



黔北沉积型铝土矿鲕粒成因

崔 滔, 闫 俊, 张 敏

(贵州理工学院 资源与环境工程学院, 贵阳 550003)

摘 要: 通过野外地质调查、手标本观察、岩石光面分析、偏光显微镜观察、XRD 分析、扫描电镜分析等手段对黔北务川-正安-道真地区(务正道)铝土矿中的鲕粒进行了系统研究。结果表明: 铝土矿含矿岩系中鲕粒按成分可分为铝土质鲕粒、绿泥石鲕粒、硬水铝石鲕粒、赤铁矿鲕粒、黄铁矿鲕粒; 铝土矿中的粗碎屑颗粒为盆地内部形成的内碎屑, 泥质粗碎屑颗粒并不反映高能环境, 铝土矿中的硬水铝石为常温常压条件下形成; 除部分赤铁矿鲕粒外, 大部分铝土矿中的鲕粒为低能条件下或淋滤过程中在孔隙中原位形成, 绿泥石与硬水铝石交替凝聚形成核心和同心层; 持续的淋滤作用会破坏鲕状构造, 鲕状矿石向碎屑状或半土状矿石转变, 使铝土矿品质进一步提高。

关键词: 鲕粒; 成因; 铝土矿; 黔北地区

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0586-17

中图分类号: P611.2

文献标志码: A

引文格式: 崔 滔, 闫 俊, 张 敏. 黔北沉积型铝土矿鲕粒成因[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 586–602. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-37710

CUI Tao, YAN Jun, ZHANG Min. Origin of oolites of sedimentary bauxite in northern Guizhou, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 586–602. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-37710

鲕粒是指具有核心(鲕核)和同心层(鲕环)结构的球状体, 因其特殊的构造而引起诸多学者的研究兴趣。鲕粒有多种类型, 常见的碳酸盐岩鲕粒、铁质鲕粒、磷灰石鲕粒、黏土矿物和铝土矿物鲕粒, 玛瑙晶洞、某些杏仁体、及其他成分的球状体也具有类似的鲕状结构。鲕粒常与豆粒一并提起, 传统将大于 2 mm 的球状体称为豆粒, 而不论其是否具有鲕核和鲕环。本文从结构成因考虑, 将铝土矿中具有鲕核和鲕环的球状体统归为鲕粒, 无关其成分或粒径大小, 内部不具有鲕核和鲕环结构的球状体则归到豆粒或其他球状体类型。铝土矿有广义和狭义之分, 广义的铝土矿指 Al_2O_3 超过 25% 的岩石, 狭义的铝土矿指主要用于提炼金属铝的高品位矿石, 坑采要求边界品位 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 40\%$, $\text{A/S} > 1.8$, 工业品位 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 55\%$, $\text{A/S} > 3.8$ 。随着国民经济发展, 铝土矿的用途越来越广, 例如早期只能作为废弃物

处理的 Al_2O_3 含量在 25% 左右的含矿岩系如今是瓷砖厂的重要原料, 市场供不应求。本文中出现的铝土矿是指广义的铝土矿, 即铝土矿的含矿岩系, 铝土矿矿石/工业铝土矿则指用于提炼金属铝的狭义高品位铝土矿。

黔北铝土矿主要集中于务正道地区和遵义地区, 遵义地区为岩溶型铝土矿, 务正道地区为典型的沉积型铝土矿。主要由鲕粒组成的鲕状矿石是务正道铝土矿的重要组成部分, 对铝土矿中的鲕粒进行研究, 不仅能了解鲕粒的保存特征, 解释鲕状构造的成因, 更有助于揭示铝土矿的成矿机制, 为铝土矿的勘查工作提供技术指导。迄今为止, 对黔北地区铝土矿鲕粒成因的研究较少, 且多集中于遵义地区: 刘巽锋^[1]研究认为黔北遵义地区铝土矿鲕粒的形成直接与红土化作用有关; 刘长龄等^[2]认为中国沉积型铝土矿中的鲕粒主要形成于同生沉积阶

基金项目: 贵州省科技厅基金项目(LH[2014]7358, QKHJC[2019]1138, QKHJC[2017]1410)

收稿日期: 2020-03-09; **修订日期:** 2021-08-17

通信作者: 崔 滔, 副教授, 博士; 电话: 18085191983; E-mail: cuitao1203@163.com

段,成因不单纯;廖士范等^[3]主要通过通过对遵义地区岩溶型(古风化壳型)豆鲕粒的化学成分分析认为豆鲕粒为风化作用形成;张亚男等^[4]通过微区地球化学分析认为务正道铝土矿鲕粒相对于基质具有后生、原位的性质;杜远生等^[5]初步认为务正道铝土矿鲕粒的形成与胶体凝聚作用有关。总体上,目前对务正道地区铝土矿鲕粒的研究较为薄弱,如下几个问题未得到有效解决:1) 务正道铝土矿鲕粒的具体分类;2) 不同类型鲕粒的保存特征;3) 成鲕矿物的来源及形成;4) 鲕粒形成与铝土矿成矿的关系;5) 鲕粒形成的关键过程。综上所述,有必要对务正道铝土矿鲕粒开展系统研究工作,本文在前人研究的基础上,综合取样分析,结合铝土矿成矿过程,对务正道铝土矿中的鲕粒类型、保存特征、成鲕条件进行了系统研究,分析了鲕粒的成因。

1 地质背景

黔北-渝南成矿带为贵州、重庆境内的重要的铝土矿成矿带^[6],主要包括黔北的务正道地区及渝南的南川、武隆、彭水等地。区域构造位置为扬子板块南侧的黔北侏罗山式褶皱带^[7]。铝土矿分布面积约 7000 km²,行政区划受正安-务川-道真三县管辖。研究区地层出露由老到新依次为寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系和侏罗系;侏罗系出露面积较小,缺失泥盆系。区域构造线方向为 NNE,寒武系地层主要分布在背斜核部,三叠系和侏罗系主要分布在向斜核部。务正道地区铝土矿的空间分布受道真、大塘、鹿池-栗园、桃源、安厂、浣溪、新模、张家院向斜控制(见图 1),背斜内无含矿岩系。

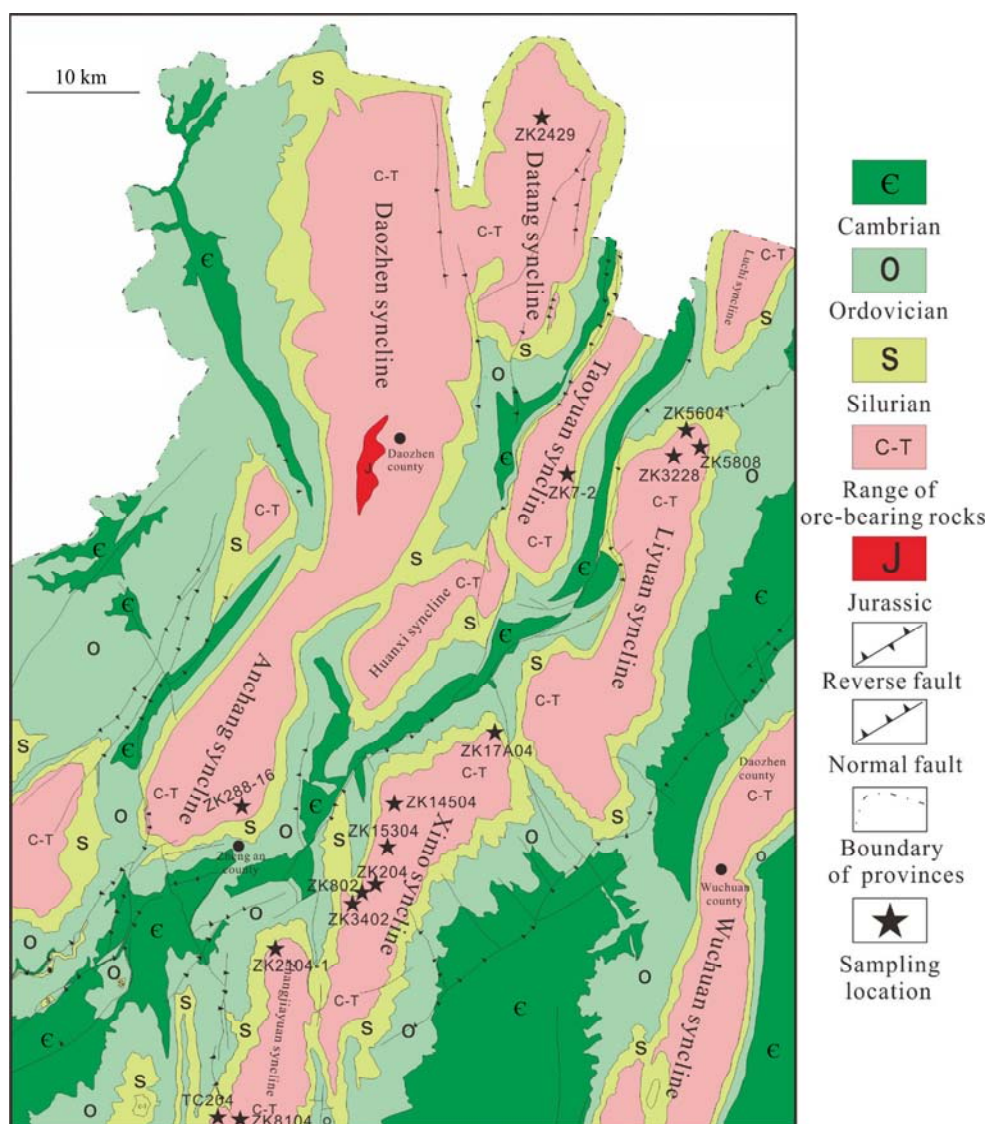


图1 研究区地质图(据文献[13], [21]修改)

