

福建郭山高岭土矿床中 高岭矿物的研究

张天乐 王宗良

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037)

关键词: 高岭石 埃洛石 水铝英石 分析电子显微术 福建

提 要: 本文运用X射线衍射、红外吸收光谱、分析电子显微术和化学分析等多种方法对福建郭山高岭土矿床中的高岭矿物(高岭石和埃洛石)的矿物学性质、分布及矿物形成的阶段性变化进行了系统研究。结果表明, 根据高岭石和埃洛石相对含量的多少, 花岗岩风化剖面全风化带划分的4个矿物段可以反映这两种矿物的分布特点。埃洛石为具有管状和多面体球状的 7 \AA 型以及 10 \AA — 7 \AA 、 7 \AA -高岭石过渡型。高岭石晶体形态和结晶有序度在风化剖面垂直方向上的规律性变化与高岭石的形成经历了初始结晶——强烈高岭土化——风化作用后期的阶段性变化有关。

福建郭山高岭土矿位于同安县城至新圩一带, 构造位置处于长乐-南澳变质活动带边缘, 为二长花岗岩风化残积型。在我国南方广泛发育的该类型矿床中, 郭山高岭土矿床很具典型性。该矿床储量丰富, 规模巨大, 有广阔的开发利用前景。对高岭土有益粘土矿物组分高岭石和埃洛石进行的详细研究所获得的有关资料, 不仅充实了高岭矿物的矿物学内容, 具有理论上的意义, 而且从高岭矿物作为一种重要的工业矿物原料来看, 在高岭土的开发应用上也具有现实意义。

1 风化剖面特征及共生矿物

1.1 风化剖面特征

矿区广泛出露燕山期侵入岩(同安岩体)和各种脉岩。侵入岩主要是二长花岗岩、花岗闪长岩, 前者为成矿的主要原岩。该岩石中, 斜长石和钾长石含量达60%以上, 石英25%—40%, 黑云母一般 $<3\%$, 并含少量白云母以及磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿等副矿物。

对矿区郭山、前院和布塘三个矿段风化壳剖面的系统研究发现, 花岗岩原岩风化强度随深度增大而逐渐减弱。风化剖面自上而下划分为表土带、全风化带、半风化带和原岩(图1)。可供工业利用的高岭土矿石主要赋存于全风化带, 即主成矿带。该带在郭山矿段深可达50m, 为高岭土主要富集部位。矿石类型有花斑状、杂色和浅色高岭土。前两种高岭土靠近矿体上部, 厚约20—30m, 浅色高岭土一般位于矿体中下部, 与其下的半风化带呈逐渐过渡。

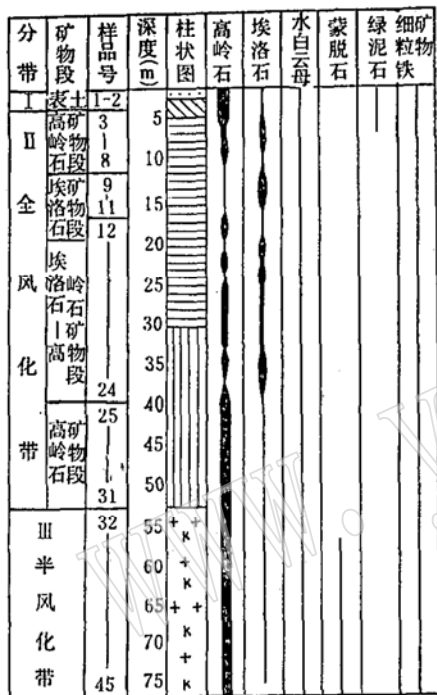
全风化带高岭石和埃洛石多半以混合物形式存在, 但其富集的程度不完全相同, 按其

相对含量的多少，由上而下划分为高岭石、埃洛石等 4 个矿物段，详见图 1。矿区 4 个矿物段的发育略有差别。矿物段的划分直观地反映出高岭石和埃洛石在各矿段风化剖面上的分布特点。

1.2 共生矿物

高岭土中斜长石的风化深度达 48 m，而钾长石的风化深度仅 10 多米。这由它们风化的难易程度所决定。白云母残留于高岭土较粗粒级中，但一部分转变为水白云母或具云母假象的高岭石。石英在各风化带都比较稳定。还发现有原生铁、钛矿物，但部分在表生条件下转变为含水铁氧化物。

经分析电子显微术发现的非晶质矿物水铝英石呈形态不规则的粒状或次圆球状，粒径约 0.03—0.10 μm (图版 I—1,A)。X 射线能谱分析(EDS)测得化学成分以 SiO₂ 和 Al₂O₃



1 花斑状高岭土；2 杂色高岭土；3 浅色高岭土；4 高岭土化花岗岩类

图 1 郭山高岭土矿床风化壳柱状剖面示意图 (郭山矿段, ZK 0026 钻孔)

Fig. 1. Diagrammatic columnar section of the weathering crust in the Guoshan kaolin deposit

1—花斑状高岭土；2—杂色高岭土；3—浅色高岭土；4—高岭土化花岗岩类

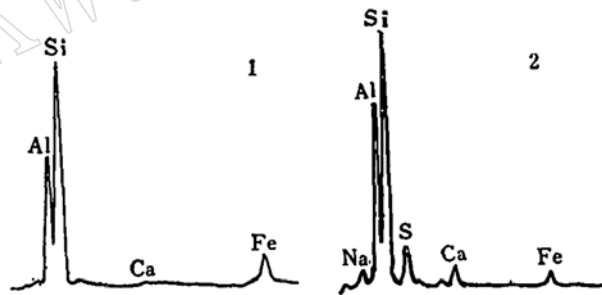


图 2 水铝英石(1)和钠蒙脱石(2)的 X 射线能谱图

Fig. 2 Energy dispersive X-ray spectra of allophane(1) and sodic montmorillonite (2)

