区的膨胀性蚀变岩多是由于中基性岩脉沿结构面侵入过程中发生热液蚀变形成的,表现为热液蚀变带。发生蚀变后岩体破碎,不论是岩脉本身还是与其接触的花岗岩,均呈碎块状,用手直接可以捻碎。

从闪长岩脉蚀变样品的分析结果来看,蚀变类型为蒙脱石化,岩块干燥饱和吸水率为 30.66%,具有弱膨胀性。由于黏土化蚀变岩的一个显著特点是在保持原状含水量条件下,其力学强度和性质并不明显恶化,但在失水后又吸水的情况下其力学强度急剧降低,且具有膨胀性,膨胀性尤以蒙脱石化最为严重。因此,油库开挖遇到蚀变岩时应尽量少爆、多挖,减少扰动,应及时采取锚喷(网)联合支护,根据蚀变岩的厚度加长超前支护导管的长度。

## 参 考 文 献

- [1] 袁广祥, 尚彦军, 史永跃, 郭书太. 与地下石油储备库有关工程地质问题研究现状和对策[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 792~799.  
Yuan Guangxiang, Shang Yanjun, Shi Yongyue, Guo Shutai. Engineering geological problems and measurements for underground storage of oil and gas in rock caverns. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 792~799.
- [2] Broch E. Use of the underground in Norway[A]. In: Nilsen, B. and Olsen, J. Proceedings of the International Conference of Storage of Gas in Rock Caverns[C], Trondheim, 1989, 3~13.
- [3] 李建中. 我国建设盐穴地下储库工程的可行性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增): 2254~2256.  
Li Jianzhong. Feasibility of underground salt cavern storage. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S1): 2254~2256.
- [4] 杨森, 于连兴, 杜胜伟. 地下洞库作为国家原油储备库的可行性分析[J]. 油气储运, 2004, 23(7): 22~24.  
Yang Sen, Yu Lianxing, Du Shengwei. Feasibility of underground caverns as crude oil storages. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(7): 22~24.
- [5] Bengt Siüsteen. Underground oil storage in Sweden[J]. Endeavour, 1979, 3(4): 158~162.
- [6] Asociacion Espanola de Tuneles Y Obras Subterranas(AETOS). Underground works and the environment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 197~204.
- [7] 中国科学技术情报研究所编. 出国参观考察报告: 编号(79)004: 西德、法国地下石油库建设技术[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1979.  
Institute of Scientific & Technical Information of China. Report on Visit and Inspect Abroad(79)004: Construction Technique of Underground Oil Storages in West Germany and France. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1979.
- [8] Ake Tauson, Han Rockstrom and Lennart Johansson. The building proprietor's experience in designing and construction of rock store plants for petroleum products. Storage in excavated rock caverns: Rockstore 77: Proceedings of the First International Symposium, Stockholm, 1977, 43~48.
- [9] 21世纪中国石油发展战略——中国石油论坛报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.  
Development Strategy of Chinese Petroleum in the 21th Century——Report on Chinese Petroleum Forum. Petrolie Industry Press, 2000.
- [10] Toshiaki Makita, Yoshiharu Miyayaga, Keiji Iguchi and Teruyoshi Hatano. Underground oil storage facilities in Japan, Engineering Geology. 1993, 35(3~4): 191~198.
- [11] 张金富. 膨胀性软质围岩隧道的施工处理与定量性判别指标的初步探讨[J]. 工程勘察, 1987, (2): 21~27.  
Zhang Jinfu. Tunnel construction under swelling wall rock and preliminary study of its quantitative indicators of discrimination. Engineering Investigation, 1987, (2): 21~27.

