

# 金山店铁矿东区膨胀岩形成机理及预测

梅群力<sup>1</sup>, 陈清运<sup>2</sup>, 黄杰<sup>2</sup>, 彭静波<sup>2</sup>, 陈星亮<sup>3</sup>

1. 中国黄金集团新疆金滩矿业有限公司, 新疆 鄯善 838200;

2. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430074

**摘要:**为弄清金山店铁矿东区膨胀岩形成机理, 分别用X射线衍射仪、扫描电镜和电子能谱仪检测和鉴定膨胀岩中膨胀矿物的种类、含量及膨胀岩的原岩。检测和鉴定结果表明, 膨胀物主要是蒙脱石, 其次为伊利石和高岭石, 膨胀岩的原岩为石英闪长岩。在此基础上, 对东区工程地质特征、膨胀岩形成的物质基础和动力条件进行了系统分析, 揭示出膨胀岩体的低温热液蚀变、强膨胀岩体的地质构造、近矿强膨胀岩的热力接触变质等3种膨胀岩的形成机理, 并提出了下盘膨胀岩分布具有条带性、大理岩层缺失部位即为膨胀岩、膨胀岩的膨胀性与岩体的破裂程度呈正比的发育规律。根据研究成果, 预测膨胀岩主要分布在34-40勘探线间, 中间厚度在90 m左右, 具有两端薄中间厚的特点。

**关键词:**膨胀岩成因; 蒙脱石化; X射线衍射; 电子能谱仪; 电镜扫描

**中图分类号:** P624

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.004

## 0 引言

金山店铁矿东区自-270 m水平放顶以来, 由膨胀岩引起了一系列工程地质灾害。如, -340 m中段电梯因缩井而提前报废, -298 m、-312 m分段联络道与进路一掘即冒, 成巷率极低; -410 m中段矿石榴井几乎全部垮塌, 运输大巷多处出现大面积冒顶。根据塌陷地段及已揭露工程的地质调查分析, 东区膨胀岩体地段, 工程地质特征表现在: 膨胀岩体分布范围广, 断层和破碎带穿过的地段, 一般形成极强膨胀性岩体; 在节理分布稀疏基本完整膨胀岩体中开掘工程, 易于出现误判, 使得支护不及时或强度不够, 随着时间推移, 往往导致围岩出现大面积垮落。

曲永新等按成因将膨胀岩分为: 泥质类膨胀岩, 断层泥类膨胀岩, 含硬石膏、无水芒硝类膨胀岩, 蒙脱石化侵入岩类膨胀岩和蒙脱石化凝灰岩类膨胀岩<sup>[1-2]</sup>。在膨胀岩类鉴定上, 主要有矿物学法、岩石化学法、物理学法, 用得比较多的是前两种。曲永新按不规则岩块干燥饱和吸水率来判别岩石的膨胀性<sup>[3]</sup>, 朱训国以膨胀岩中亲水矿物含量, 并辅以岩块干燥饱和吸水率、极限膨胀量、极限膨胀力

指标进行岩石膨胀性分类<sup>[4]</sup>。

只有弄清东区膨胀岩形成机理, 才能正确预测膨胀岩分布范围, 为开拓、采准工程布置位置的选择, 及井巷工程支护方式确定提供依据。本文采用X射线衍射法检测膨胀岩中膨胀矿物的种类及含量, 使用电镜扫描法进行膨胀岩的岩相鉴定, 利用能谱法检测膨胀岩中元素的含量, 以此确定膨胀岩的原岩。在此基础上, 根据工程地质, 膨胀岩形成的物质基础和动力条件推断膨胀岩形成机理、发育规律, 并预测膨胀岩体分布范围。