为主，含少量 CaO、Fe₂O₃ 等杂质(图 2)。SiO₂/Al₂O₃ 克分子比值为 2.66:1，高于文献中报道的比值⁽¹⁾和高岭矿物的理论比值 2:1。这可能由硅铝凝胶通过化学作用而共同沉淀时过量的氧化硅引起。纤维状类晶质矿物伊毛缟石与水铝英石和高岭矿物密切共生⁽²⁾。钠蒙脱石产于风化壳下部，经 X 射线衍射分析，显示出特征的 12.54 Å (001) 反射。透射电镜下呈现出由极薄的片状晶体构成的云雾状背景，反映了矿物的高度分散性(图版 I—1, M)。EDS 分析表明它的主要化学成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃，并含少量 Na₂O、CaO、Fe₂O₃ 等

杂质(图2)。SiO₂/Al₂O₃克分子比值为2.46:1。钠蒙脱石的发现,说明在花岗岩风化早期阶段由于水循环不良而造成了局部碱性环境。风化壳顶部经X射线衍射分析发现有少量绿泥石的存在。

2 高岭矿物的矿物学特征

对矿区三个矿段具代表性钻孔(郭山矿段ZK 0026、布塘矿段ZK 391和前院矿段ZK 655等)系统采集的高岭土岩心样品进行了多种矿物物理学方法的测试研究。其中分析电子显微术(AEM)研究中,还利用了分析电镜EM 400 T的扫描装置,对较粗粒级(> 2 μm)样品进行了二次电子像(SEM)的观测。电镜加速电压为100 kV。矿物微区化学成分的X射线能谱分析(EDS)使用装配在EM 400 T中的EDAX 9100系统能谱

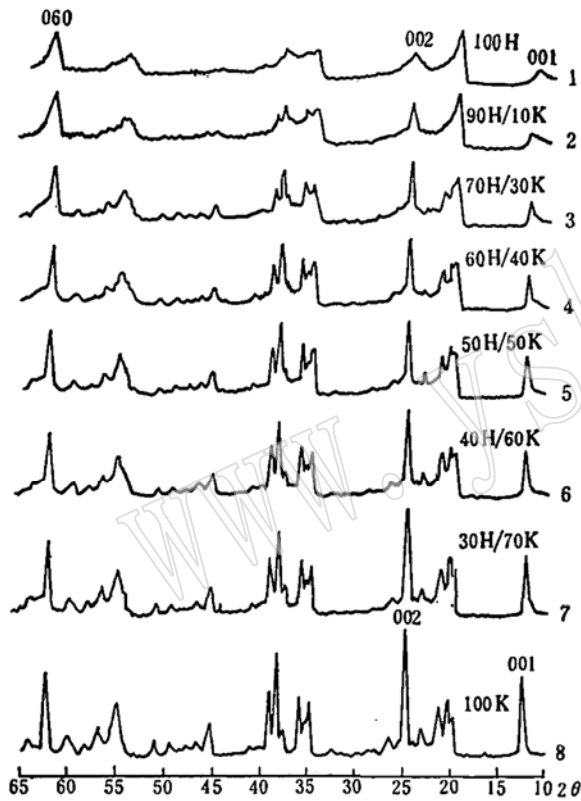


图3 高岭石和埃洛石按一定比例人工混合物的X射线衍射图

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of prepared mixtures of kaolinite and halloysite in the proportion indicated

仪,用无标样点分析法。结果表明,60%的埃洛石与40%的高岭石组成的混合物,其X射线衍射谱与结晶较差的高岭石的衍射谱相似。换言之,含量多达60%的埃洛石的反射峰会被40%高岭石的反射峰所掩盖(见图3)。由此看来,使用某些常规方法虽可测定高岭土中高岭矿物与伴生的其它矿物的相对含量,但由于高岭石与埃洛石在晶体结构和化学成分上的类似性,使得区分并测定它们相对含量的多少比较困难。G. W. Brindley等人的研究也证实了这一点^[3]。近年来,利用有机化合物与高岭矿物作用、能使埃洛石晶层膨胀而高岭石晶层保持不变的方法,也提供出一种解决问题的可能性^[4]。

2.2 混合物中高岭石和埃洛石相对含量的电镜观测

仪,用无标样点分析法。

2.1 混合物中高岭石和埃洛石相对含量的模拟实验

粘粒级(< 2 μm)纯净的薄片状高岭石是理想的纸张涂料。而管状埃洛石的取向性不好,影响纸浆的流动性和纸张表面的平整和光滑度。所以不论从高岭土的工业应用或矿物学研究等方面考虑,正确地估计高岭土中高岭石和埃洛石相对含量的多少极为重要。

风化型高岭土矿床中以混合物形式出现的高岭石和埃洛石在本区不同矿段或矿床不同部位其相对含量互成消长关系。本文以X射线衍射方法进行了人工模拟实验。选取苏州阳山高岭土矿床中结晶良好的高岭石和7 Å管状埃洛石样品按一定比例人工混合,在相同实验条件下进行实验。结果表明,60%的埃洛石与40%的高岭石组成的混合物,其X射线衍射谱与结晶较差的高岭石的衍射谱相似。换言之,含量多达60%的埃洛石的反射峰会被40%高岭

笔者以高岭石和埃洛石特征的晶体形态作为鉴别矿物的标志。制备出矿物颗粒分布均匀并具代表性的电镜观察样品,在透射电镜下客观地随机观察和拍摄,以区分和估计高岭石和埃洛石的相对含量。据此,将主矿体(全风化带)划分出上述4个矿物段,获得了主矿体中高岭石和埃洛石相对富集的信息,即郭山矿段高岭石含量多于埃洛石,布塘矿段两者相当,前院矿段埃洛石占绝对优势。

