

苏州高岭土矿成矿期后的矿物演化 及其与矿体改造的关系

周国平

(中国地质科学院矿床地质研究所)

主题词: 高岭土矿物; 演化; 改造; 富集; 苏州

提 要: 苏州高岭土矿主要由高岭石、7 Å 埃洛石、10 Å 埃洛石及少量绢云母、蒙脱石、明矾石、三水铝石组成。高岭土矿物形成后因外界地化条件改变发生了以下转变: (1) 埃洛石脱水向高岭石转化; (2) 次生淋滤埃洛石形成; (3) 埃洛石和三水铝石之间的互相转化; (4) Ca型蒙脱石形成; (5) 高岭土的磷酸盐化作用; (6) 次生淋滤明矾石的形成。矿物生成的先后顺序和共生关系可将矿物形成分为主要成矿期和成矿期后演化两个阶段。矿物的后期演化使优质高岭土进一步富集, 改造, 形成量大质优的高岭土矿。同时, 非高岭土矿物的生成又使部分矿石质量变差, 降低了矿石的工业价值。

苏州高岭土矿是我国最大的高岭土生产基地, 矿床储量丰富, 矿石质量稳定, 具有良好的工艺性能。在我国电子、造纸、电瓷、建筑卫生瓷等众多领域被广泛应用。然而, 矿床在成矿期后曾不同程度地遭受地下水的淋滤改造作用, 致使部分原生矿得到进一步改造, 也使一些高岭土矿物发生了成矿期后的演化。本文就成矿期后矿物的演化方向及对矿床质量的影响加以讨论。

一、高岭土矿的产状及主要矿物组成

苏州高岭土矿主要分为阳西、阳东、观山三大矿区, 矿体受印支期灰岩剥蚀面和逆掩断裂带的控制, 矿体呈透镜状, 似层状或囊状产于灰岩剥蚀面之上, 有些产于逆掩断裂带之中。观山高岭土矿体位于上侏罗统(J_3)火山岩系下部与印支期剥蚀面二叠系长兴组—三叠系青龙群(P_2 — T_1)灰岩和部分二叠系堰桥组—龙潭组(P_1 — P_2)的砂页岩之上的接触部位。阳西高岭土矿体发育于逆掩断裂带内, 底板岩石为二叠系栖霞组(P_1)大理岩化灰岩和部分堰桥组(P_2)砂页岩。阳东高岭土矿体受二叠系栖霞组(P_1)大理岩化灰岩形成的喀斯特溶洞控制, 呈各种岛弧状成群分布。

高岭土矿是在晚侏罗纪及早白垩纪时期, 由火山喷发间歇期及期后产生的中、低温酸性热水溶液交代了成矿原岩中的铝硅酸盐矿物而形成。燕山运动期间大量火山、岩浆活动期间形成的含长石晶屑的偏中性、偏碱性凝灰岩、凝灰角砾岩及其同源的浅色脉岩和部分粘土岩作为成矿原岩, 提供了矿床形成的主要物质来源。矿区内发育北北东向, 北东向和北西向成矿前断裂, 其间普遍有火成岩脉穿插。矿床形成过程中, 构造断裂作为热液活动的通道和矿化蚀变的空间对成矿起着重要作用。矿床形成后期, 地表雨水和地下水的活动主要是沿着构

造断裂和潜水面进行, 根据部分样品(靠近矿体下部和底部)的氢氧同位素研究表明^①, 所有样品的同位素组成点都落在风化区, 即高岭土矿物的形成温度普遍是较低的。说明形成以后均不同程度地遭受了后期风化淋滤改造作用, 地表雨水和地下水淋滤期间, 矿物和围岩发生了较强的水溶液交换, 改变了氢氧同位素的组成, 这种淋滤交换作用是在常温下进行的。后期的风化淋滤作用使得高岭土矿体的下部发生了较明显的改造, 矿物沿着高岭石—埃洛石—三水铝石按淋滤强度的大小发生有规律的演化, 其发展趋势通常受地表雨水、地下水和矿体底部, 灰岩卡斯特作用面发育程度的制约, 阳西、阳东两个矿区该现象更加明显些。

高岭土矿的主要矿物组成为高岭石、7 Å 埃洛石和10 Å 埃洛石, 含少量绢云母、蒙脱石, 常伴有不等量的明矾石、三水铝石和磷酸盐矿物。三大矿区的主要矿物组合见表1。