## 1 工程背景

东区控矿层位有三迭系中统灰岩组( $T_2$ )和三迭系下统大冶群的第五岩性段至第七岩性段( $T_{1d}^{5-7}$ ), 主要由白云质灰岩和白云岩组成, 镁元素含量较高,  $w(MgO)=8.7\%\sim 8.76\%$ , 且地下水中 $Mg^{2+}$ 的含量也比较高。东区岩浆岩的原始岩浆属过渡型的碱钙性I型花岗岩浆, 它是燕山早期第二段第二次和燕山晚期第二次上侵活动形成的中浅成侵入杂岩体。围岩蚀变较强烈, 各蚀变带蚀变强度以控矿断裂、构造破裂带两侧强度最大, 而且蚀变强度与矿体规模有着一定的依赖关系。

东区围岩构造复杂,二级断裂较多.东区下盘围岩构造形迹主要表现为走向近东西的断裂带,可见四条相互平行排列的主干断层  $F_1\sim F_4$ ,对矿体下盘围岩破坏严重.层间滑动破碎带位于东区  $T_{2-3pq}$  与  $T_2+T_{1dy}$  地层分界线附近,在该两组地层间因岩性差异较大故发生滑动.破碎带产状与地层产状一致,沿破碎带磁铁矿化、矽卡岩化及蛇纹石化强烈,或被磁铁矿体、矽卡岩体所占据,两侧岩体碎裂厉害.成矿后挤压破碎带位于东区南侧 100 m 范围内,发育有 2~3 条东西走向的挤压破碎带.破碎带宽约 7~15 m,走向长 400~600 m,倾向南,倾角  $60^\circ\sim 75^\circ$ .该破碎带的特点是位移不大,岩石中节理裂隙纵横交错,特别是碳酸盐网脉每厘米可达 3~8 条,夹有糜棱岩 0.3~1 m.

矿体下盘岩浆岩本身并不含水,但是遇上规模较大、延伸较远的构造断裂而又沟通了含水带时,则可以产生突水.2006 年 8 月 24 日,-410 m 水平 175#W130 处巷道顶板出现涌水,涌水量  $25\text{ m}^3/\text{h}$ ,时间为 46d.2007 年 3 月 20 日,-410m 水平 180#S176 m 工作面突发涌水,涌水量高达  $170\text{ m}^3/\text{h}$ .东区下盘岩体节理裂隙发育,这些节理与断层存在水力联系,构成一个充水网络.根据钻孔不同深度取水样进行分析,地下水化学类型及矿化度见表 1.

由表 1 可知,相对于西区的 CK238 孔水文监测资料,可以看出,东区地下水中  $\text{Mg}^{2+}$  含量比西区高一倍左右.

表 1 地下水质分析  
Table 1 Quality analysis of the ground water

孔号	取样深度/m	矿化度/(g/L)	主要离子浓度/mmol/L						备注
			$\text{HCO}_3^{1-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^{1-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^{1+}+\text{Na}^{1+}$	
CK284	50	0.330	53.55	10.89	0.32	24.54	5.56	4.94	东区
CK398	300~600	0.812	12.82	75.13	0.28	22.30	5.30	6.98	东区
CK393	350	0.940	9.70	79.82	0.36	21.56	6.00	6.68	东区
CK238	300	0.817	15.80	69.50	0.62	34.80	3.15	0.07	西区

2 膨胀矿物与膨胀岩的原岩

2.1 膨胀矿物检测

在膨胀岩巷道工作面进行采样,分别选取完整岩样 5 块,编号 1~5,明显膨胀岩样 2 块,编号

6~7.采用 X 射线衍射法,检测膨胀岩中膨胀矿物的种类及含量.部分岩样检测频谱见图 1.

依据岩样 X 射线衍射检测结果,膨胀岩中矿物组分及含量见表 2.