Fig. 1 Geologic map of WZD area in northern Guizhou (Ref.[13] and Ref. [21])

广西运动和紫云运动对铝土矿成矿有较大影响,这两次构造运动使黔北地区长期暴露地表,遭受风化剥蚀,形成准平原化的古地貌,有利于铝土矿的形成。

黔北务正道地区铝土矿含矿岩系为层状和似层状,整体为灰色,岩溶不发育,矿层厚度为0.78~18.2 m^[8],区域变化较大。含矿岩系与上覆二叠系梁山组(P₁l)泥页岩或栖霞组(P₂q)灰岩,下伏石炭系黄龙组(C₂h)灰岩或志留系韩家店组(S₁hj)页岩均为平行不整合接触。铝土矿矿石可分为致密状、碎屑状、半土状、豆鲕状四种类型^[9-10],矿石成分以硬水铝石、绿泥石为主,含部分高岭石、伊利石、黄铁矿,含少量锐钛矿、长石、石英等矿物^[11-16],伴生元素 Ga、Li、Sc 达到综合利用标准^[17],具有一定的开发潜力。矿石演化过程为致密状→碎屑状→豆鲕状→半土状^[18],矿石品位依次为半土状>碎屑状>豆鲕状>致密状,但豆鲕状铝土矿矿石中亦有品位接近半土状矿石的高质量矿石。铝土矿含矿岩系可分为三段:下段为深灰色-灰绿色(有时为褐红色)铝土矿(赤铁矿),品位较低,一般未达工业矿石标准,有时为黏土岩,矿石(岩石)多为致密状;中部为浅灰-灰色铝土矿,Al 含量较高,矿石类型丰富,工业铝土矿层多位于此层位;顶部为灰色铝土矿,常为豆鲕状。

务正道铝土矿的时代为早二叠世^[19-20],形成于海陆过渡环境,海平面变化对铝土矿成矿有重要影响^[10, 21-23],韩家店组泥页岩和黄龙组灰岩均为铝土矿的物源^[24-26]。

2 取样分析

覆盖研究区选取数十口钻孔及剖面,选取不同类型矿石组合样品取样,挑选典型的鲕状矿石磨制岩石薄片、探针片,在偏光显微镜下观察及开展扫描电镜分析,取样位置见图1。样品的X射线粉晶衍射和扫描电镜分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。扫描电镜分析所采用仪器为Quanta 200型扫描电镜及GENESIS型能谱仪进行分析。X射线粉晶衍射分析所采用的仪器为荷兰X'pert MPD Pro X射线衍射仪型粉晶衍射仪,测试条件为:管压40 kV,管流40 mA,Cu 靶,Ni 滤波。

3 铝土矿鲕粒的类型与保存特征

黔北务正道铝土矿大部分鲕粒粒径不超过1 mm,鲕粒类型多样,按矿物成分划分有铝土质(绿泥石与硬水铝石互层)鲕粒、绿泥石鲕粒、硬水铝石鲕粒、赤铁矿鲕粒、黄铁矿鲕粒(见图2)。铝土质鲕粒和硬水铝石鲕粒为主要类型,占鲕粒总数90%以上。鲕粒按形态划分主要有4种类型:1) 核心粗大,同心层为1~2层的表皮鲕(见图2(a)~(c)),大量表皮鲕具有偏心鲕的特征,即鲕环中心与鲕核中心并不重合,鲕环有向一侧偏重的现象。2) 核心大小适中,同心层层数较多的正常鲕粒(见图2(d)和图3(a)、(c)、(h)),正常鲕又称真鲕,这类鲕粒具有典型的鲕状构造;3) 内部包含有部分或大量小鲕粒的复鲕粒(见图3(b)、(d)、(f));4) 形态由空间决定的不规则鲕粒,如叠层状鲕(见图3(g)、(h));5) 黄铁矿鲕粒(见图2(g))与赤铁矿鲕粒(见图2(h))含量较小,形态与铝土质/铝土矿鲕粒相似。

3.1 铝土矿表皮鲕的保存特征

表皮鲕因粒径较大常被视为豆粒,但铝土矿中的表皮鲕有明显的鲕核与鲕环的分化,因此,本文按结构成因分类将其划为鲕粒。表皮鲕通常由一个鲕核与一个鲕环组成,少数情况可见较模糊的两层鲕环,粒径变化比较大,多数不超过4 mm,粗者可接近10 mm。表皮鲕通常因为鲕核与鲕环的矿物种类不同而显现鲕状构造(见图2(a)、(b)、(c)),但也可因同类黏土矿物例如绿泥石内部Mg、Fe等成分含量不一致而呈现出鲕状构造(见图2(d))。表皮鲕形状一般不规则,多取决于核心的形状,整体呈椭球状。表皮鲕大量与碎屑颗粒伴生,若表皮鲕数量不足,则矿石由鲕状矿石变为含鲕粒碎屑状矿石(见图2(c)),表皮鲕多数情况下为铝土质鲕粒,表皮鲕为主的鲕状铝土矿易被误认成碎屑状铝土矿。通过统计分析,根据表皮鲕的类型不同,铝土矿含矿岩系可分为三类:1) 浅灰绿色含碎屑鲕状铝土矿,断面较光滑,结构致密,品位较低,基质和鲕环为浅灰绿色绿泥石,碎屑核心为灰色绿泥石、黑色长石(见图2(a)和(b)),碎屑核心为次棱角状-圆状,通常位于含矿岩系底部;2) 浅灰偏土黄色含碎屑鲕状铝土矿,断面较光滑、结构致密、品位较低、

碎屑核心呈次棱角状-圆状, 核心成分为黑色长石 (见图 2(c)), 基质和鲕环为绿泥石, 通常分布于中

下部; 3) 浅灰色鲕状铝土矿矿石 (见图 2(e)), 因含铁质及绿泥石使局部呈现浅绿-红色, 断面粗糙、

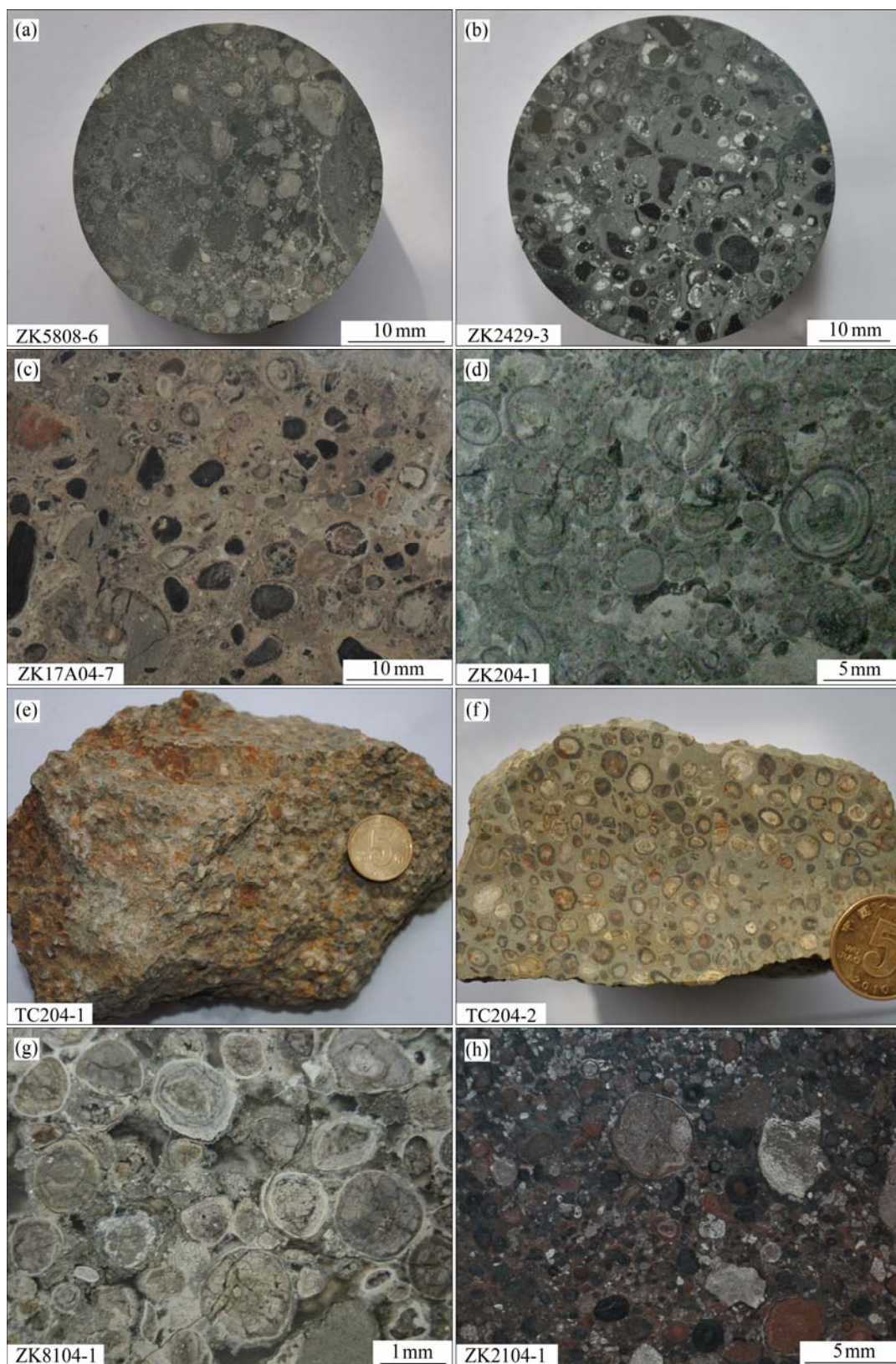


图 2 手标本和岩心中的鲕粒((c)引自文献[14]; (h)引自文献[27])