表1 苏州高岭土矿的主要矿物组合

Table 1 Main mineral associations of kaolin deposits in Suzhou

矿 区	主 要 矿 物	次 要 矿 物
阳 东	7 Å 埃洛石、10 Å 埃洛石、高岭石	黄铁矿、石英、三水铝石、蒙脱石、长石
阳 西	7 Å 埃洛石、10 Å 埃洛石、高岭石、明矾石	黄铁矿、石英、三水铝石、蒙脱石、磷酸盐矿物、长石
观 山	高岭石、7 Å 埃洛石、10 Å 埃洛石、明矾石	黄铁矿、石英、三水铝石、长石、菱铁矿

矿物在分布上具下列特征。矿体上部以高岭石、7 Å 埃洛石为主, 含少量绢云母, 中下部以10 Å 埃洛石为主, 靠近矿体底部常出现蒙脱石、三水铝石和次生淋滤形成的明矾石, 局部出现铝磷酸盐矿物。上部矿体常含较多石英、长石等碎屑矿物。观山高岭土矿含较多明矾石、黄铁矿和三水铝石, 阳东和阳西高岭土矿底部常含较多有机质和蒙脱石。

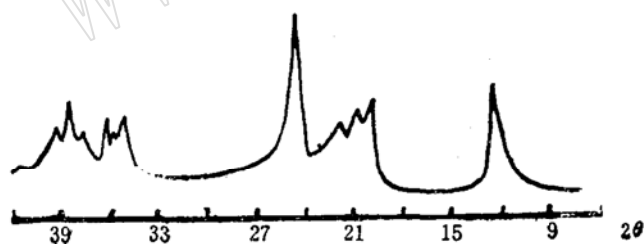


图1 7 Å 埃洛石的X射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of 7 Å halloysite

注: 由矿床地质研究所黄家山、周国平测定。测试条件: CuK α 辐射, 50千伏, 40毫安

体多为短粗的多边形状, 管体常破裂, 有时一端展开, X射线衍射谱上出现少量三维有序特征(图1)。

苏州高岭土矿在化学组成上很接近高岭石族矿物的理论化学成分(表3)。作为主要开采

大多数高岭石具完整的六方片状的结晶形态, 具较高的有序度。其结晶度指数平均接近1或大于1, 其中长石斑晶中的高岭石序度最好, 结晶度指数可高达1.3(表2)。部分处于转变过渡阶段中的高岭石有序度较低, 含有云母的残余晶格。天然产出的10 Å 埃洛石和7 Å 埃洛石在序度和形态上具较明显的差异, 10 Å 埃洛石管体常呈细长甚至弯曲状, X射线衍射谱上呈现二维无序特征。7 Å 埃洛石管

① 邵益生, 1983, 中国高岭土矿物的同位素组成研究。北京大学地质系硕士论文。

层开采的矿石其 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分子比基本上接近2。当矿石中含较多明矾石、黄铁矿和石英时,常含较高的 SO_3 、 K_2O 、 FeO 和 SiO_2 。

表2 部分高岭石的结晶度指数

Table 2 Crystallinity indexes of some kaolinites

样号	701-F	Q-3	9005-16	8187	81810	504-7	504-8	501-3	平均
指数	0.84	1.30	1.15	0.92	0.86	1.13	1.16	1.17	1.07

表3 主要高岭土矿石的化学成分(%)

Table 3 Chemical composition of main kaolin ores (in percentage)

项目 样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	SO_3	H_2O^+	H_2O^-	合计
1	45.96	0.033	38.99	0.04	0.061	0.039	0.074	0.002	0.005	0.04	0.07	0.15	13.84	0.38	99.68
2	44.70	0.04	37.54	0.02	0.11	0.019	0.082	0.002	0.005	0.005	0.16	0.31	14.82	1.89	99.70
3	43.40	0.21	36.62	3.34	0.072	0.085	0.13	0.010	0.19	0.015	0.19	0.53	13.83	0.60	99.22