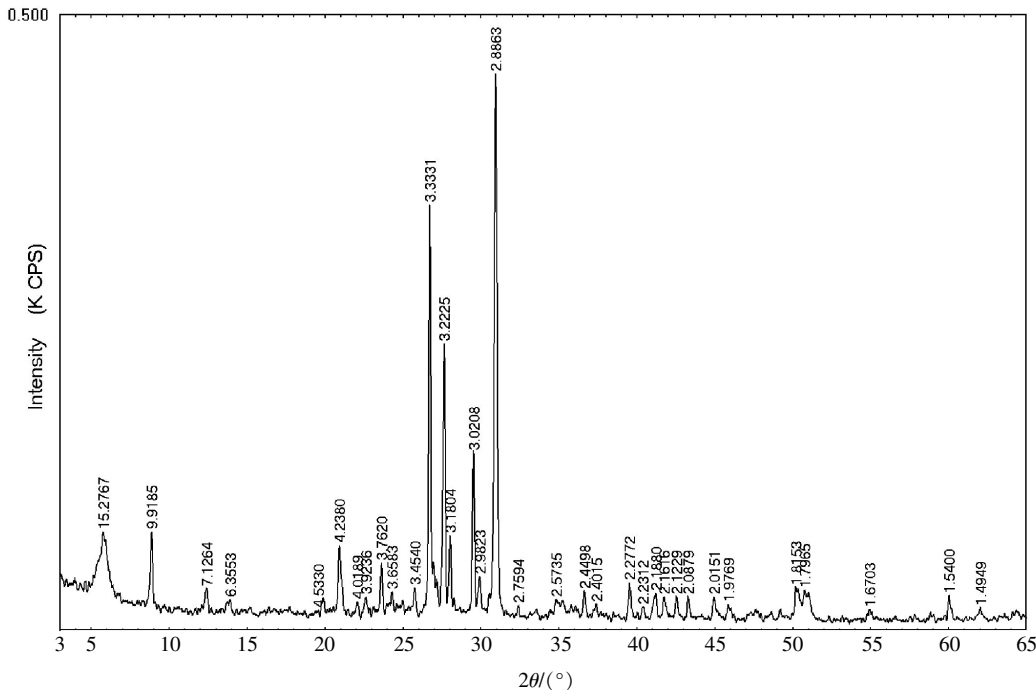


图 1 4# 岩样 X 射线衍射检测图谱  
Fig.1 X ray diffraction pattern of the 4# sample

表 2 膨胀岩矿物组分及含量

Table 2 Mineral composition and content of the expansive rock

w/%

岩样 编号	膨胀矿物			石英	长石	方解石	白云石	沸石
	蒙脱石	高岭石	伊利石					
1	15	0	0	36	44	2	0	3
2	20	5	10	32	12	18	3	0
4	15	5	5	24	18	10	23	0
6	40	0	0	28	32	0	0	0

由表 2 可见,岩样中膨胀矿物主要有蒙脱石、伊利石和高岭石,三者之和在 15%~40%之间,以蒙脱石为主。其中 6# 岩样是强膨胀岩,膨胀矿物全为蒙脱石。蒙脱石属强膨胀矿物,伊利石次之,高岭石再次。根据曲永新提出的分类标准<sup>[5]</sup>,蒙脱石含量大于 7%即为膨胀岩,因此上述岩样全为膨胀岩。