- [12] H. Grob. Swelling and heave in Swiss tunnels[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1975, **14**(1): 55 ~ 60.
- [13] 李朝晖, 李永丰. 膨胀性围岩隧道工程病害述评[J]. *西部探矿工程*, 2002, (5): 83 ~ 84.  
Li Chaohui, Li Yongfeng. Assessment of defects in a tunnel embedded with swelling surrounding rocks. *West-China Exploration Engineering*, 2002, (5): 83 ~ 84.
- [14] R. Selmer-Olsen. Tunnel collapses in swelling clay zone [J]. *Tunnel and Tunnelling*, 1989, (11): 49 ~ 51.
- [15] 刘冀山. 引黄入晋工程中的膨胀岩及其工程设防[J]. *工程地质学报*, 1996, **4**(2): 57 ~ 62.  
Liu Jishan. The dilative rock and its prevention of the diversion tunnel for directing the Huanghe River in to Shanxi province. *Journal of Engineering Geology*, 1996, **4**(2): 57 ~ 62.
- [16] 张颖军, 王小军. 云台山隧道膨胀岩的膨胀特性[J]. *中国铁道科学*, 1994, (2): 96 ~ 106.  
Zhang Yinjun, Wang Xiaojun. Expansive properties of the rock strata in yun taishan tunnel. *China Railway Science*, 1994, (2): 96 ~ 106.
- [17] 王小军. 膨胀岩的判别与分类和隧道工程[J]. *水文地质工程地质*, 1995, **22**(2): 44 ~ 48.  
Wang Xiaojun. The discrimination and classification of swelling rocks in tunnel engineering. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1995, **22**(2): 44 ~ 48.
- [18] 范大林. 膨胀岩侧限膨胀本构关系试验研究及其在红山窑工程中的应用[D]. 南京:河海大学, 2004.  
Fan Dalin. Study on Confined Swelling Constitutive Relationship for Swelling Rocks and Its Application on Hongshangyao. Nanjing: Hehai University, 2004.
- [19] S. L. Huang, N. B. Aughenbaugh, J. O. Rockway. Characterization of swelling potential of shale strata [A]. *Proc. of the 27th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Alabama* [C], 1986.
- [20] DE Jones and WG Holtz. , Expansive soils—the hidden disaster [J]. *Civil Engineering*, 1973, **43**: 49 ~ 51.
- [21] 曲永新. 对中国东部膨胀岩的研究[J]. *软岩工程*, 1991, (1, 2 合刊): 45 ~ 54.  
Qu Yongxin. Research on the swelling soft rock in the East China. *Soft Engineering*, 1991, (1-2): 45 ~ 54.
- [22] 曲永新, 吴芝兰, 徐晓岚. 武钢大冶铁矿东露天采场蒙脱石化中小型火成岩体蚀变岩(带)的工程地质研究. *工程地质力学进展*. 北京:地震出版社, 1994, 77 ~ 85.  
Qu Yongxin, Wu Zhilan, Xu Xiaolan. Engineering geological study on small altered igneous rocks in open pit quarry, Daye iron mine. *Progress of Engineering Geology Mechanics*, Beijing: Seismological Press, 1994.
- [23] 冯玉勇, 张永双, 曲永新, 黄常波. 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, Huang Changbo. Mechanism of embankment defects caused by expansive soils in Baise Basin, Nankun railway. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(4): 463 ~ 467.
- [24] 舒礼智, 曾凡珍, 李承通, 李冬平. 凤凰山铜矿区域性膨胀岩的地压控制[J]. *有色金属*, 1995, (4): 23 ~ 26.  
Shu Lizhi, Zeng Fanzhen, Li Chengtong, Li Dongping. Pressure control of regional swelling rock in Fenghuangshan copper mine. *Nonferrous Metals*, 1995, (4): 23 ~ 26.
- [25] 张永双, 曲永新, 刘景儒, 郭长宝. 滇藏铁路滇西北段蒙脱石化蚀变岩的工程地质研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(4): 531 ~ 536.  
Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Liu Jingru, Guo Changbao. Engineering geological research on altered rocks in the area of Nw Yunnan along Yunnan-Tibet railway line. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(4): 531 ~ 536.
- [26] 曲永新. 中国膨胀性岩、土一体化工程地质分类的理论与实践[A]. *中国工程地质 50 年* [C]. 北京:地震出版社, 2000. 140 ~ 164.  
Qu Yongxin. Theory and practice of engineering geology classification on swelling rocks and soils in China. In: *Fifty years of Engineering Geology in China*, Beijing: Seismological Press, 2000, 140 ~ 164.
- [27] 曲永新, 许兵, 时梦熊. 地下工程建设中潜在膨胀岩体的工程地质问题[A]. *岩体工程地质力学问题(五)* [C]. 北京:科学出版社, 1984, 89 ~ 100.  
Qu Yongxin, Xu Bing, Shi Mengxiong. Engineering geological problems of potential swelling rocks under construction of underground engineering. In: *Engineering Geomechanics of Rock Mass (5)* Beijing: Science Press, 1984, 89 ~ 100.