注:由地矿部岩矿测试所刘素明测定。

1—阳东矿区白善岭矿段高岭土样品;2—阳西矿区负25米采坑高岭土样品;3—观山矿区751钻孔高岭土样品。

二、成矿期后的矿物演化

前已述及了高岭土矿的主要矿物组成及其分布特征。这些矿物在不同的矿区以及一矿区

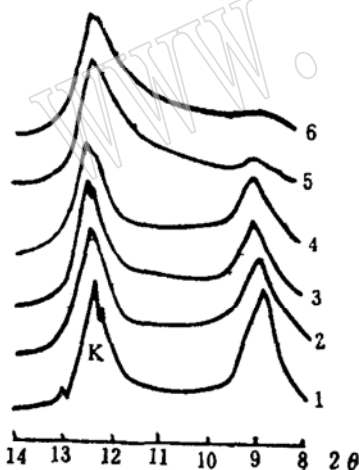


图2 埃洛石在常温、常压下不同脱水状态下的X射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction diagram of halloysite under different dehydration conditions at room temperature and one atmospheric pressure

1—密封原样,2—一天,3—二天,4—四天,5—十一天,6—二十五天,K—高岭石

注:由矿床地质研究所黄家山,周国平测定。测试条件:CuK α 辐射,50千伏,40毫安。

不同部位的空间分布上均存同一定的差异。显然,它们并非一次地质作用的产物,而是由不同时期不同的地质作用所造成。高岭土矿物在形成以后,只是和外界地化环境处于暂时平衡之中,矿物的稳定结构状态也是相对的。当外界地化环境改变时,为了达到新的平衡,原先形成的矿物将从稳定结构转变成不稳定结构,向更稳定的结构过渡。苏州高岭土矿在成矿期后经历了复杂的次生改造作用,其中最明显的是后期地下水淋滤,卡斯特作用等对下部矿体的影响,促使原先形成的矿物在新的地化环境中向两个方向发生演化。

(一) 埃洛石脱水向高岭石转化

在水源充足的环境中形成的10Å埃洛石,在上部矿体中由于成矿后环境改变,特别是充足水源条件的缺乏,处于准稳定的状态。在失水,上覆压力和时间因素影响下发生了脱水作用,逐渐向7Å埃洛石,进而向更稳定的高岭石转化。转变过程中,埃洛石管体长度缩短,管体呈明显的棱柱

形,层间间距从 10 \AA 收缩至 7.2 \AA 左右,结构上出现一些三维有序特征,(02,11)反射带出现轻微分解(图1)。和高岭石共生的埃洛石管体常在一端展开呈铲状,甚至有些开始向长条形的高岭石形态转变。由于这种转变,使矿体上部的 10 \AA 埃洛石基本上消失,代之而起的是高岭石和 7 \AA 埃洛石的矿物组合。高岭石和埃洛石的热力学研究表明^{[1][2]},埃洛石的生成自由能比高岭石大(埃洛石 $\Delta f = -898.4\text{ kcal/mole}$,高岭石 $\Delta f = -902.9\text{ kcal/mole}$),可见埃洛石稳定性是低于高岭石的。笔者通过 10 \AA 埃洛石在常温、常压下的自然脱水试验也证实了这一点(图2),这种脱水效应表现在X射线衍射谱上,就是基面间距的收缩,(001)的反射峰随着脱水量的增加逐渐移向 7 \AA 。以上脱水试验是在相对湿度保持不变的条件下进行的,说明 10 \AA 埃洛石一旦脱离其生成的环境,便不可避免地发生脱水作用。因此,埃洛石向高岭石的转化在非多水介质环境中是一种自发过程。在自然界中,脱水转化是一个长期的自生调节过程,脱水的同时,埃洛石的内部结构开始缓慢地向有序方向转化。

(二) 次生淋滤型矿物的形成

矿体下部由于成矿期后长期的地下水淋滤,潜水面变化、灰岩卡斯特作用发育等,造成地化环境(pH条件,碱、碱土金属离子及硅的活度等)不断变化,致使原生矿物发生一系列转化。

1. 淋滤型 10 \AA 埃洛石的形成 前已提及矿体上部 10 \AA 埃洛石因脱水,压力及时间因素向高岭石转化,而在矿体底部与灰岩接触的部位正处于地下潜水面范围,地下水常年持续不断地淋滤为 10 \AA 埃洛石的发育创造了一个潮湿多水的介质环境。原生的高岭石开始向 10 \AA 埃洛石转化,薄片可见到高岭土中出现又一次的次生淋滤埃洛石脉,脉中的埃洛石纯净,和两边的高岭土界线清晰。扫描电镜下观察,这些部位的埃洛石具明显的淋滤特征。低倍镜下埃洛石集合体组成了各种网脉状形态,其中出现许多大小空洞,局部放大后可见到细长的埃洛石管常弯曲成各种圆形渠道,这些渠道是水流流经之处(照片1),在此合适环境中,埃洛石管体发育,管长可超过 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。这些特征说明埃洛石在充足水介质淋滤的环境中得到了充分的发育,但它仍然和外界环境处于相对的暂时平衡中。