## 2.2 膨胀岩岩相鉴定

采用电镜扫描法,分别就 3#、5# 和 7# 岩样进行了岩相鉴定,其中 7# 岩样蒙脱石化严重,部分结果见图 2~图 3。

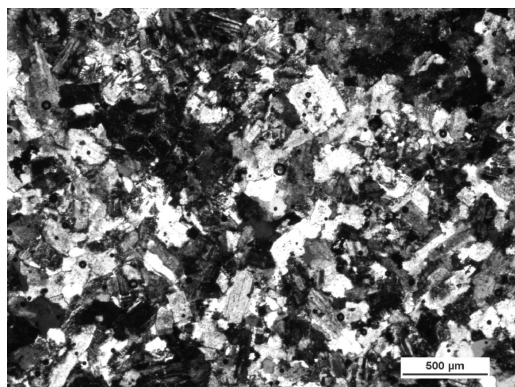


图 2 3# 岩样切片扫描结果

Fig.2 Slice scanning result of the 3# rock sample

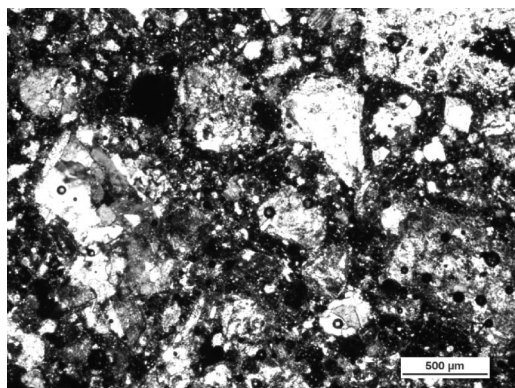


图 3 7# 岩样切片扫描结果

Fig.3 Slice scanning result of the 7# rock sample

鉴定结果为,岩样呈斑状结构,斑晶为斜长石(10%~15%),黑云母(10%),石英(5%);基质为斜长石(50%~70%),钾长石(2%~10%),石英(3%~10%)。综合各方面特征,膨胀岩原岩为石英闪长岩。

## 2.3 膨胀岩化学法检测

2.3.1 膨胀岩化学元素及含量 采用电子能谱仪(EDS)检测岩样中的化学元素及其含量,仪器型号ISM-5510LV。部分检测能谱见图 4~图 5。检测结果及分析见表 3。依表 3,进行岩样元素含量比对,见图 6。

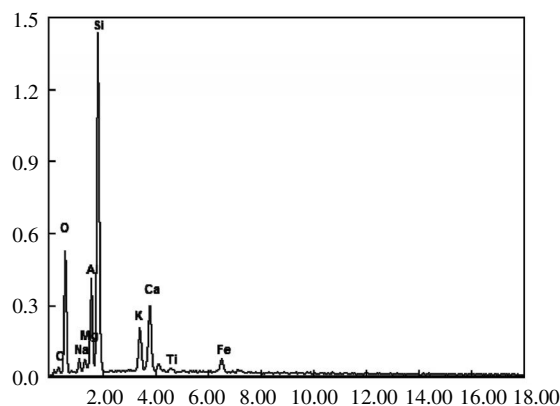


图 4 3# 岩样检测能谱图

Fig. 4 Energy spectrum of the 3# rock sample

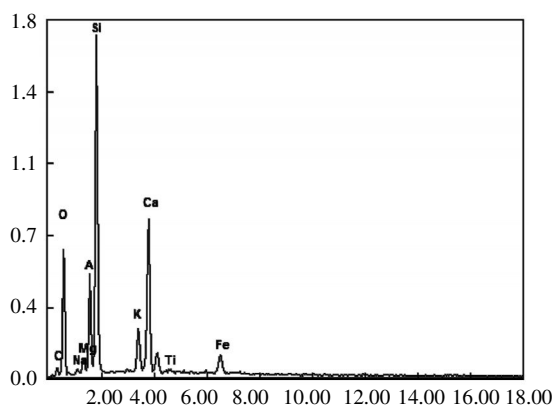


图 5 7# 岩样检测能谱图

Fig. 5 Energy spectrum of the 7# rock sample

由图 6 可见,3 种岩样所含元素含量走势基本一致,仅 Si、Ca、Al 等元素的含量差别较大。由于 7# 岩样比 3# 和 5# 岩样的蚀变强烈,表现出氧化铝的含量降低,而氧化镁含量增高的明显趋势,符合火成岩同晶置换时元素的变化规律性<sup>[6]</sup>。

表 3 岩样化学元素分析

Table 3 Chemical element analysis results of the rock samples

w/%

岩石试样	氧化硅	氧化铝	氧化钙	氧化镁	铁氧化合物	氧化钛	氧化钠	氧化钾
岩样/5#	66.81	19.98	2.61	1.98	1.60	0.73	2.23	5.48
岩样/3#	60.74	16.33	6.80	1.58	2.31	0.49	3.36	3.81
岩样/7#	52.76	16.12	12.81	3.37	2.80	0.37	1.33	3.20
3/5# 均值	63.78	18.16	4.71	1.78	1.96	0.61	2.80	4.65