2.3 高岭石晶体形态和结晶有序度在风化剖面上的规律性变化

风化剖面下部半风化带中高岭石结晶有序度较差,在透射电镜下为晶形不完整、形态不规则的薄片状颗粒,粒径一般小于 $5\mu\text{m}$ (图版I-2),有的尚保留长石假象。X射线衍射图上除底面反射 $00l$ 较清晰以外, $02l-11l$ ($2\theta=19^\circ-25^\circ$)一组反射分裂较差, hkl 反射线数目少,强度弱(图4-5,6)。红外光谱图(图5-5,6)高频区 3700cm^{-1} 和 3626cm^{-1} 两个强吸收峰之间可分辨出 3652cm^{-1} 一个肩状吸收。

在全风化带中下部,高岭石结晶有序度逐渐完好。高岭石六方片状晶形清晰可见(图版I-3)。并且由于晶体层间键较强,足以形成粒度大于粘粒级的书册状或层叠状聚晶。图版I-3右下角为高岭石片状单晶的选区电子衍射花样(SAED)。在X射线衍射图上(图4-3、4),高岭石反射线数目增多, $02l-11l$ 一组反射中 $1\bar{1}0$ 和 111 反射分裂得较清晰。红外吸收光谱图高频区两个强吸收峰之间出现 3672cm^{-1} 和 3656cm^{-1} 两个肩状吸收(图5-3、4)。

全风化带上部高岭石矿物段和表土带中的高岭石多呈晶角圆滑的等度薄片状,粒径大

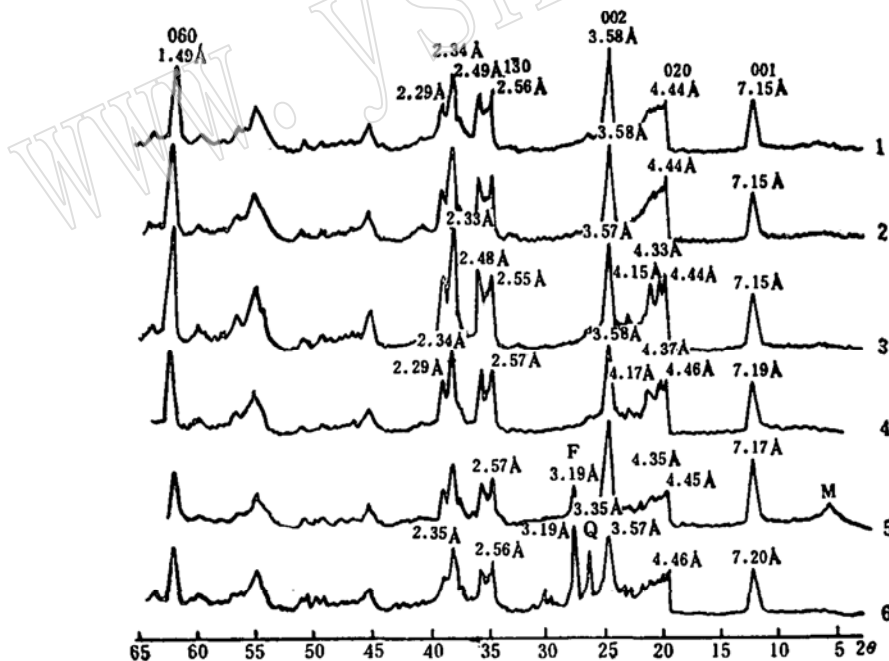


图4 郭山高岭土矿床各风化带高岭石的X射线衍射图

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of kaolinite from different weathering zones of the Guoshan kaolin deposit

1—长石; Q—石英。1—表土带,深0.20m,样品号:ZK 0026-1;以下为全风化带:2—深2.5m, ZK 0026-3; 3—深29.6m, ZK 0026-20 (TEM见图版I-3); 4—深40m, ZK 0026-25; 以下为半风化带: 5—深62.8m, ZK 0026-38; 6—深76.5m, ZK 0026-45。实验条件: $\text{CuK}\alpha$ 辐射, 电压40kV, 电流30mA

都小于 $1\mu\text{m}$ 。颗粒虽小,但假六方轮廓在高倍透射电镜下却清晰可见(图版 I—4)。它是 7\AA 埃洛石管体因脱水而破裂后重结晶的产物。同时,由 X 射线衍射(图 4—1,2)及红外吸收光谱分析(图 5—1,2)来看,都表明高岭石结晶有序度较低。

2.4 埃洛石的矿物学特征

埃洛石主要富集于全风化带埃洛石矿物段,其次在埃洛石-高岭石矿物段的粘粒级中。它与高岭石同属于二八面体 1:1 型层状硅酸盐,为非晶质水铝英石-埃洛石-高岭石这一形态结构系列中的一员,但因层间水的存在,使它在结晶有序度及晶体形态等方面具有一定的特征。

2.4.1 形态特征

经电镜观察(TEM)发现,埃洛石具有球状、管状以及因脱水而引起的破裂和展开的管状、多面体球状等形态。此外,也发现有梳状、绒球状和花瓣状等集合体外貌。形态变化与矿物的水化状态密切相关。非晶质水铝英石老化后一般首先转变为 10\AA 球状埃洛石。该矿床中球状埃洛石在高倍透射电镜下观察具有多面体状轮廓,球体直径仅 $0.1-1\mu\text{m}$ (图版 I—5)。经 X 射线衍射分析它不是 10\AA 型,而是 7\AA 型。这说明 10\AA 型球状埃洛石在向 7\AA 型转变之同时,矿物外貌也相应地发生了变化,球体因脱水引起的干燥和收缩产生了多面体状外貌。S. Tomura 等人(1985)^[5]关于球状高岭石的合成研究,也证实脱水可使球体外貌趋向于这种变化。同时,观察到从埃洛石球体表面剥落和卷曲成具有