2. 埃洛石和三水铝石的相互转化 无论是阳东、阳西还是观山矿区,矿体底部高岭土在薄片观察均出现较多的溶蚀空洞,空洞边缘为纤维状的三水铝石呈皮壳状充填,组成了

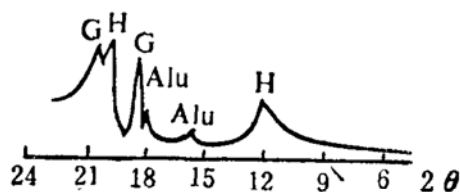


图3 含三水铝石高岭土的X射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of gibbsite-bearing kaolin

H—埃洛石, Alu—明矾石, G—三水铝石

注:由矿床地质研究所黄家山,周国平测定。测试条件:
CuK α 辐射,50千伏,40毫安

各种形态的花边结构(照片3—左)。同时,高岭土基质中也出现许多粒状三水铝石,有些粒状三水铝石沿着高岭土的微裂隙呈花边状分布。这种特征说明成矿期后由于地化环境的改变和长期的地下水淋滤作用,埃洛石和高岭石发生了局部溶解和脱硅。由于靠近灰岩卡斯特发育面,排泄条件畅通,多余的硅被流动的地下水带出,使得周围局部环境中Al/Si比值发生变化,导致了三水铝石取代埃洛石而出现。扫描电镜下观察,三水铝石位于埃洛石的溶蚀空洞内,空洞呈向下弯曲的漏斗状。空洞内六方柱状三水铝石结构疏松,

石位于埃洛石的溶蚀空洞内,空洞呈向下弯曲的漏斗状。空洞内六方柱状三水铝石结构疏松,

晶体相互间具较大的空隙(照片2),说明三水铝石形成发育的空间是很充足的。在底部排泄条件很优越的部位(如钻孔底部),溶液中的三水铝胶缓慢沉淀结晶形成许多纯的皮壳状的水三铝石条带(图3)。

形成的三水铝石,由于局部小范围内地球化学环境的变化又发生部分溶解作用,重新复硅形成埃洛石。从照片中可见,沿着三水铝石六方柱的各个顶面、柱面,出现许多溶蚀沟和溶蚀空洞(照片2),在三水铝石晶体之间发育了一些小的埃洛石锥形管体,管长约0.5微米,管径不到0.1微米。这种特征说明,成矿期后总体上地化条件朝一个方向改变的情况下,局部微区的地化环境(主要是pH值和硅的活度)的变化是经常发生的。这种变化主要受微区矿物组分百分比变化的影响,反过来又导致了处于该环境中的矿物发生相应的转变。

矿体底部埃洛石的脱硅作用还受有机质含量的控制,观山矿底部很少含大量有机质,卡斯特作用面平缓倾斜,排泄条件畅通,三水铝石大量发育。阳东和阳西矿因灰岩溶解后含较多有机质而降低了溶液的pH值,因而三水铝石发育程度远不如观山矿。国外的实验室研究表明^[3],当淋滤溶液中硅含量超过5 ppm时,高岭土矿物形成,低于5 ppm时,便可形成各种含水的氧化铝。根据热力学资料^{[4][5]},当体系中存在有石英,渗滤水的pH值 <4.2 ,三水铝石就不能作为高岭石的溶解结果而沉淀。因此,高岭土矿底部出现的水三铝石交代作用反映了这些部位淋滤速率是相当高的,溶液中的硅含量很低。前人的众多研究已证实^{[6][7]},三水铝石主要通过三种途径形成,(1)埃洛石脱硅;(2)铝胶脱水;(3)从溶液中沉淀。其产出层位可在上部也可在下部,不同层位分布反映了不同的地质作用。苏州高岭土中的三水铝石主要产于矿体底部,是成矿期后地下水持续淋滤的产物,形成途径包括上述的(1)

和(3),而以(1)为常见。

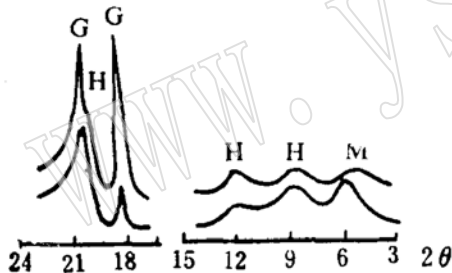


图4 含三水铝石和蒙脱石样品的X射线衍射图

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of gibbsite and montmorillonite-bearing samples