Fig. 2 Oolites of hand specimen and core: (a), (b) Core; (c), (d), (g), (h) Polished surface of core; (e) Hand specimen of bauxite ore; (f) Polished surface of hand specimen (Fig. (c) from Ref.[14]; Fig. (h) from Ref.[27])

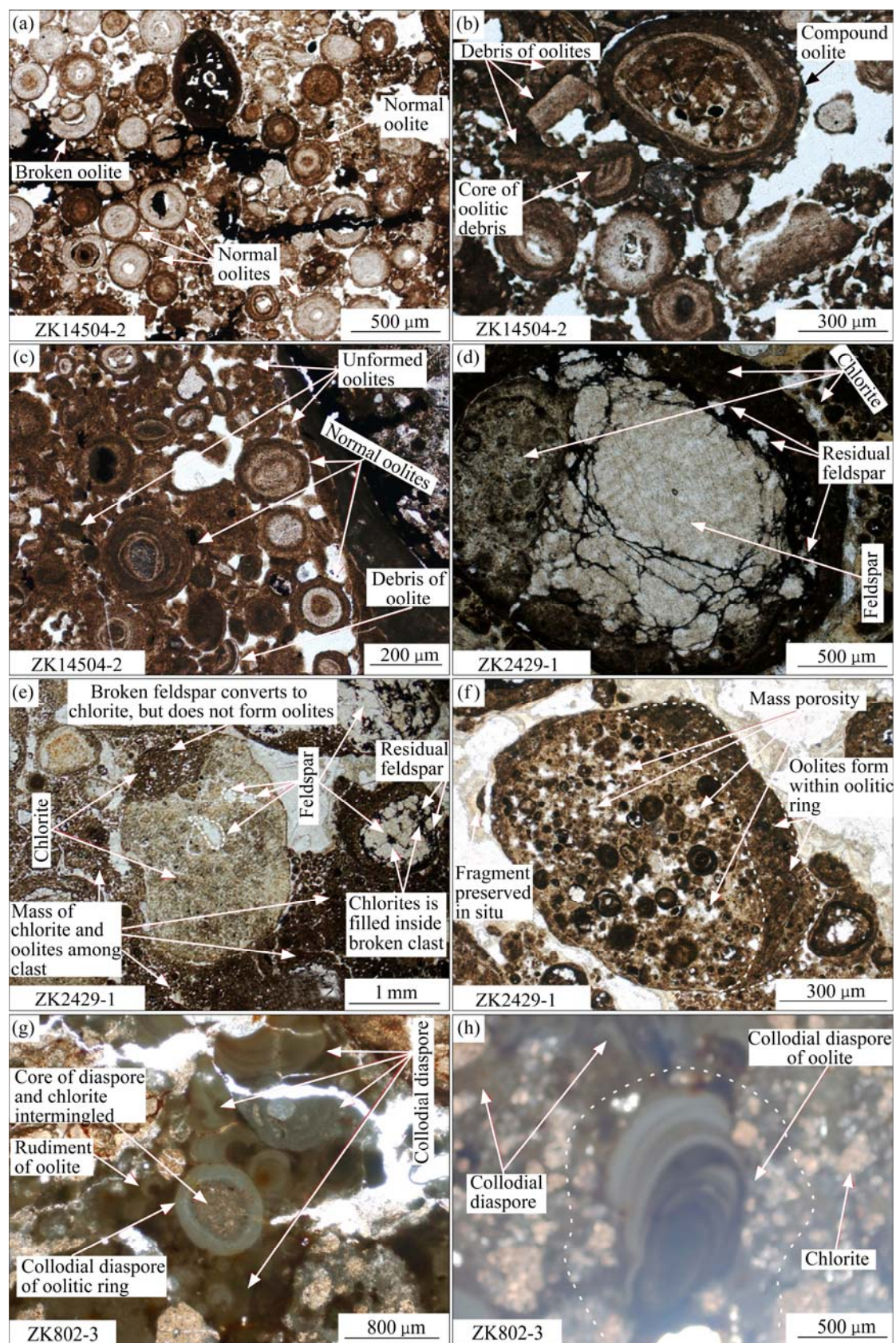


图 3 鲕粒形态特征(单偏光)((b)引自文献[28]; (d)、(e)、(g)、(h)引自文献[5]; (f)引自文献[14])

Fig.3 Morphological features of oolites (single-polarized light) (Fig. (b) from Ref.[28]; Figs. (d), (e), (g), (h) from Ref. [5]; Fig. (f) from Ref.[14])

孔隙度大、品位较高, 达到铝土矿矿石工业利用标准, 碎屑核心为绿泥石, 基质和鲕环为硬水铝石, 矿石分布于中上部可延伸至底部。一二类鲕状铝土矿(铝土岩)碎屑核心特征基本相似, 浅灰色鲕状铝土矿鲕粒核心与前两类有明显差异; 浅灰色鲕状铝土矿鲕核成分不如前两类表皮鲕均一, 核心整体球度好于前两类表皮鲕核心。无论哪种表皮鲕, 不同位置鲕环的厚度差异明显, 总体上以鲕核为起点, 向空间充裕位置变厚(见图 2(b)和(c)), 鲕环虽变厚, 但一般不会出现同心层的分化。

3.2 铝土矿正常鲕的保存特征

核心大小相对正常、鲕环较多的正常鲕一般粒径较小, 多数不超过 1 mm(见图 2(d)、图 3(a)、(b)、(c)、(h)和图 4); 核心为硬水铝石或绿泥石, 绿泥石及硬水铝石圈层围绕核心交替出现(见图 4)。绿泥石与绿泥石圈层、硬水铝石与硬水铝石圈层、绿泥石圈层与硬水铝石圈层之间厚度均不相等(见图 4)。同一圈层不同位置厚度也并非完全相等, 随位置变化圈层会出现厚度减小或增加的现象(见图 4(c)~(f))。绿泥石为主的圈层以浅灰色同心层出现, 硬水铝石为主的圈层以深灰色至黑色同心层出现, 同一成分圈层之间有明显的不同矿物混合共生现象, 如绿泥石圈层中混有硬水铝石, 硬水铝石圈层中混有绿泥石(见图 4(c)~(g))。同一圈层不同位置矿物含量或混含量也不完全一致, 随位置变化会出现绿泥石含量升高或降低的现象, 硬水铝石的变化则与绿泥石相反(见图 4(e)和(f))。正常鲕粒比较发育的含矿岩系一般为较高品位的铝土矿矿石, 矿石矿物组成主要为硬水铝石和绿泥石, 高岭石和其他矿物含量较小, 矿石的基质为硬水铝石(见图 4)。正常鲕的核心十分圆润, 球度远好于表皮鲕, 而且核心成分与圈层类似, 并非完全由均一矿物组成, 与表皮鲕的均一矿物碎屑核心有明显不同。正常鲕含量较高的鲕状铝土矿或含鲕粒碎屑状/半土状矿石品位远高于第一类和第二类表皮鲕, 比第三类表皮鲕鲕状矿石品位也要高。

3.3 铝土矿复鲕粒的保存特征

铝土矿中的复鲕粒比同位置其他类型鲕粒大, 但一般粒径不超过 2 mm, 总体体积并不大。复鲕

粒可分为 3 种类型: 1) 铝土质复鲕粒, 与正常鲕共生, 成分为硬水铝石和绿泥石(见图 3(b)), 粒径小于 1 mm, 鲕环有明显的塑性形变, 鲕环分层较明显, 最外层鲕环与基质为渐变过渡接触, 这种类型复鲕很少见。2) 长石核心复鲕, 由绿泥石鲕环与长石核心/(绿泥石+长石)核心构成(见图 3(d)), 核心裂隙发育, 鲕环分层不明显且具有明显的塑性形变, 绿泥石充填的位置内部形成小鲕粒, 绿泥石鲕环内部亦发育有小鲕粒但难形成正常鲕。长石只能作为核心或残留存在, 内部发育小鲕粒的位置矿物基本都已转变成绿泥石。此类型鲕粒大小主要由长石核心决定, 随长石颗粒核心大小变化, 粒径可超过 2 mm。裂隙的发育与鲕粒的发育呈正相关。因长石在铝土矿中含量整体不高, 因此这类型复鲕粒数量也较少。3) 绿泥石复鲕粒(见图 3(f)), 粒径一般不超过 1 mm, 鲕环和核心均为绿泥石, 核心包含较多小鲕粒, 鲕环分层不明显且不规则, 具有塑性形变, 鲕环内部亦有未完全成形的小鲕粒。此类型复鲕粒孔隙十分发育, 从鲕环至核心, 孔隙的发育与鲕粒的发育成呈相关。绿泥石复鲕粒为铝土矿复鲕粒中较为常见的复鲕粒类型。

3.4 赤铁矿鲕粒的保存特征

赤铁矿鲕粒并不常见, 集中出现在滨岸湿地附近的赤铁矿含矿岩系中。赤铁矿鲕粒核心直接呈凝胶状态, 鲕环也为塑性状态(见图 2(h))。赤铁矿鲕粒可分为表皮鲕和正常鲕粒, 表皮鲕相对体积较大, 可超过 2 mm, 大者可达 5 mm, 鲕环较发育的正常鲕粒径小于 1.5 mm, 一般不超过 1 mm。赤铁矿鲕粒的成分都为赤铁矿, 但颜色有差异。赤铁矿鲕粒中无论表皮鲕或正常鲕, 鲕环都具塑性形变。

3.5 黄铁矿鲕粒的保存特征

黄铁矿鲕粒在含矿岩系中并不常见, 成分几乎全为黄铁矿, 偶含其他矿物。黄铁矿鲕粒也可分为表皮鲕和正常鲕。粒径与正常鲕相似(见图 2(g)), 鲕环较发育的正常鲕粒径较小, 少部分粒径可达表皮鲕的大小。黄铁矿鲕环与铝土矿、赤铁矿鲕粒一样具有塑性形变(见图 2(g))。无论哪种黄铁矿鲕粒, 裂隙均十分发育(见图 2(g)), 这与铝土质/矿鲕粒、赤铁矿鲕粒有明显区别。