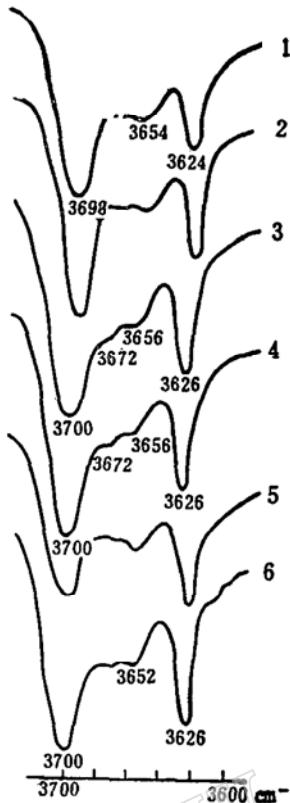


图 5 郭山高岭土矿床各风化带高岭石红外吸收光谱图(慢扫描)

Fig. 5 Infrared absorption spectra of kaolinite from different weathering zones in the Guoshan kaolin deposit

样品号同图 4。测试者:王宗明

部分管状形态的延长部分(图版 I—6)。这表明埃洛石球体与管体之间在成因上的联系。

管状埃洛石比球状埃洛石更常见到。但在风化剖面的不同部位,管体的大小和直径略有差异。全风化带顶部和表土带为短粗管状(图版 II—1),而中下部为细长管状。它们以脱水的 7\AA 型居多或为 $10\text{\AA}-7\text{\AA}$ 过渡型,纯 10\AA 型在本矿床中少见。

2.4.2 选区电子衍射分析(SAED)

球状 7\AA 埃洛石单晶(图版 II—2 左)的选区电子衍射图上(图版 II—2 右)出现 4.45\AA (020) 的强衍射环和 2.56\AA (130)、 1.48\AA (060) 的弱衍射环;而代表 $00l$ 反射的 7.38\AA (002) 和 3.60\AA (004) 则由清晰的衍射斑点组成。 7\AA 管状埃洛石单晶(图版 II—1)的 SAED 分析(图版 II—1, 右下)得到与球状埃洛石类似的结果, $d_{002}=7.28\text{\AA}$ 。破裂和展开的管状埃洛石(图版 II—3)的 SAED 图上,有 7\AA 埃洛石特征的 7.30\AA 较强衍射点,但同时也叠加了高岭石特征的六方对称的衍射斑点群,可以测得 2.56\AA (130) 以及它们共同的 4.45\AA (020)、 1.49\AA (060) 等。因此, 7\AA 管状埃洛石由于脱水而使其结

晶有序度提高,并向片状高岭石演化,通过破裂和展开的管体的 SAED 分析得到了证实。

2.4.3 X 射线衍射分析

短管状埃洛石定向样品 X 射线衍射图上(图 6—1、2),除 7.23 \AA — 7.26 \AA (001) 和 3.57 \AA (002) 两个较强的 $00l$ 反射以外, 10 \AA 的肩状反射峰明显可见,并且从 7 \AA 到 10 \AA 呈连续过渡的反射。由于埃洛石管状晶体的 C^* 轴垂直于管轴,其底面 (001) 不可能都平行于定向样品的衬底,因此与高岭石不同,其定向样品的 X 射线衍射图上除底面反射 $00l$ 以外,也出现了 02, 11 等非底面反射。球状埃洛石定向样品的情况与以上类似(图 6—4)。而非定向样品 02, 11 反射带的强度超过 001 反射的强度,001 反射峰变宽,显示出矿物二维结构的无序性(图 6—3)。上述自然脱水到 7.2 \AA 左右的反射,似乎与 10 \AA 型人工加热到 110°C 后形成的典型脱水型 (7 \AA) 埃洛石的反射类似,并与高岭石 $00l$ 面间距接近^[6]。

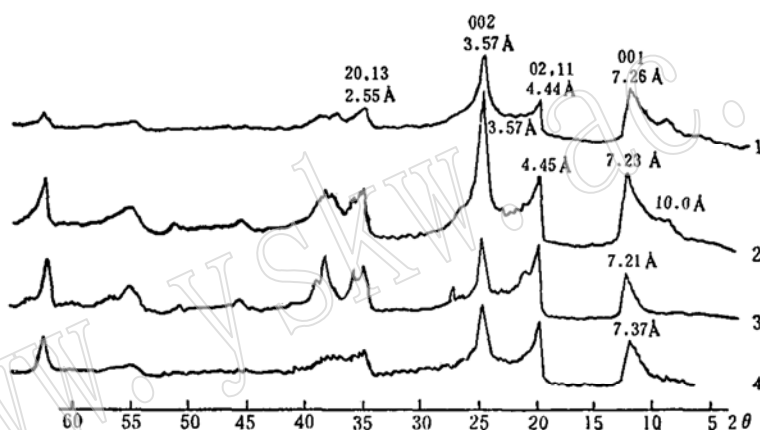


图 6 埃洛石的 X 射线衍射图

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of halloysite

1 和 2—管状埃洛石(定向片),深度分别为 6.4m 和 16.0m,样品号: ZK 391—9 和 ZK 391—15 (1 的 TEM 见图版 II—1); 3—球状埃洛石(非定向片),深度 14.65m, ZK 0026—11 (TEM 见图版 I—5); 4—球状埃洛石(定向片),深度 27.80m, ZK 655—16 (TEM 见图版 II—2)。实验条件同图 4