H—埃洛石; M—脱蒙石; G—三水铝石

注:由矿床地质研究所黄家山,周国平测定。测试条件:CuK α 辐射,50千伏,40毫安

3. Ca型蒙脱石的形成 如前所述,地下水的强烈淋滤作用造成埃洛石脱硅形成三水铝石。然而,淋滤强度又受高岭土所处环境和底部灰岩性质的影响。地形平缓倾斜,灰岩卡斯特作用并不很发育,这就造成良好的排泄条件,促使大量三水铝石形成,观山矿便是此种情况。反之,卡斯特作用发育,含有机质的栖霞灰岩经淋蚀后很易形成局部低洼的滞留环境,溶解的SiO₂和部分Ca²⁺、Mg²⁺离子不能及时被流动的地下水带走。

在这种特殊情况下,淋滤作用的产物主要不是

三水铝石,而是Ca型蒙脱石,只有排泄条件好转时,三水铝石才出现,如阳东矿区。从薄片可观察到,蒙脱石沿着埃洛石角砾的边缘或微型裂隙中分布,常组成镶边结构,或呈各种脉状、枝叉状。局部排泄条件较好的部位,蒙脱石外围又发育出一圈皮壳状的水三铝石(照片3—右)。X射线衍射也表明蒙脱石含量和三水铝石正好成互相消长关系(图4)。蒙脱石外围三水铝石的形成,代表了地下水淋滤作用加强,排泄条件好转,蒙脱石开始脱硅、脱碱土离子的结果。可见,蒙脱石是灰岩受地下水侵蚀溶解时,Ca²⁺、Mg²⁺离子局部滞留造成的偏碱性环境下的产物。由于这种地化环境的产生,致使正常淋滤作用中埃洛

表 4 含蒙脱石高岭土的化学成分(%)

Table 4 Chemical composition of montmorillonite-bearing kaolins (in percentage)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Mn	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Σ
1	48.02	0.19	17.08	15.68	0.04	0.55	0.70	0.002	0.13	0.023	0.08	0.26	10.66	1.40	94.82
2	45.86	0.043	31.97	2.64	0.057	0.28	0.79	0.014	0.05	0.046	0.09	0.60	13.10	3.28	98.82

注：由地矿部岩矿测试所刘素明测定。

1—观山地表高岭土矿中淋滤形成的蒙脱石，2—阳东白善岭坑道负85米采坑灰岩附近形成的蒙脱石。

石脱硅形成三水铝石的过程受到了抑制，取而代之的是蒙脱石的出现。底部矿体中含蒙脱石高岭土的化学成分中 CaO 含量明显偏高也说明灰岩溶蚀，Ca²⁺、Mg²⁺ 离子局部滞留是蒙脱石发育的主要因素（表 4）。但底部所处环境毕竟长期受地下水淋滤，蒙脱石并非是个稳定矿物相，一旦排泄条件好转，三水铝石就会出现。因此，地化环境变化的主流仍然朝着脱硅作用进行（图 5）。

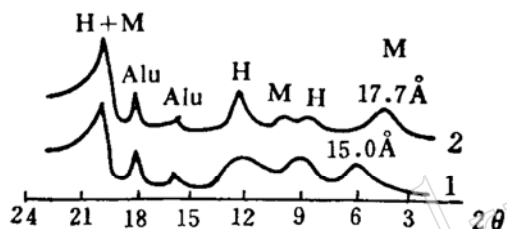


图 5 含蒙脱石和明矾石样品的 X 射线衍射图

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of montmorillonite and alunite-bearing samples

M—蒙脱石，H—埃洛石，Alu—明矾石，1—未处理样品，2—乙二醇饱和和处理样品

注：由矿床地质研究所黄家山，周国平测定。测试条件：CuKα辐射，50千伏，40毫安

4. 局部氧化还原电位升高导致菱铁矿分解 观山矿区751钻孔底部高岭土中，出现大量菱形矿物，大多数已被三水铝石和埃洛石交代，但菱形形态仍完整保留。电子探针成分分析结果表明（表5），菱形假象中的主要成分是 Al₂O₃，SiO₂，MgO，FeO。前两个组分应属埃洛石，后两个组分是原矿物的残留组分。根据矿物的特殊形态，产出层位和残留组分分析，原矿物应为菱铁矿，其中 Fe 和 Mg 可作为类质同象组分存在。