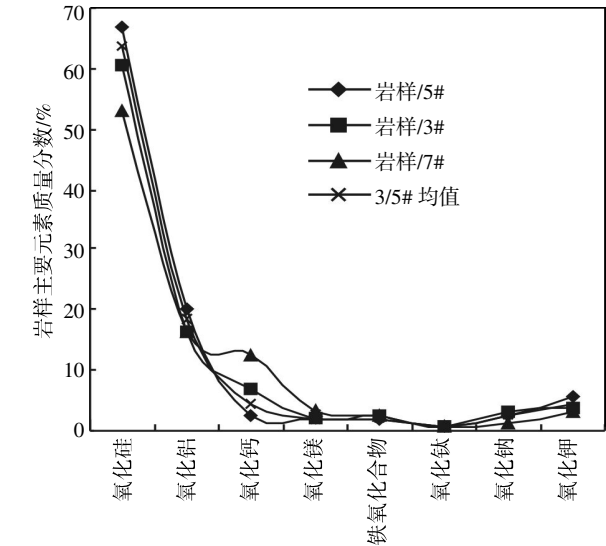


图 6 3#、5#、7# 岩样元素对比

Fig.6 Elements comparison of the 3#,5# and 7# rock samples

2.3.2 膨胀岩原岩的确定 膨胀岩主要元素分析,一般以元素的氧化物质量分数的形式表达. 依据表 3 检测结果与东区地质勘探报告上出现的三大类岩石进行氧化物比对,通过误差分析最后确定膨胀岩的原岩. 由于 7# 岩样蒙脱石化严重,使用 3# 和 5# 岩样元素含量均值与各种岩石进行比对. 参与比对的岩类有角岩、砂岩、页岩、砂卡岩、火成岩等类别. 部分岩类与岩样比对见图 7~图 9.