2.4.4 红外吸收光谱分析

上述埃洛石慢扫描红外吸收光谱图上高频区吸收谱带位置基本一致,在 3698 cm^{-1} 和 3624 cm^{-1} 波段附近,出现两个呈钳形的中强吸收谱带。其间为高岭石所特有的两个小吸收峰在埃洛石中一般趋于混灭(图 7—4)或难以分辨(图 7—1, 2)。但当埃洛石脱水和晶化或混有少量高岭石时,这两个小的吸收峰可隐约出现(图 7—3)。此外,在 3556 cm^{-1} — 3560 cm^{-1} 附近由层间水产生的弱吸收峰明显可见。

2.5 高岭矿物的化学成分

从郭山矿区 ZK 0014 钻孔表土带至高岭土化二长花岗岩不同粒级系统的化学分析中,选取高岭矿物集中的全风化带浅色高岭土 $< 2 \mu\text{m}$ 和 $2\text{—}5 \mu\text{m}$ 两个粒级的化学分析结果列于表 1。由表 1 看出,4 个高岭土样品的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 H_2O 三者之和为 96% 左右,与苏州阳山高岭土矿床中结晶良好高岭石(表 1, 样品号 5)和高岭石化学成分理论值(表 1,

表 1 高岭矿物的化学成分

Table 1. Chemical composition of kaolin minerals

样品号	成分													
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	总计	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂ Al ₂ O ₃
1	45.76	36.88	13.38	96.02	0.14	1.60	0.08	0.05	0.17	0.05	0.54	0.04	0.04	2.10
2	47.05	36.62	12.74	96.41	0.10	1.10	0.07	0.04	0.22	0.03	1.34	0.07	0.02	2.17
3	45.44	37.12	13.83	96.39	0.13	1.46	0.06	0.03	0.16	0.08	0.23	0.05	0.04	2.07
4	46.68	36.54	12.95	96.17	0.12	1.16	0.05	0.03	0.26	0.09	1.20	0.07	0.03	2.16
5	45.49	39.01	14.34	98.84	0.005	0.31			0.20					1.98
6	46.54	39.50	13.96	100.00										2.00

样品号: 1和2—钻孔 ZK 0014, 深度 16.84—23.42 m, 粒级分别为 <2 μ m 和 2—5 μ m; 3 和 4—深度 23.42—26.62 m, 粒级分别为 <2 μ m 和 2—5 μ m; 5—苏州阳山高岭土矿床结晶良好高岭石; 6—标准高岭石。分析者: 1—4 为福建省地矿局岩矿测试中心; 5—地矿部岩矿测试技术研究所



图 7 埃洛石的红外吸收光谱图(慢扫描)
Fig. 7 Infrared absorption spectra
of halloysite

样品号同图 6, 测试者: 王宗明

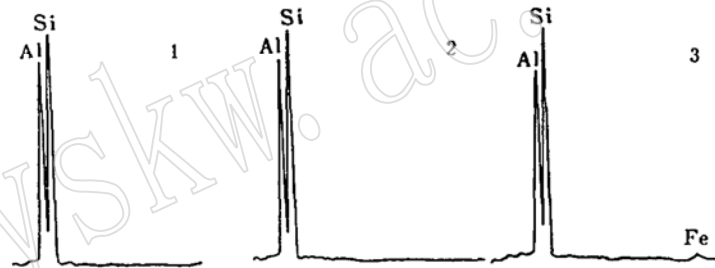


图 8 高岭石 (1)、管状埃洛石 (2) 和球状埃洛石 (3) 的 X 射线能谱图 (EDS)
Fig. 8 Energy dispersive X-ray spectra of
kaolinite (1), tubular halloysite (2) and
spherical halloysite (3)

样品号 6) 都比较接近, 其中杂质很少。因此, 可以代表高岭石和埃洛石的化学成分的特点。Al₂O₃ 含量稍低于高岭石理论值, 故 SiO₂/Al₂O₃ 克分子比值 2.07—2.17 稍高于高岭石理论值, 而与福建龙岩高岭土矿床中高岭矿物比较接近^[7], 世界各地高岭石该比值变化范围也较大 (1.82—2.33)^[8]。对这两种矿物也进行了 EDS 分析, 其主要化学成分和杂质成分的分析结果与表 1 所列基本吻合。其 EDS 图见图 8。

3 讨 论

3.1 高岭矿物矿物学性质的比较

郭山高岭土矿床中高岭矿物有高岭石、埃洛石及化学成分类似高岭石但为非晶质的水

表 2 高岭石、埃洛石和水铝英石矿物学性质的比较
Table 2. Mineralogical properties of kaolinite and halloysite in comparison with those of tlophane

高岭矿物 矿物学特征	高岭石	7 Å 埃洛石		10 Å 埃洛石	水铝英石
		破裂管状	管状 (具 10 Å 型假象)		
TEM 形态	不规则片状 假六方片状 具长石和云母假象	破裂和展开的管状 多面体管状	管状	多面体球状	不规则粒状 次圆球状
颗粒大小 (μm)	$< 2 \mu\text{m}$ 或 $2-5 \mu\text{m}$	管体长度大多 $< 2 \mu\text{m}$, 管径一般为 $0.1-0.3 \mu\text{m}$		球体直径一般 $0.1-1 \mu\text{m}$	颗粒直径约 $0.03-0.1 \mu\text{m}$
SAED 分析 b_0	4.4 \AA (020) 2.56 \AA (130)	7.26 \AA (002) ① 4.45 \AA (020) 8.90 \AA	7.28 \AA (002) 4.45 \AA (020)	7.38 \AA (002) 4.45 \AA (020) 8.90 \AA	
XRD 分析 (001) b_0	7.15 \AA	$7.23 \text{ \AA}-7.26 \text{ \AA}$ 8.91 \AA		$7.21 \text{ \AA}-7.37 \text{ \AA}$ 8.91 \AA	$10.0 \text{ \AA}-10.1 \text{ \AA}$
IR 分析 (cm^{-1})	出现 出现 出现 出现 缺乏	出现 缺乏 很弱 出现 出现		出现 缺乏或很弱 很弱 出现 出现	
化学分析和 EDS 分析	主要成分: SiO_2 Al_2O_3 , 少量的 TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO CaO , K_2O , Na_2O	主要化学成分与高岭石类似			主要化学成分为 SiO_2 , Al_2O_3 , 微量的 CaO , Fe_2O_3
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$		$2.07-2.17$			2.66