表 5 菱形矿物的电子探针成分分析结果(%)

Table 5 Electron microprobe analyzes of rhombohedral minerals (in percentage)

项 目	P ₂ O ₅	CaO	BaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO	FeO
分 析 位 置								
菱 形 矿 物	0.28	1.12	0.00	16.47	10.60	35.09	0.07	15.34
基 质 1	0.68	0.15	0.25	74.14	0.01	4.97	0.00	0.10
基 质 2	0.00	0.50	0.04	33.29	0.20	40.61	0.04	1.76

注：由地质科学院矿床地质研究所杨明明测定。

基质的组分主要为三水铝石和埃洛石。菱铁矿产出的层位正好和矿区普遍出现的菱铁矿带相当，是火山低温热液的交代产物。菱铁矿稳定存在的环境是中—低温，弱—中碱性溶液和半还原条件^①。若 Eh 升高，Fe²⁺ 势必氧化成 Fe³⁺，结果将导致菱铁矿分解。因此，根据菱铁

① 菱铁矿矿床，1978，地质科技资料选编（四十二）。

矿被三水铝石和埃洛石交代可以推测,成矿期后某一时期,底部矿体是处在Eh 较高的环境中。由于局部 Eh 升高,使底部黄铁矿发生局部氧化,从而在附近发育较多自形程度极好的明矾石(图5)。同样的现象在矿体上部并未出现,说明Eh 的局部升高主要和地下水潜水面的升降有关。

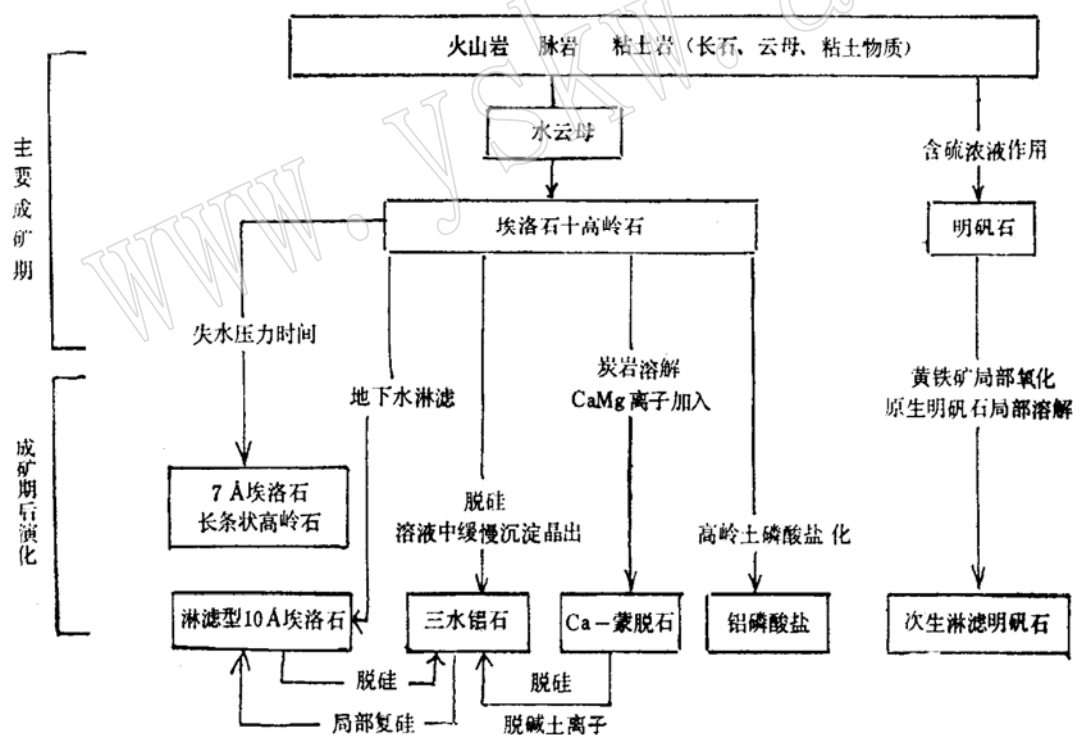
除以上主要的矿物演化方向外,中下部的原生明矾石也出现有局部的溶解作用。成矿期后在地下水和地表水的作用下,易溶磷酸盐中磷元素的富集作用也通过高岭土物质的磷酸盐化而形成难溶的铝磷酸盐矿物^[8]。