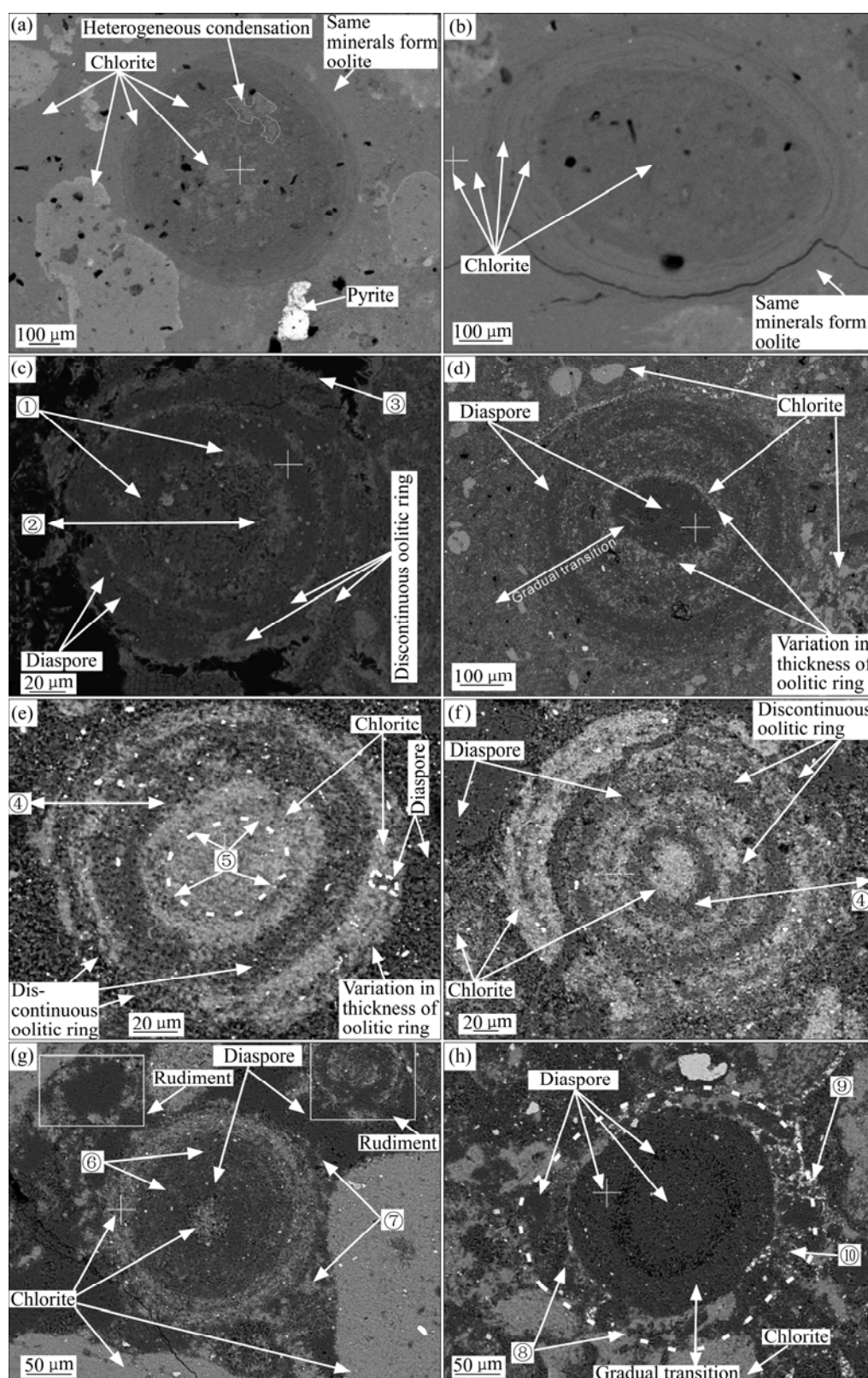


图4 鲕粒形态特征(扫描电镜照片)

Fig. 4 Morphological characteristics of oolites (scanning electron micrograph) (① Variation in thickness of oolitic ring; ② Diaspore nearly penetrates; ③ Chlorite newly formed outside oolitic ring; ④ Gradual transition; ⑤ Unconspicuous oolitic ring; ⑥ Tendency of chlorite to form oolitic ring; ⑦ Outermost incomplete oolitic ring, chlorite is attached to inner oolite ring of diaspore; ⑧ Oolitic ring of chlorite that is not fully formed on outside; ⑨ Oolitic ring of diaspore that is not fully formed on outside; ⑩ Mixobiosis of chlorite and diaspore)

4 成鲕条件分析

现今普遍认为碳酸盐岩鲕粒是在水动力扰动的条件下形成的, 但铝土矿中的鲕粒成因尚有不小的争议, 虽然都是鲕粒, 铝土矿中的鲕粒与碳酸盐岩鲕粒在成因上未必有关联。铝土矿中的鲕粒是一种世界性、普遍性地现象, 因此, 铝土矿中鲕粒的成因必定与铝土矿的成矿过程密切相关, 所以鲕粒的成因研究应结合铝土矿的成矿过程综合分析, 不能孤立地就鲕粒本身论成因。

4.1 成鲕过程中的水动力条件

务正道铝土矿中可见大量粗碎屑颗粒, 这往往给人一种铝土矿的形成与强水动力有关的印象, 除粗碎屑外铝土矿中并无强水动力的证据。仔细观察统计务正道铝土矿中的粗碎屑发现, 粗碎屑成分主要为绿泥石和硬水铝石, 这两种矿物并非盆地外搬运而来, 而是成矿过程中主要由盆地内部生成。由于绿泥石和硬水铝石并非红土化的主要矿物^[29], 且胶状的绿泥石和硬水铝石在未成岩固结前在外力作用下较容易被破坏而成为内碎屑, 在受到弱水动力干扰的情况下, 部分鲕粒破碎, 破碎的鲕粒性质相当于内碎屑, 在此基础上形成内碎屑颗粒、未成形鲕粒、新生鲕粒、鲕粒碎片、以破碎鲕粒为核心的新鲕粒共存的局面(见图 3(a)、(b)、(c)), 如无弱水动力干扰, 则直接形成正常鲕粒。粗碎屑成分还含有少部分高岭石和长石, 二者都属于易磨蚀类型, 颗粒既有磨圆较好的, 也有棱角状的, 而且混合保存在一起^[28], 这些特征表明二者是原地残留或短距离搬运破碎的结果。

成矿物质沉积后暴露地表, 淋滤作用下脱硅排铁, 铝元素相对富集最终成矿^[10, 30]。淋滤过程是一种暴露过程, 不存在强水动力条件, 粗碎屑也不代表高能环境, 既成岩前的沉积过程和暴露淋滤过程都为低能环境, 即使有少部分赤铁矿鲕粒在沉积时即成鲕, 整个成鲕过程中水动力条件依然是较弱的。鲕粒形成过程中主要接受的是淋滤过程中从剖面顶部至底部的成矿流体作用。由于铝土矿中部分碎屑呈现“漂砾”的特征^[31], 不排除在漫长的铝土矿成矿过程中某些时刻短期内盆地内部存在局部小范围的强水流作用(如临时性地表径流), 但这种短期作用影响范围较小, 对鲕粒的形成影响是极其微弱的, 几乎可以忽略, 且较强的水动力会破坏泥质颗粒, 鲕粒将难以保存。

4.2 主要成鲕矿物的形成

成鲕矿物主要为绿泥石和硬水铝石, 绿泥石可由高岭石、长石等红土化产物在还原环境下转化而来, 铝土矿沉积环境为还原性质, 同时淋滤过程中剖面顶部至底部含氧量逐渐降低, 这些过程都可形成绿泥石。硬水铝石的形成一直有争议, 通常有高温高压形成和常温常压形成两种观点。但硬水铝石并非红土化的主要产物, 务正道铝土矿为地表环境下搬运沉积淋滤改造作用下形成^[10, 30, 5], 即铝土矿形成的沉积和成矿过程中均不存在高温高压环境, 因此硬水铝石只能是常温常压下形成, 且务正道铝土矿中可见围绕后期溶蚀孔隙结晶析出的硬水铝石(见图 6 (a)和(b)), 这明显是沉积后常温常压下的产物, 因此, 硬水铝石在常温常压下生成是确凿无疑的。由矿石的 XRD 分析和鲕粒的扫描电镜图像可知, 硬水铝石多与绿泥石伴生(见图 4 和 5), 与其