① 埃洛石在 SAED 图上的指标化, 可参阅文献 [7] P. 239

铝英石和类晶质矿物伊毛缟石。高岭石的结晶有序度在风化剖面的不同部位有所不同,全风化带有序度较高,半风化带和风化壳顶部有序度较差。高岭石的结晶形态和颗粒大小也随之发生变化。埃洛石以 7 \AA 型为主,也有 $10\text{-}7\text{ \AA}$ 或 7 \AA 埃洛石-高岭石过渡型。经研究发现,埃洛石的不同形态与矿物的水化状态有关(见表2)。

3.2 不同形态埃洛石的成因

关于不同形态埃洛石的成因, S. Tomura 等人(1985)认为^[5], 当埃洛石从非晶质火山玻璃形成时为球状, 而由长石或云母形成时仅为管状。本文及福建龙岩高岭土中粘土矿物的研究证实^[7], 球状埃洛石由水铝英石形成, 管状者除由长石高岭土化直接形成以外, 球状埃洛石的脱水和晶化也是管状埃洛石形成的一个重要途径。这说明管状埃洛石的形成方式比球状埃洛石更为多样。

3.3 高岭石形成的阶段性变化

郭山高岭土矿是湿热气候条件下花岗岩长期风化的产物, 因此可以认为, 高岭矿物的种类和组合、结晶有序度、晶体形貌及其变异性, 是花岗岩风化壳发育阶段的一个标志。

3.3.1 初始结晶高岭石的形成阶段

长石在水电离产生的 H^+ 离子作用下发生水解, 进行 $\text{K}^+ - \text{H}^+$ 交换, 而向高岭矿物转变, 在风化初期形成有序度较差的初始结晶高岭石。

3.3.2 有序度较好高岭石及埃洛石的形成阶段

风化的深入发展, 长石强烈高岭土化。半风化带中初始结晶高岭石向有序度较好高岭石转化, 导致主矿体高岭石的富集。在较粗粒级二次电子扫描照片上, 可看到长石溶解并生成各种形状溶蚀坑及书册状、叠片状高岭石聚晶(图版II-4、5)。在偏酸性水充分供应的地段, 埃洛石经过水铝英石相而形成, 或由长石水解直接形成。当高岭石薄片厚度减小到 50 \AA 或更薄时, 高岭石晶层键力不足以抵消层内应力, 晶片就从其边缘卷曲, A. Oberlin和C. Tchoubar^[9]已完成了高岭石薄片从其边缘卷曲而向管状埃洛石转变的实验研究。作者在电镜下观察到了高岭石薄片边缘卷曲而向埃洛石管体过渡的现象(图版II-6)。

3.3.3 风化壳发育后期埃洛石向高岭石的转化阶段

主成矿期后, 由于地质条件的变化, 潜水面下降, 风化壳上部处于失水状态, 埃洛石在长期的失水状态下脱水。从管体上剥落下来的晶体碎片, 充当了高岭石重结晶的籽晶。因而这种高岭石是 $2\text{ H}_2\text{O}(7\text{ \AA})$ 型埃洛石脱水和晶化的必然结果。这便是花岗岩风化壳顶部颗粒细小的等度鳞片状高岭石富集的原因。

笔者在野外地质调查期间曾得到福建省地矿局闽东南地质大队王文轩等同志的帮助, 室内测试得到本所黄家山同志的协助, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Sudo T, Shimoda S. Clays and Clay Minerals of Japan. Elsevier Sci. Pub. Co. 1978, 148.
- 2 张天乐、王宗良. 伊毛缟石在我国的首次发现及其分析电子显微术研究. 岩石矿物学杂志, 1989, 8(4): 347-352.
- 3 Brindley G W. et al., Mineralogical studies of kaolinite-halloysite Clay. I identification problems, Amer. Mineral., 1963, 48; 897-910.

- 4 Churchman G. J, Theng B. K. G. Interactions of halloysites with amides: mineralogical factors affecting complex formation. *Clay Minerals*, 1984, 19: 161—175.
- 5 Tomura S. et al., Origin of the morphology of spherical kaolinite. *Clay Science*, 1985, 6:159—166.
- 6 Nemezc E. *Clay Minerals*. Printed in Hungary. 1981. 87.
- 7 张天乐、王宗良. 福建龙岩风化型高岭土矿床中粘土矿物的研究. *岩石矿物学杂志*, 1990, 9(4):234—244.
- 8 威维尔 C E. 粘土矿物化学. 张德玉译. 北京: 地质出版社, 1984, 92—101.
- 9 Oberlin A, Tchoubar C. Electron microscope study of the alteration of kaolinite crystals, *compt. Rend. Acad. Sci. pavis*, 1957, 244: 1658—1661.