(三) 矿物的生成演化顺序

以上表明,苏州高岭土自形成后经历了复杂的后期淋滤改造作用,这种作用主要发生在矿体的下部,受当时潜水面和地下水活动范围的影响。矿体底板灰岩的岩性对淋滤改造的性质和矿物共生转化的特征起着一定的控制作用。矿物生成的先后顺序和共生关系反映了矿物形成的两个主要阶段,即主要成矿期和成矿期后的演化。主要成矿期以形成高岭石、埃洛石和少量水云母为主,并伴生有明矾石,它们构成了矿体的主体部分。成矿期后原生矿物在新的地化环境中朝着和外界环境达到平衡的方向演化。矿物总的生成演化顺序如6表所示。

表 6 苏州高岭土矿矿物生成演化顺序图解

Table 6 The formation and evolution sequence of kaolin minerals in Suzhou kaolin deposits



三、矿物演化与矿体改造的关系

苏州高岭土矿经历了前期热液蚀变,后期地下水淋滤改造两个成矿阶段,这种复合的成矿作用使苏州高岭土矿成为世界著名的优质高岭土。早期的低温热液蚀变使岩石发生了不同程度的绢云母化、高岭土化和明矾石化作用,形成了蚀变型的原生高岭土矿床,该作用在观

山矿区更趋明显。在此基础上,后期以地下水为主,伴随灰岩卡斯特发育的淋滤作用促使早先形成的高岭土、高岭土化和绢云母化的岩石发生强烈的次生淋滤作用,形成量大质优的高岭土矿体。阳东矿区作为主要矿体开采的白色致密状矿石纯度极高,基本上由纯的埃洛石组成。如此纯度的埃洛石矿并非一次地质作用所能形成,主要是再次淋滤改造的产物。这种改造作用使原生矿床中含较多石英、长石的原生硬质高岭土转变成了疏松状、白度高的高档电瓷、陶瓷和橡胶的优质原料。

然而,作为后期淋滤改造作用的产物在矿体底部出现的三水铝石、蒙脱石和明矾石则大大降低了矿石的质量。尤其当矿石中含较多明矾石时,因含有大量硫酸根,在热分解过程中要生成硫酐(SO_3),以 SO_2 形式排出,致使陶瓷制品膨胀,同时使坯体出现斑点、熔坑,从而降低陶瓷制品的质量。造纸用高岭土掺有明矾石时将会影响纸张的白度,也是个有害组分。蒙脱石由于具有较强的阳离子交换能力,常吸附较多有机质和杂质,降低矿石白度。陶瓷用高岭土中混有较多蒙脱石时将会降低原料的烧结温度,使坯体软化变形,烧后着色差。造纸工业中由于原料掺进蒙脱石则会增加纸浆粘度,影响涂布质量。三水铝石的存在虽然可增加高岭土的耐火度,但由于含水量高,使高岭土收缩率增加,影响坯体成型。因此,这些组分都是矿石的有害成分,在开采利用时必须将其剔除和处理,以提高高岭土矿石的工业利用价值。

此外,经热液蚀变作用形成的原生矿主要由高岭石组成,含较多片状晶体,是造纸工业用作纸张涂料的最佳原料。经后期地下水淋滤改造作用后,片状高岭石转变成管状埃洛石,虽然自然白度增加,但管状体增加使涂布效果变差,因此在具体开采利用时,应分层分级开采,使以片状为主的高岭土矿石和以管状为主的矿石都能得到最合理的利用。

本文是在导师郑直研究员的亲自指导下完成的。工作中得到江苏省地矿局第四地质队冯墨林工程师,中国地质科学院杨安国、黄家山同志的热情帮助和大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Huang W. H., 1974. Stabilities of kaolinites and halloysites in relation to weathering of feldspars and nepheline in aqueous solution. *Amer. Min.*, vol. 59, pp.365—371.
- [2] Reesman, A. L., 1968. Aqueous solubility studies of highalumina and clay minerals. *Amer. Min.*, vol. 53, pp.929—941.
- [3] Wollaster., 1967. Kinetics on the alteration of K-feldspar in buffered solutions at low temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 31, pp. 635—648.
- [4] Leonard, R.G., 1972. Conditions for direct formation of gibbsite from K-feldspar——further discussion. *Amer. Min.*, vol. 57, p.294.
- [5] Leonard, R.G., 1970. A chemical model for the origin of gibbsite from kaolinite. *Amer. Min.*, vol. 55, pp.1380—1389.
- [6] Uehara G., 1966. Desilication of halloysite and its relation to gibbsite formation. *Pacific Science*, vol. 20, pp.119-124.
- [7] Bates, T.F., 1960. Halloysite and gibbsite formation in Hawaii. 9th National Conference on Clay and Clay minerals. pp.315—328.
- [8] 周国平、郑直, 1986, 苏州高岭土中的变磷铝石及其成因探讨. *地质论评*, 32卷, 第2期, pp.119—128.