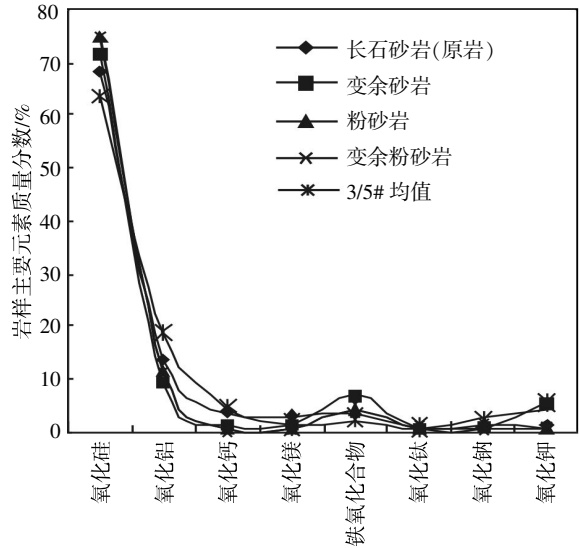


图 7 岩样与砂岩元素比对

Fig.7 Elements comparison of the rock sample and sand rock

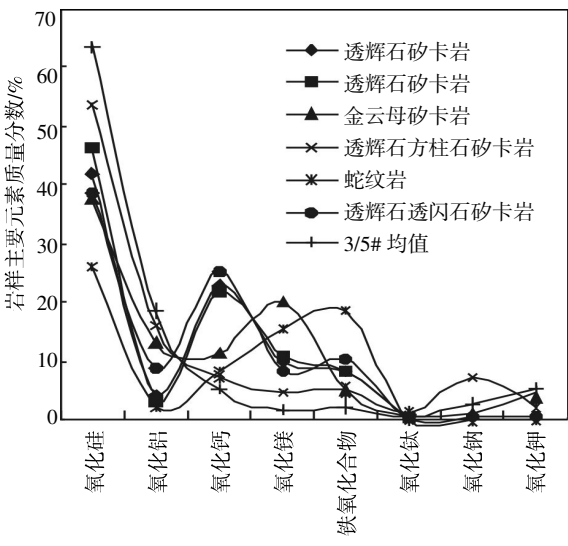


图 8 岩样与砂卡岩元素比对

Fig. 8 Elements comparison of the rock sample and skarn

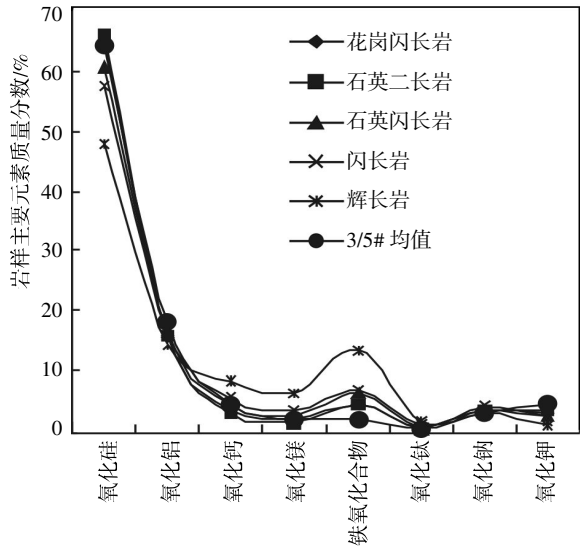


图 9 岩样与火成岩元素比对

Fig.9 Elements comparison of the rock sample and igneous rock

由图 7~图 9 可见,从变化趋势上来看,岩样与变质岩中的英长角岩、变余砂岩和泥质角岩比较吻合;岩样与砂卡岩比对的结果比较分散,基本上可以排除膨胀岩的原岩是砂卡岩的可能性;岩样与火成岩变化趋势一致. 为了进一步弄清膨胀岩的原岩,将上述初选岩石与岩样进一步进行比对.

将初选岩石、全部火成岩与岩样进行比对,根据误差大小,确定膨胀岩的原岩,结果见表 4.

表 4 火成岩、变质岩矿物含量与岩样比对结果

Table 4 Mineral content comparison of the samples, igneous rock and metamorphic rock

岩类	原岩与岩样	岩样元素质量分数/%								数据归一化后与 岩样比对方差
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
火成岩	花岗闪长岩	64.98	16.33	3.7	1.94	4.38	0.52	3.67	2.95	0.156
	石英二长岩	65.74	15.89	3.27	1.64	4.39	0.75	3.29	3.67	0.125
	石英闪长岩	60.51	18.2	4.63	1.64	6.33	0.73	3.08	2.65	0.196
	闪长岩	57.39	16.42	5.58	3.77	7.25	0.89	4.26	2.57	0.266
	辉长石	47.62	14.52	8.75	6.47	13.46	1.67	2.97	1.18	0.544
变质岩	英长角岩	58.57	17.22	5.11	2.88	5.80	0.78	6.75	3.00	0.356
	变余砂岩	71.47	9.46	1.25	1.70	6.58	0.58	0.68	5.42	0.372
	泥质角岩	60.18	15.42	3.14	3.12	4.92	0.85	2.55	2.27	0.329
	岩样 3/5 号均值	63.775	18.155	4.705	1.780	1.955	0.610	2.795	4.645	

为了避免因元素含量不同而影响方差的大小,将原岩和岩样中各元素氧化物的含量进行归一化处理,通过比对原岩与岩样的含量,计算其方差,以方差的大小确定其偏离程度.同时,考虑原岩在低温热液蚀变过程中表现出“失 Al<sup>3+</sup>增 Mg<sup>2+</sup>”的规律,及岩相分析的结果,进行综合分析,最后确定膨胀岩的原岩.由表 4 可见,岩样矿物检验结果表明,膨胀岩与东区出现的石英二长岩最接近,但岩相研究表明,岩样中钾长石与斜长石的含量差别较大,故可以排除石英二长岩的可能性.花岗闪长岩中的 Si 含量比岩样中 Si 含量高,可能性不大.岩样与石英闪长岩接近,符合“失 Al<sup>3+</sup>增 Mg<sup>2+</sup>”的规律.