A Study of Kaolin Minerals from the Guoshan Kaolin Deposit, Fujian Province

Zhang Tianle, Wang Zongliang

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Key words: kaolinite; halloysite; allophane; analytical electron microscopy; Fujian

Abstract

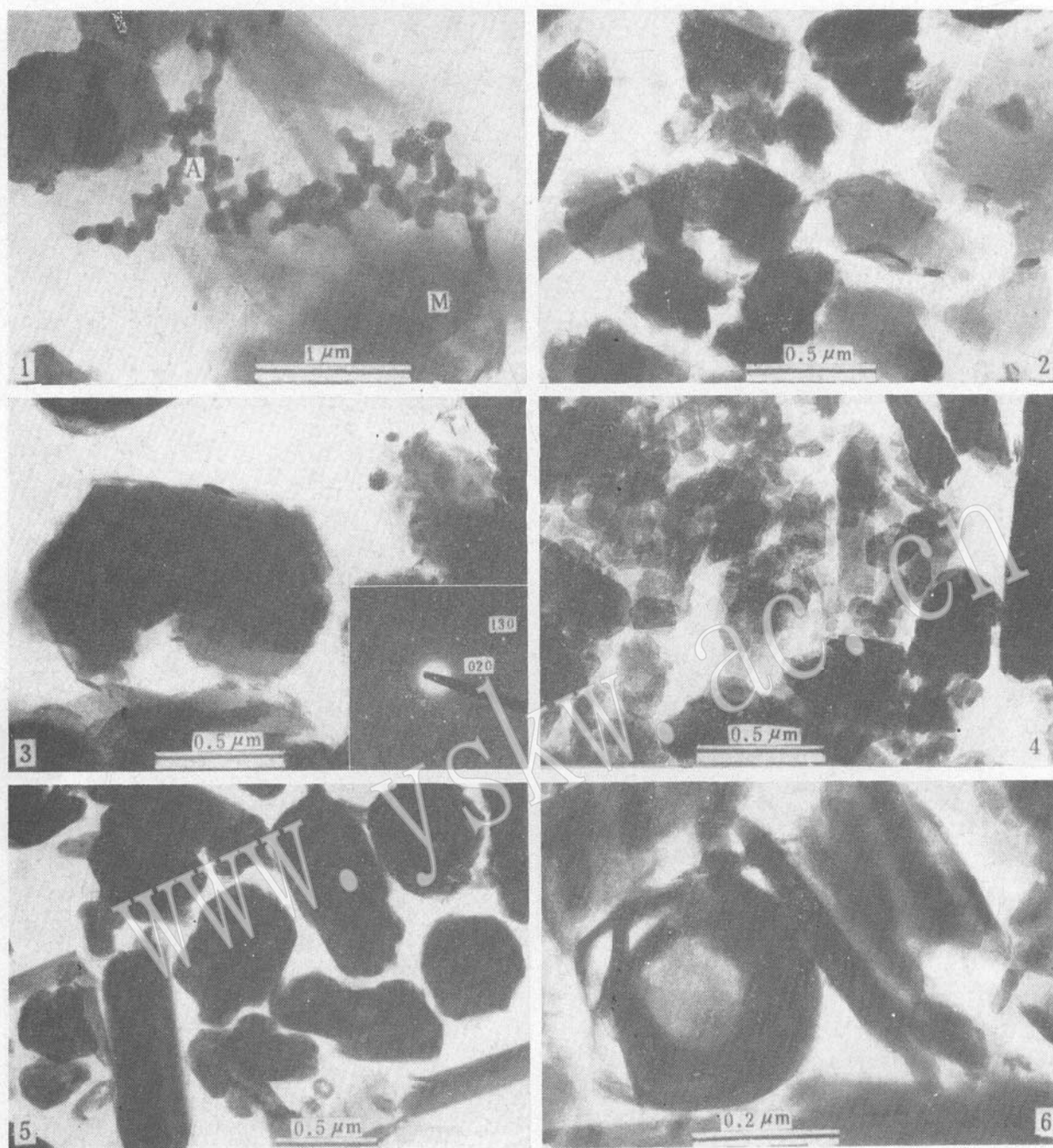
The Guoshan kaolin deposit, located in the area from Tongan county town to Xinxu of Fujian Province, is of weathering residual type formed by weathering of adamellite. Completely-weathering zone, semi-weathering zone and parent rock can be separated in downward succession along the weathering profile. The completely-weathering zone (i.e. the main ore body) can be further divided into four mineral segments by estimation of the relative content of kaolinite and halloysite using transmission electron microscopy. Studies indicate that kaolin minerals are mainly concentrated in the completely-weathering zone.

The clay minerals have been studied systematically by such means as analytical electron microscopy (AEM), X-ray diffraction (XRD), infrared absorption spectra (IR), chemical analysis and optical examination. The results obtained show that they consist mainly of kaolin minerals (kaolinite and halloysite) associated with small amounts of allophane, imogolite, sodic montmorillonite, hydromuscovite and gibbsite. Kaolinite and halloysite are common members of the kaolin group in the 1:1 dioctahedral phyllosilicates. Allophane can also be regarded as a mineral related to this group.