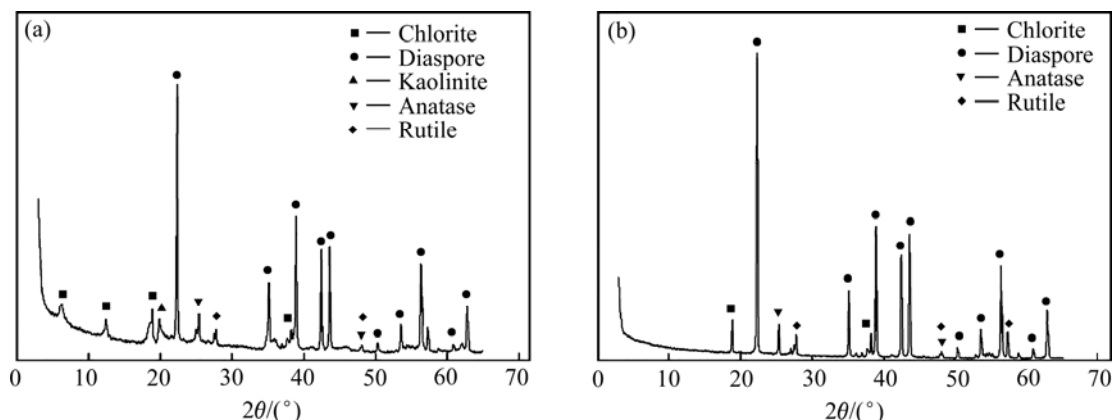


图 5 铝土矿的 XRD 谱

Fig. 5 XRD patterns of bauxite: (a) ZK3228-6; (b) ZK3228-8

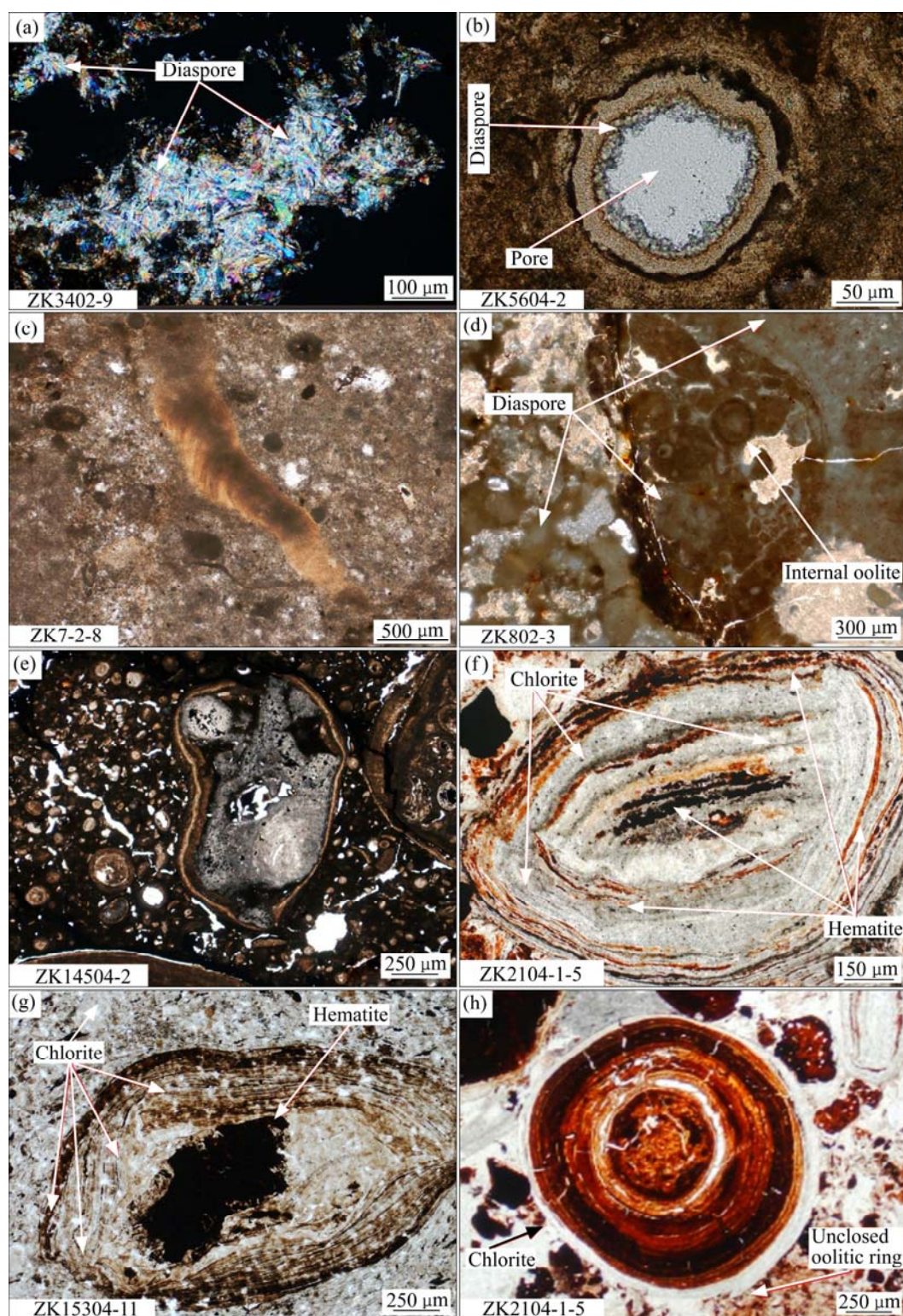


图 6 铝土矿镜下特征

Fig. 6 Features of bauxite under microscope: (a) Crossed polars; (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) Single-polarized light

他矿物伴生的情况较少, 尤其高品位的铝土矿多与绿泥石共生, 这暗示硬水铝石的形成与绿泥石关系密切。在淋滤形成的酸性环境中^[10, 12], 高岭石、长石等矿物转化成绿泥石和硬水铝石, 持续的淋滤作

用下, 绿泥石可进一步转化成硬水铝石从而提高矿石品质。高岭石、长石、绿泥石转化成硬水铝石的具体过程尚有待进一步研究, 从矿物伴生等情况分析硬水铝石可能主要由绿泥石转化而来。

4.3 胶体溶液作用

胶体物质广泛分布, 胶体作用是一种十分普遍的作用, 理论上任何物质都能产生胶体溶液。黔北务正道铝土矿的形成与胶体体系密切相关, 胶体的搬运、凝聚作用是铝土矿形成的重要因素^[5]。诸多证据表明, 务正道铝土矿中的胶体作用是广泛存在的: 1) 铝土矿中有代表胶体运移的渗滤管构造(见图 6(c)); 2) 务正道铝土矿矿石的基质主要为铝土矿矿物-胶状硬水铝石(见图 3(g)、(h)和图 6(d))。3) 铝土矿的主要成分之一绿泥石多呈胶状(见图 2(a)、(b)、(c)和图 6(f)、(g)); 4) 铝土矿中无论哪种类型的鲕粒, 鲕环均具有明显的塑性形变(见图 3、4 和 6),

这是胶体作用的特征; 5) 铝土矿中有特殊的“连生鲕粒”(见图 7(a)、(b)、(f)), 两个不相关的鲕粒, 最外层鲕环连在了一起, 或者说两个鲕粒共用一个鲕环, 鲕环成分为绿泥石, 鲕核成分为绿泥石或赤铁矿(见图 7(a)和(b))。除共用鲕环外, 连生鲕粒与非连生鲕粒外层鲕环还有向外延伸增长的现象(见图 7(b)~(f)), 增长部分若与其他鲕粒相连, 也会形成共用鲕环现象, 增长鲕环说明鲕环的生长方向在一定条件下发生了改变, 使原本应围绕鲕核发育的鲕环发育方向改变, 不再围绕鲕核形成同心层。连生鲕粒与鲕环增长现象较为罕见, 只出现于盆地边缘 ZK2104 中, 该钻孔含赤铁矿, 与绿泥石连生鲕

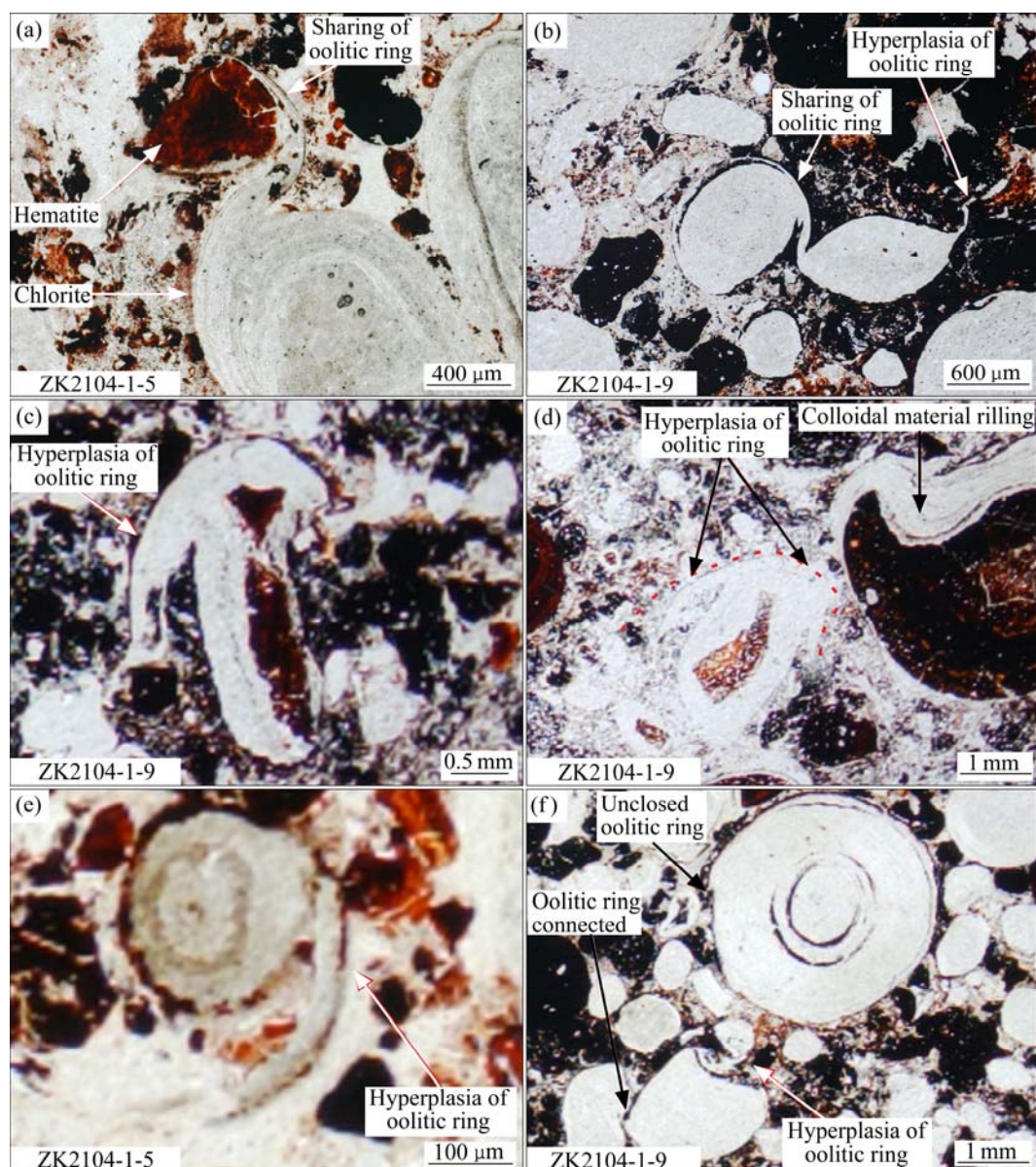


图 7 铝土矿中的特殊鲕粒(单偏光)