综上所述,经比对,变质岩中最有可能成为膨胀岩体原岩的是泥质角岩,但均方差大于石英闪长岩比对的结果,由此可见,该膨胀岩体的原岩为石英闪长岩.

### 3 膨胀岩形成机理

#### 3.1 膨胀岩体的低温热液蚀变形成机理

东区矿体下盘围岩分别为二长花岗岩、石英闪长岩、大理岩和角岩,控矿地层和地下水中 Mg<sup>2+</sup>的含量比较高,在岩浆后期低温热液变质作用下,石英闪长岩(斑状石英闪长岩  $\pi\delta_{05}^{3b}$ )发生火成岩蒙脱石化蚀变,形成厚度达 80~100 m 的蚀变带,离矿体越近蚀变越剧烈.蒙脱石化的斑状石英闪长岩属于中膨胀性至弱膨胀性岩石,如果膨胀岩中节理裂隙充填膨胀剥蚀物厚度大于 5 mm,则变为强膨胀性岩石.

#### 3.2 强膨胀岩体的地质构造形成机理

东区下盘围岩构造复杂,二级断裂较多.下盘围岩中存在四条走向近东西的主干断裂带 F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>,

成矿后期发育有 2~3 条与 F<sub>3</sub> 或 F<sub>4</sub> 相平行排列的挤压破碎带,破碎带宽约 7~15 m,走向长 400~600 m,倾向南,倾角 60°~75°.这些结构面穿过东区下盘已蒙脱石化的石英闪长岩体,并与外界构成水力联系.发生碳酸盐化、绿泥石化、赤铁矿化和片理化,形成断层泥、破碎带、层间滑动带、矿岩接触带类膨胀岩类型.破碎带、断裂带、矿岩接触带、及充填于节理裂隙中的膨胀剥蚀矿物属于剧膨胀岩.

#### 3.3 近矿膨胀岩的接触热力变质形成机理

近矿围岩,由于有铁质元素参加,主要发生接触热力变质作用、接触交代变质作用,形成绿泥石化膨胀岩,厚度在 5 m 左右.近矿围岩蚀变较强烈,各蚀变带蚀变强度以在控矿断裂、构造破裂带两侧强度最大,而且蚀变强度与矿体规模存在一定的依赖关系.沿矿岩接触带磁铁矿化、矽卡岩化及蛇纹石化强烈,或被磁铁矿体、矽卡岩体所占据.

### 4 膨胀岩体发育规律及预测

经工程地质调查分析,膨胀岩体发育表现出一定的规律性:

a.大理岩层被石英闪长岩侵占缺失,该处石英闪长岩易于蚀变为膨胀岩.地质报告表明,大理岩层位比较稳定,除了被 F<sub>3</sub> 断层错断,其他部位都是比较完整的.该层平均厚度 40~70 m,最宽 90 m.因此,膨胀岩范围可以藉此尺寸进行圈定.

b.膨胀岩分布的条带性.现场调查结果表明,近矿膨胀岩蒙脱石化强烈,属剧膨胀岩,厚度在 5 m 左右,远离矿体的膨胀岩蒙脱石化逐渐减弱,表现出较强的条带性;近东西向切割膨胀岩体的断层、破碎带,本身表现为粉状膨胀岩,属于剧膨胀岩.近断层和破碎带岩层为碎裂状膨胀岩体,远离之则为块状膨胀岩体.

c.膨胀岩的膨胀性与岩体的破裂程度有关.受地质构造运动的影响,蒙脱石化的岩体破裂程度不一致,节理裂隙发育地段,膨胀岩蒙脱石化强,表现出剧膨胀岩、强膨胀岩的性质,相反,岩体完整地段,膨胀岩膨胀特性表现弱.

## 5 结 语

经 X 射线衍射试验、电镜扫描岩相鉴定和电子能谱测试,膨胀矿物主要是蒙脱石,其次为伊利石和高岭石,膨胀岩的原岩是石英闪长岩.