Detailed investigations show that kaolinite has low degree of order and

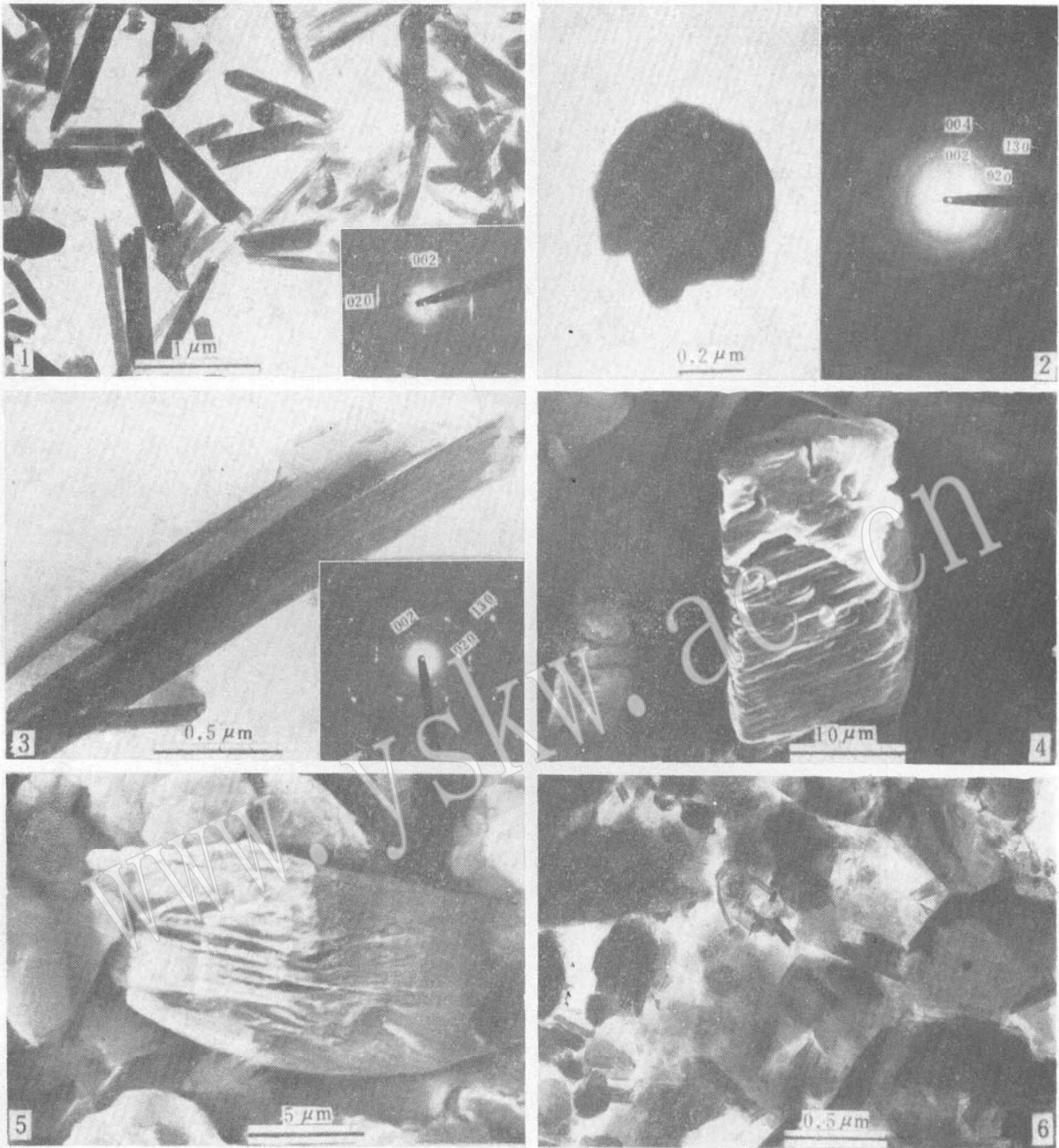
irregular crystal form in the semi-weathering zone, higher degree of order and pseudo-hexagonal sheet form in the completely-weathering surface soil zone. Such a regular variation in the degree of order and crystal form of kaolinite in the weathering profile of monzonitic granite serves as an indicator of the developmental stage of the weathering crust. Halloysite is mainly of $2\text{H}_2\text{O}$ (7Å) type, with transitional types of 10Å to 7Å and 7Å to kaolinite also discovered by XRD and AEM. The crystals of halloysite are basically spherical and tubular in form. Halloysite contains interlayer water which is readily dehydrated, and dehydration might result in partial or complete splitting and unrolling of tubes and the formation of the polygonal cross section. Having been dried, spherical halloysite takes somewhat polyhedral form due to shrinkage. Morphological feature is very important in the study of kaolin minerals and has been used as a diagnostic criterion to distinguish different mineral species in kaolin minerals.

www.yskw.ac.cn



图版 I 说明

1. 次圆球状水铝英石(A), 钠蒙脱石(M), 为边缘卷曲的集合体 (样品号: ZK_0026-41) TEM
2. 形态不规则的薄片状高岭石, 半风化带 (ZK0026-32) TEM
3. 假六方片状高岭石, 全风化带中部 TEM。该单晶的 SAED 图 (照片右下角) (ZK 0026-20, XRD 见图 4-3)
4. 等度薄片状高岭石, 表土带 (ZK 391-4) TEM
5. 多面体球状埃洛石, 全风化带 (ZK0026-11, XRD 见图 6-3) TEM
6. 7 Å 球状埃洛石, 从外壳层剥落而向高岭石转化, 全风化带顶部 (ZK 655-5) TEM



图版 II 说明

1. 管状埃洛石,全风化带上部 TEM, 该矿物单晶的 SAED 图(照片右下角)(ZK391-9, XRD 见图 6-1)
2. 7 Å 球状埃洛石 TEM。球体的 SAED 图 (照片右半部) (ZK 655-16, XRD 见图 6-4)
3. 破裂和展开的管状埃洛石 TEM。SAED 图 (照片右下角)。全风化带上部 (ZK0026-14)
4. 长石溶蚀坑扩展成溶蚀沟 (样品号: SE 051) SEM
5. 叠片状高岭石聚晶 (SE109) SEM
6. 薄片状高岭石晶体边缘卷曲而向管状埃洛石转化 (ZK 391-17) TEM