Fig. 7 Special oolites in bauxite (single-polarized light)

粒伴生的有大量赤铁矿碎屑及赤铁矿鲕粒。赤铁矿碎屑中可见非常明显的胶状绿泥石充填(见图 7(d)), 图中可见赤铁矿缺失了一部分, 绿泥石围绕缺失的空间凝聚, 充填形状顺碎屑缺失形状。连生鲕粒的共用鲕环, 鲕粒外的增长部分、绿泥石的柔性充填都反映出明显的胶体溶液在有限空间凝聚的特征。

4.4 成鲕矿物的混合凝聚

主要成鲕矿物为盆地内部形成的绿泥石和硬水铝石, 鲕粒形成过程中绿泥石和硬水铝石在凝聚析出时并非单一析出, 而是呈不同程度混合状态: 鲕核和鲕环中常见以一种矿物为主, 另一种矿物有少量分布在其中(见图 4(c)~(g))。鲕环外层可见未完全成型的圈层, 在此类圈层中两种矿物断续、交替混合出现(见图 4(e)~(h))。除鲕环外层外, 鲕核至鲕环中绿泥石和硬水铝石两种矿物混合过渡是普遍现象: 同一鲕环中矿物成分变化, 使鲕环不同位置增厚或减薄甚至断裂(见图 4(c)~(f)), 有鲕粒出现硬水铝石几乎从鲕核一直贯穿鲕粒的现象(见图 4(c)), 绿泥石鲕核内部有不明显的硬水铝石隐鲕环(见图 4(e)), 硬水铝石核心内部的绿泥石隐隐有成同心层的趋势(见图 4(g))。绿泥石形成的鲕粒核心内部亦有混合凝聚的现象, 鲕核内部出现部分不规则斑块, 浅灰斑块与较深色核心形成对比, 浅色团块和深色部分都为绿泥石, 因含 Mg、Fe、Al 元素的差异使鲕核内部出现不均匀凝聚的现象(见图 4(a))。

5 分析与讨论

5.1 表皮鲕成因

铝土矿鲕粒中表皮鲕较为特殊, 粒径较大的鲕粒基本都为表皮鲕, 这与其他类型鲕粒粒径一般不超过 2 mm, 多数不超过 1 mm 形成鲜明对比。表皮鲕核心多样, 同心层基本只有一层且呈胶状, 具有明显的偏向性。表皮鲕一般伴生有大量破碎泥质碎屑颗粒, 无论何种表皮鲕, 鲕环成分均为绿泥石, 这些特征表明表皮鲕是在静止条件或弱水动力扰动下, 胶体中绿泥石围绕碎屑颗粒凝聚形成。由于碎屑颗粒外包裹了一层与核心成分不同的绿泥石胶质而体现出圈层构造特征, 故而可以形成较大的鲕粒, 严格来讲表皮鲕可以归到碎屑颗粒的范畴。

若铝土矿中围绕碎屑颗粒的圈层不甚明显, 或无完整绿泥石圈层包裹的碎屑颗粒占多数时, 鲕状铝土矿则变为碎屑状铝土矿。综上所述, 表皮鲕是绿泥石胶体围绕碎屑颗粒凝聚形成, 只要绿泥石能完整包裹碎屑颗粒, 即可形成鲕粒。

5.2 正常鲕成因

正常鲕中鲕环发育最完善的全部是绿泥石与硬水铝石交替出现构成同心圈层(见图 4(c)~(f))。绿泥石可单独形成同心层发育的正常鲕(见图 4(a)和(b)), 虽然成分都为绿泥石, 但扫描电镜显示不同位置 Mg、Fe、Al 等元素的含量有差异, 正是这种绿泥石内部元素含量的差异导致鲕环的形成。与绿泥石类似, 硬水铝石也可单独发育成正常鲕(见图 3(h)和 4(h))。虽然绿泥石和硬水铝石可由元素含量差异形成鲕状构造, 但因为是同种矿物成鲕, 同心层的分层并不是特别清晰明显, 属于非典型鲕粒。由三种正常鲕成分可知, 绿泥石和硬水铝石两种矿物对正常鲕粒的形成至关重要, 要形成完整的正常鲕, 必须有充分的硬水铝石和绿泥石供给。绿泥石和硬水铝石并非母岩红土化后的主要产物, 主要形成于成矿物质堆积后接受淋滤作用的过程中^[5, 32]。在淋滤作用下形成绿泥石+硬水铝石胶体体系, 在合适的地球化学条件下硬水铝石和绿泥石相继围绕核心析出, 最终形成完整的核心+多同心层的鲕状构造。正常鲕的粒径一般不超过 1 mm, 多数小于 0.5 mm。成矿物质暴露地表后处于疏松堆积状态, 加之接受淋滤改造, 这种大小的孔隙在成矿物质中应该比较丰富, 胶体溶液在其中凝聚成鲕粒是完全可能的。务正道铝土矿正常鲕的成分为绿泥石和硬水铝石, 未见长石等其他成分, 正常鲕核心的成分与鲕环的成分是一致的。绿泥石和硬水铝石都为淋滤作用下的产物, 正常鲕的鲕核也并非外源碎屑颗粒, 而是盆地内部成矿胶体体系下凝聚形成, 因此, 大部分正常鲕都表现出较好的圆度和球度, 同时正常鲕鲕核成分的混合性、隐鲕环、不均匀凝聚现象都说明正常鲕的核心与鲕环一样为盆地内部凝聚形成。若成矿流体直接改造碎屑颗粒形成鲕粒, 则鲕粒各部分主要元素必然会有规律性差异, 但线扫描显示鲕核和鲕环的 Al、Si、Mg、Fe 等元素含量并无明显差异(见图 8), 鲕粒由鲕核至基质 Al 含量也没有明显增加的趋势(见图 8)。这表明鲕

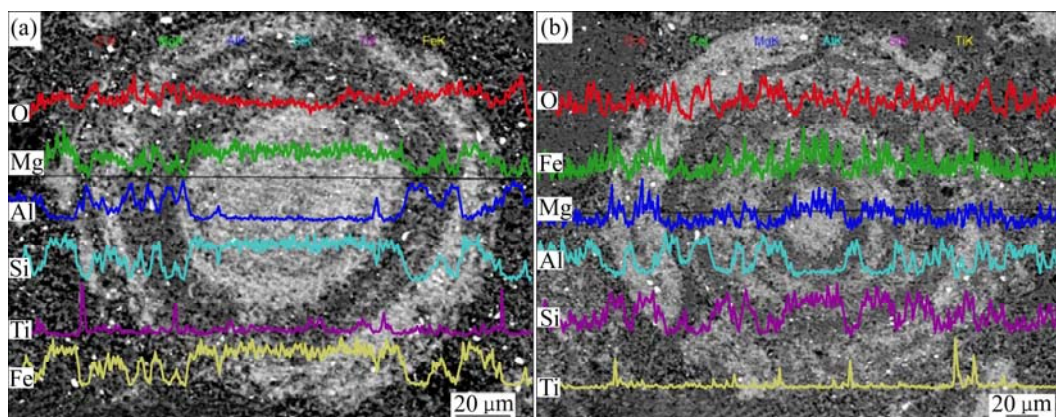


图8 鲕粒线扫描图

Fig. 8 Line scanning of oolites: (a) ZK14504-1-1; (b) ZK14504-1-2

粒并非成矿流体改造碎屑颗粒形成或红土化作用直接形成, 鲕粒的形成与碎屑颗粒并无直接关系, 即使盆地内部破碎的内碎屑, 也只是少部分充当鲕粒的核心, 而铝土矿成矿过程中又不存在稳定强水动力条件, 故鲕粒线扫描特征也支持鲕粒为盆地内部凝聚形成。鲕粒的最外层可见发育不完整的同心层(见图 4(c)、(e)~(h)), 也常见同心层不闭合的现象(见图 6(g)、(h)和图 7(b)、(f))。这表明鲕粒的形成是先发育鲕核, 然后再发育鲕环, 由内至外逐步形成, 最外层因空间限制及矿物供给等原因常发育矿物混合共存的不成型鲕环。

5.3 复鲕粒成因

铝土质复鲕粒成分为绿泥石和硬水铝石, 常与正常鲕共生, 鲕环胶状性质明显, 鲕核由胶体作用形成的多个成形或未成形正常鲕组成, 因此, 铝土质复鲕粒为在合适的空间条件下, 绿泥石和硬水铝石胶体围绕先期形成的正常小鲕粒凝聚析出。铝土质复鲕粒整体上比较少见, 多数情况下绿泥石和硬水铝石胶体直接凝聚成正常鲕, 这可能是由于铝土质复鲕粒对空间及化学条件要求比较高。长石复鲕粒鲕核为长石碎屑, 是母岩风化残留的产物。长石复鲕粒鲕环为胶状绿泥石, 变形明显, 核心内部孔隙中充填有绿泥石基质及鲕粒, 因此, 长石复鲕粒为绿泥石胶体围绕长石颗粒凝聚形成。绿泥石复鲕粒内部鲕粒成因与正常鲕绿泥石单独成鲕相似, 外部鲕环的形成原因与铝土质复鲕粒、长石复鲕粒相同, 都为胶体系统下绿泥石围绕核心凝聚形成。长石鲕粒与绿泥石复鲕粒存在成因上的联系: 首先铝土矿中这两者共同出现, 暗示两者之间有一定关