东区膨胀岩形成机理有:膨胀岩体的低温热液蚀变形成机理、强膨胀岩体的地质构造形成机理、近矿强膨胀岩的热力接触变质形成机理.

膨胀岩体发育表现出大理岩层被石英闪长岩侵占则极易形成膨胀岩,膨胀岩分布的条带性,膨胀岩的膨胀性与岩体的破裂程度呈正比.

## 致 谢

感谢国家自然科学基金委员会的资助!

## 参考文献:

- [1] 曲永新,张永双,杨俊峰,等.中国膨胀性岩、土一体化工程地质分类理论与实践[C]//中国地质 50 年.北京:地震出版社,2000.  
QU Yong-xin,ZHANG Yong-shuang, YANG Jun-feng, et al. The theory and practice of engineering geological classification of expansive rock and soil in China[C]//China Geology 50 Years. Beijing: Seismological Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 顾宝和,曲永新.劣质岩(问题岩)的类型及其工程特征[J].工程勘察,2006,34(1):1-7.  
GU Bao-he, QU Yong-xin. Types and engineering characteristics of poor bad rock (problem rock)[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] 曲永新,徐晓岚,时梦熊,等.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 Yong-xin, XU Xiao-lan, SHI Meng-xiong, et al. The engineering classification of mud rock and its rapid forecast of swelling power [J]. Journal of Hydrogeology and Engineering Geology, 1988(5): 36-39. (in Chinese)
- [4] 朱训国,杨庆.膨胀岩的判别与分类标准.岩土力学[J],2009,30(增刊2):174-177.  
ZHU Xun-guo, YANG Qing. Identification and classification of swelling rock. Rock and Soil Mechanics[J], 2009, 30(Suppl.2): 174-177. (in Chinese)
- [5] 张永双,曲永新,刘景儒,等.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 Yong-shuang, QU Yong-xin, LIU Jing-ru, et al. Engineering geological research on altered rocks in the area of NW Yunnan along Yunnan-Tibet Railway line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 531-536. (in Chinese)
- [6] 赵杏媛.粘土矿物在油气初次运移中作用的探讨[J].沉积学报,1990,8(2):67-73.  
ZHAO Xing-yuan. Discussion on the effect of clay minerals in primary migration of petroleum [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 67-73. (in Chinese)

## Formation mechanism and prediction of expansive rock at east area of Jinshandian iron mine

*MEI Qun-li<sup>1</sup>, CHEN Qing-yun<sup>2</sup>, HUANG Jie<sup>2</sup>, PENG Jing-bo<sup>2</sup>, CHEN Xing-liang<sup>3</sup>*

1.China Nation Gold Group Xinjiang Jintan Mineral & company, Ltd., Shanshan 838200, China;

2.School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To investigate the formation mechanism of the expansive rock at the east part of Jin Shandian iron mine, the types and their contents of the expandable mineral, the original rock in the expansive rocks were measured by using X-ray diffraction, scanning electron microscope and electron spectrometer. The test results show that the expandable minerals are mainly montmorillonite, followed by illite and kaolinite, and the original rock of the swelling rocks is quartz diorite. The engineering geological characteristics, the formation mechanism and the dynamic conditions of the expansive rock at east area were analyzed systematically. Three formation mechanisms: the low temperature hydrothermal alteration of expansive rock, the geological structure of strong expansive rock and thermal contact metamorphism of strong expansive rock near the mineral were suggested. The growth patterns of the expansive rock including the stripped distribution at the footwall, and the missing part of the marble stratum corresponding to expansive rock, and directly proportional relationship between the expansibility and the degree of fracture were also revealed. It is predicted that the expansive rock is mainly located in the 34–40 exploration line, with a distribution of the thickest part of 90 m in the middle, and thinnest part at the two ends.

**Keywords:** formation mechanism of expansive rock; montmorillonite; X ray diffraction; electron energy spectrometer; scanning electron microscope

本文编辑: 龚晓宁