The Relationship between the post-ore Mineral Evolution of Kaolin Deposits in Suzhou and the Transformation of Orebodies

Zhou Guoping

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

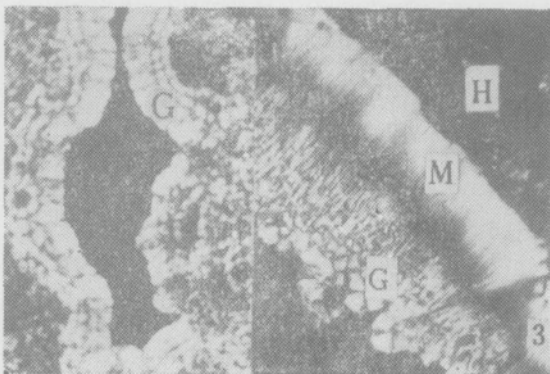
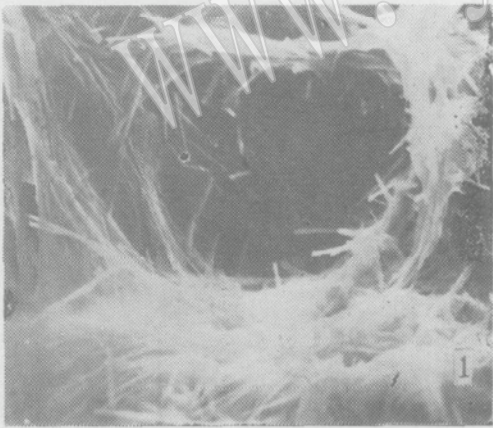
Key words: Kaolin mineral; evolution; transformation;
enrichment; Suzhou

Abstract

The kaolin deposits in Suzhou consist mainly of kaolinite, 7 Å halloysite and 10 Å halloysite, with less sericite and montmorillonite and varying amounts of alunite, gibbsite and phosphate minerals in company. On the whole, kaolinite and 7 Å halloysite are dominant in the upper part of the orebody and 10 Å halloysite in the middle and lower parts. Montmorillonite, gibbsite and secondary leaching type alunite are frequently seen near the bottom, together with localized phosphate minerals. The chemical compositions of kaolin minerals are approximately equal to theoretical values and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of the major ore is close to 2.

These mineral associations are products of different geological processes in different periods. After their formation, the kaolin minerals are only in temporary equilibrium with the surrounding environment and are thus in a relatively stable structural state. With the variation in surrounding geochemical environment, these minerals will change their stable structures gradually into unstable structures to reach new equilibrium. The conversion mainly includes (1) the transformation of halloysite into kaolinite, (2) the formation of secondary leaching type 10 Å halloysite, (3) the mutual conversion between halloysite and gibbsite and (4) the formation of Ca-montmorillonite. Based on the above discussion, the author has established a formation and evolution sequence for kaolin deposits and dealt tentatively with the relationship between the mineral evolution and the transformation of orebodies.

周国平：苏州高岭土矿成矿期后的矿物演化及其与矿体改造的关系



照片 1. 淋滤埃洛石的网脉状渠道结构
扫描电镜 $\times 3600$

照片 2. 埃洛石脱硅形成的三水铝石晶体，晶体局部复硅形成埃洛石雏管 扫描电镜 $\times 12000$

照片 3. (左) 埃洛石脱硅形成的三水铝石 (G) 花瓣结构 正交偏光 $\times 30$

(右) 淋滤形成的细纤维状蒙脱石 (M) 和粗纤维状、花瓣状三水铝石 (G) 组成镶边结构 (H 为埃洛石) 正交偏光 $\times 30$

(注：以上扫描电镜照片均由地质研究所扬安国摄制)