联; 其次, 成矿过程中, 长石颗粒可向绿泥石演化, 绿泥石颗粒中残留长石碎屑便是证明(见图 3(e)), 该碎屑颗粒顶部的绿泥石与其他位置演化程度不一致, 顶部深色部分虽未成鲕但与周边鲕粒性质已较接近; 第三, 长石颗粒中可形成大量孔隙, 绿泥石可充填其中并成鲕(见图 3(d)和(e))。当然, 由于绿泥石单独成鲕较为困难, 多数绿泥石仅仅是充填在孔隙中, 未发育成完整鲕粒。随淋滤过程持续, 长石颗粒几乎全部转化成绿泥石, 内部变为绿泥石鲕粒和基质充填, 而外部的绿泥石鲕环仅仅残存轮廓, 形成绿泥石复鲕粒(见图 3(f))。长石颗粒本身不能直接演变成鲕粒, 在孔隙中若长石颗粒未演变成绿泥石便只能作为残余碎屑存在(见图 3(d)和(e))。基本成型的复鲕粒粒径一般较小, 这表明长石等粗颗粒要演变成完整复鲕粒, 中间还要经过破碎改造的过程, 长石颗粒转变成的绿泥石也不能全部参与成鲕, 部分以基质的形式凝聚。

5.4 赤铁矿鲕粒与黄铁矿鲕粒的成因

赤铁矿鲕粒保存特征与铝土矿正常鲕相似, 赤铁矿鲕粒胶状结构明显, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 Fe_2O_3 胶体在自然界中较常见, 且赤铁矿为母岩主要风化产物之一。赤铁矿鲕粒为铁质胶体围绕核心凝聚形成, 赤铁矿核心可以是母岩残留的碎屑颗粒, 也可由后期胶体作用凝聚形成。赤铁矿鲕粒鲕环成分多为赤铁矿(见图 6(h)), 也可为赤铁矿与绿泥石混合组成(见图 6(f)), 还可完全为绿泥石(见图 6(g))。纯赤铁矿鲕粒既可形成于沉积期也可形成于沉积后, 而含绿泥石的赤铁矿鲕粒则应形成于沉积后。ZK2104 中赤铁矿碎片作为鲕粒核心或与鲕粒、鲕粒碎片伴生

(见图 7(c)~(e))。这表明此部分含矿岩系形成中存在一定的水动力作用,与 ZK2104 位于靠近海洋的沉积盆地边缘情况也相符^[27]。这种水动力扰动应该不会很强,否则泥质的鲕粒恐难以完整保存下来。在弱水动力扰动之下,绿泥石鲕环的凝聚方向发生改变,形成特殊的“连生鲕粒”和“增生鲕粒”(见图 7)。黄铁矿不是母岩风化的产物,多为沉积后至成岩过程中形成,黄铁矿鲕粒为沉积期后发育裂隙的情况下,黄铁矿交代其他类型鲕粒形成。

5.5 小结

通过手标本、光片、XRD、偏光显微镜、扫描电镜分析可知,铝土矿中的鲕粒主要由胶体溶液凝聚而成。低能条件下,在疏松沉积物孔隙中,由内至外,绿泥石和硬水绿泥石混合胶体溶液先凝聚成鲕核,之后绿泥石和硬水铝石交替析出,形成核心和多同心层的典型鲕状构造,少数情况下绿泥石或硬水铝石因内部元素含量差异可单独在孔隙中凝聚成不典型鲕粒。由于绿泥石与硬水铝石凝聚的差异性,使鲕粒中出现鲕环厚度变化、鲕环不连续、外层鲕环不闭合、矿物混合渐变过渡、不均匀凝聚、隐鲕环等特殊现象。鲕粒形成后,若淋滤作用持续进行,则绿泥石向硬水铝石转变,鲕状构造被破坏,这种去鲕粒化作用使鲕状构造仅留下残痕或彻底消失,鲕状矿石向碎屑状矿石或半土状矿石转变(见图 9(a)和(b))。赤铁矿和绿泥石胶体溶液凝聚形成赤铁矿鲕粒或赤铁矿和绿泥石混合鲕粒,形成机制与铝土质正常鲕相似。赤铁矿鲕粒形成的盆地边缘存在弱水动力扰动,这种扰动使部分绿泥石鲕环的生长方向发生改变,形成赤铁矿鲕粒、连生鲕粒、增生鲕环、赤铁矿碎屑共存的现象。黄铁矿鲕粒为后期交代形成。绿泥石胶体溶液原地围绕内碎屑颗粒凝聚形成表皮鲕。胶体溶液围绕长石颗粒可形成表皮鲕。长石颗粒在成矿过程中破碎,内部充填绿泥石成鲕;与此同时,长石颗粒也在向绿泥石转化,转化后部分绿泥石参与成鲕,部分绿泥石作为基质充填,最终形成绿泥石复鲕粒。绿泥石复鲕粒和长石复鲕粒中完整成形的鲕粒较少,大部分鲕粒只具备雏形(见图 3(d)和(f)),说明长石演变成绿泥石再演变成鲕的过程较为复杂,难度较大。

绿泥石和硬水铝石鲕粒形成过程中,硬水铝石在孔隙中凝聚,对铝土矿的形成及矿石品位的提高

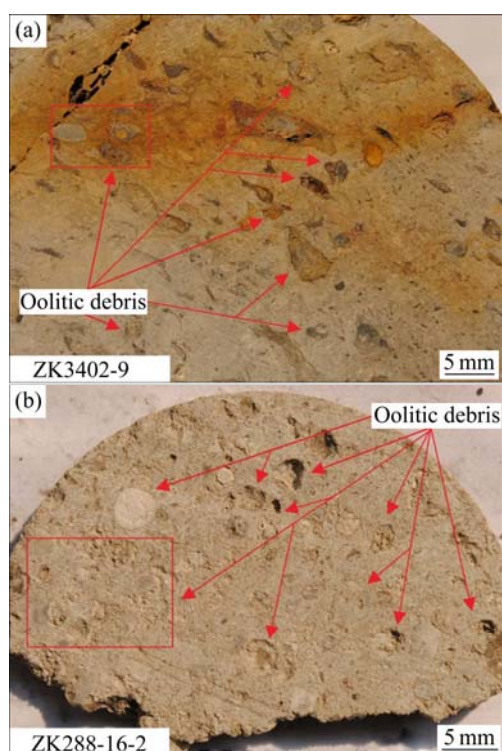


图9 鲕粒残骸形貌

Fig. 9 Morphologies of debris of oolites: (a) Clastic bauxite ore; (b) Half-earthy bauxite ore

肯定是有利的,大量正常鲕粒形成的鲕状矿石品位往往较高。由于这些矿石基质主要为硬水铝石,鲕粒中至少 1/2 体积为硬水铝石,因此能提高铝土矿矿石品位。纯硬水铝石鲕粒的形成对成矿则极为有利。纯绿泥石鲕粒的形成对铝土矿成矿无多大帮助,绿泥石为主的鲕粒包括长石核心的绿泥石表皮鲕等品位都较低,达不到工业矿床的利用标准。赤铁矿鲕粒发育的层位往往形成赤铁矿层,赤铁矿鲕粒中并不含铝土矿物,赤铁矿也不与铝土矿物伴生,赤铁矿鲕的形成对铝土矿成矿无益。黄铁矿鲕粒为后期交代形成,除交代赤铁矿鲕粒外,都降低了铝土矿的品位。

6 结论

1) 铝土矿含矿岩系中鲕粒按成分可分为铝土质鲕粒、绿泥石鲕粒、硬水铝石鲕粒、赤铁矿鲕粒、黄铁矿鲕粒,按形态可分为表皮鲕、正常鲕、复鲕粒。

2) 形成鲕粒的矿物成分主要为绿泥石和硬水铝石,另含有少量长石、高岭石等其他矿物。硬水

铝石可能主要为常温常压条件下由绿泥石转化而来。

3) 铝土矿中的粗碎屑颗粒除长石等少数为原地残留外,其余都为盆地内部形成,碎屑颗粒均属于内碎屑,泥质粗碎屑颗粒并不反映高能环境。

4) 除部分赤铁矿鲕粒外,铝土矿中的鲕粒为低能条件下在富孔隙的沉积物中形成,绿泥石和硬水铝石形成胶体溶液,淋滤过程中两种矿物交替凝聚形成核心和同心层结构,大部分鲕核为胶体溶液直接凝聚形成。

5) 持续的淋滤作用会破坏鲕状构造,发生去鲕粒化作用,鲕粒仅剩下残骸或彻底消失;鲕状铝土矿矿石向碎屑状或半土状矿石转变,铝土矿品质进一步提高。

6) 含硬水铝石的鲕粒对铝土矿的形成是有利的,纯绿泥石鲕粒、长石核心鲕粒、赤铁矿鲕粒对铝土矿的形成无帮助,黄铁矿鲕粒的形成是一种破坏作用,降低铝土矿的品质。

REFERENCES

- [1] 刘翼锋. 黔北铝土矿豆鲕粒结构的成因机制[J]. 贵州地质, 1988, 5(4): 337-341, 382.
LIU Xun-feng. Genesis mechanism of bean-pebble texture of bauxite in northern Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1988, 5(4): 337-341, 382.
- [2] 刘长龄, 覃志安. 我国沉积铝土矿中豆鲕粒的特征与成因[J]. 地质找矿论丛, 1990, 5(1): 72-83.
LIU Chang-ling, QIN Zhi-an. Characteristics and origins of pisolites and oolites in sedimentary bauxite of China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1990, 5(1): 72-83.
- [3] 廖士范, 梁同荣. 中国铝土矿地质学[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1991: 131-138.
LIAO Shi-fan, LIANG Tong-rong. Bauxite geology of China[M]. Guiyang: Science and Technology Publishing House of Guizhou, China, 1991: 131-138.
- [4] 张亚男, 张莹华, 吴慧, 等. 黔北务正道地区铝土矿鲕状矿石中鲕粒的微区元素地球化学特征及其成矿意义[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 62-70.
ZHANG Ya-nan, ZHANG Ying-hua, WU Hui, et al. Microscopic geochemical characteristics of oolite in oolitic bauxite ores from Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area in the northern Guizhou province and their metallogenic significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 62-70.
- [5] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区二叠系铝土矿沉积地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 159-160.
DU Yuan-sheng, ZHOU Qi, JIN Zhong-guo, et al. Sedimentary geology of the Permian bauxite deposit in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2016: 159-160.
- [6] 刘平. 八论贵州之铝土矿-黔中-渝南铝土矿成矿背景及成因探讨[J]. 贵州地质, 2001, 18(4): 238-243.
LIU Ping. Discussion on the metallogenic setting of the Qianzhong-Yu'nán bauxite in Guizhou and its genesis[J]. Guizhou Geology, 2001, 18(4): 238-243.
- [7] 杜定全, 任军平, 王约. 古岩溶起伏对黔北铝土矿的控制作用[J]. 矿物学报, 2007, 27(S1): 473-476.
DU Ding-quan, REN Jun-ping, WANG Yue. Controlling of ancient karst hysionomy on bauxite in northern Guizhou[J]. Acta Mineralogical Sinica, 2007, 27(S1): 473-476.
- [8] 雷志远, 翁申富, 陈强, 等. 黔北务正道地区早二叠世大竹园期岩相古地理及其对铝土矿的控矿意义[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 8-12.
LEI Zhi-yuan, WENG Sheng-fu, CHENG Qiang, et al. Lithofacies paleogeography of the Dazhuyuan age, early Permian in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province and its implication for bauxitisation[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 8-12.
- [9] 翁申富, 雷志远, 陈强, 等. 黔北务正道地区铝土矿沉积相与矿石品质的关系[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 19-22.
WENG Shen-fu, LEI Zhi-yuan, CHENG Qiang, et al. A correlation of sedimentary facies and bauxite ore grade of the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxitic belt, northern Guizhou province[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 19-22.
- [10] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究进展[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 1-6.
DU Yuan-sheng, ZHOU Qi, JIN Zhong-guo, et al. Advances

- in basic geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 1–6.
- [11] 殷科华. 黔北务正道铝土矿的成矿作用及成矿模式[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 452–457.
- YIN Ke-hua. Mineralization and metallogenic model for bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 452–457.
- [12] 张莹华, 凌文黎, 吴 慧, 等. 黔北铝土矿不同类型矿石地球化学特征及其对成矿作用的指示[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 71–79.
- ZHANG Ying-hua, LIN Wen-lin, WU Hui, et al. Geochemistry of varied type ores of northern Guizhou bauxites and its implication for mineralization[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 71–79.
- [13] 汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 27–33.
- WANG Xiao-mei, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al. Rare earth element geochemistry of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 27–33.
- [14] 崔 滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北地区铝土矿矿物学与地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(10): 2905–2920.
- CUI Tao, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al. Mineralogical and geochemical characteristic of bauxite in northern Guizhou[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(10): 2905–2920.
- [15] GU Jing, HUANG Zhi-long, FAN Hong-peng, et al. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 130: 44–59.
- [16] WANG Xiao-mei, JIAO Yang-quan, DU Yuan-shen, et al. REE mobility and Ce anomaly in bauxite deposit of WZD area, northern Guizhou, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 133: 103–117.
- [17] 金中国, 刘 玲, 黄智龙, 等. 贵州务—正—道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力[J]. 地质学报, 2019, 93(11): 2847–2861.
- JIN Zhong-guo, LIU Ling, HUANG Zhi-long, et al. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou province[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(11): 2847–2861.
- [18] CUI Tao. Analysis on evolutionary sequence of bauxite ore in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhan area, northern Guizhou, China[J]. International Journal of u- and e- Service, Science and Technology, 2016, 9(2): 67–76.
- [19] 黄 兴, 张雄华, 杜远生, 等. 黔北地区铝土矿形成的地质时代[J]. 地质科技情报, 2012, 31(3): 49–54.
- HUANG Xing, ZHANG Xiong-hua, DU Yuan-sheng, et al. Age of bauxite forming in Northern Guizhou[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(3): 49–54.
- [20] 黄 兴, 张雄华, 杜远生, 等. 黔北务正道地区及邻区石炭纪—二叠纪之交海平面变化对铝土矿的控制[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 80–86.
- HUANG Xing, ZHANG Xiong-hua, DU Yuan-sheng, et al. Control of sea-level changes over the forming of bauxite between Carboniferous and Permian in northern Guizhou and adjacent regions[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 80–86.
- [21] 崔 滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区铝土矿形成环境的古盐度识别[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 46–51.
- CUI Tao, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al. Analysis on paleosalinity of sedimentary environment of bauxite in northern Guizhou[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 46–51.
- [22] 刘辰生, 金中国, 郭建华. 黔北务正道地区沉积型铝土矿床层序地层学[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 179–189.
- LIU Chen-sheng, JIN Zhong-guo, GUO Jian-hua. Sequence stratigraphy of bauxite deposition in Wuzhengdao area in Qianbei, north Guizhou[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 179–189.
- [23] 刘辰生, 金中国, 郭建华. 海平面变化对沉积型铝土矿富集成矿的影响——以黔北铝土矿为例[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 985–993.
- LIU Chen-sheng, JIN Zhong-guo, GUO Jian-hua. Effect of sea level change on enrichment and mineralization of bauxite—

- Taking Qianbei bauxite for example[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(5): 985–993.
- [24] 赵 芝, 王登红, 李沛刚, 等. 黔北大竹园碎屑锆石年代学及成矿指示意义[J]. 岩矿测试, 2013, 32(1): 166–173.
- ZHAO Zhi, WANG Deng-hong, LI Pei-gang, et al. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Dazhuyuan formation in northern Guizhou: Implication for bauxite mineralization[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(1): 166–173.
- [25] GU Jing, HUANG Zhi-long, FAN Hong-peng, et al. Provenance of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China: LA-ICP-MS and SIMS U-Pb dating of detrital zircons[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 70: 265–282.
- [26] 余文超, 杜远生, 周 琦, 等. 黔北务正道地区下二叠统铝土矿层物源研究: 来自碎屑锆石年代学的证据[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 19–29.
- YU Wen-chao, DU Yuan-sheng, ZHOU Qi, et al. Provenance of bauxite beds of the lower Permian in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province: Evidence from detrital zircon chronology[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 19–29.
- [27] 崔 滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿沉积古地理及其控矿意义[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 9–18.
- CUI Tao, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al. Sedimentary palaeogeography and its mineralization significance of the Early Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 9–18.
- [28] 巴尔多西 G. 红土型铝土矿[M]. 顾皓民, 译. 北京: 辽宁科学技术出版社, 1994: 7–15.
- BÁRDOSSY G. Lateritic bauxites[M]. GU Hao-ming, transl. Beijing: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1994: 7–15.
- [29] 崔 滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区铝土矿沉积特征及分布规律[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 52–56.
- CUI Tao, JIAO Yang-quan, DU Yuan-sheng, et al. Analysis on sedimentary characteristics and distribution features of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 52–56.
- [30] 余文超, 杜远生, 顾松竹, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿多期淋滤作用及其控矿意义[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 34–39.
- YU Wen-chao, DU Yuan-sheng, GU Song-zhu, et al. Multiperiod leaching process of early Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province and its significance of ore-control[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 34–39.
- [31] CUI Tao. Special structure and its geological significances of WZD bauxite[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989/990/991/992/993/994: 1400–1403.
- [32] CUI Tao. Mineral genesis and evolutionary sequence of bauxite deposit in WZD area, northern Guizhou, China[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(19): 11379–11391.

Origin of oolites of sedimentary bauxite in northern Guizhou, China

CUI Tao, YAN Jun, ZHANG Min

(College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China)

Abstract: By means of field geological investigation, hand specimen observation, rock smooth surface analysis, polarized light microscope observation, XRD and SEM analysis, the oolites in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area (WZD) in northern Guizhou, China, were systematically studied. The results show that, according to the composition, the oolites in bauxite ore-bearing rock system can be divided into aluminous oolite, chlorite oolite, diaspora oolite, hematite oolite and pyrite oolite. The coarse clastic particles in bauxite are the internal clasts formed in the basin, while the argillaceous coarse clastic particles do not reflect the high energy environment. The diaspora in bauxite was formed under normal temperature and pressure. In addition to some hematite oolites, most of the oolites in bauxite formed in situ in the pores under the condition of low energy condition or leaching process, and chlorite and diaspora alternately agglomerated to form the core and concentric layer structure. Continuous leaching destroyed the oolitic structure, and transformed the oolitic bauxite ore to clastic or half-earthy ore, further improved the quality of bauxite.

Key words: oolite; origin; bauxite; northern Guizhou

Foundation item: Projects(LH[2014]7358, QKHJC[2019]1138, QKHJC[2017]1410) supported by the Science and Technology Department Foundation of Guizhou Province, China

Received date: 2020-03-09; **Accepted date:** 2021-08-17

Corresponding author: CUI Tao; Tel: +86-18085191983; E-mail: cuitao1203@163.com

(编辑 李艳红)