

贵州修文小山坝铝土矿中稀土元素地球化学特征

叶霖^{1,2}, 程曾涛^{1,3}, 潘自平^{1,3}

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院
广州地球化学研究所 边缘海实验室, 广州 510640; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要:前人已经积累了大量贵州铝土矿的研究成果,但关于铝土矿与其中稀土元素的关系至今不清。本研究以修文小山坝铝土矿为例,通过 ICP-MS 分析测试,研究了矿石和围岩的稀土元素组成。结果表明,矿石中稀土配分模式为轻稀土富集向右倾斜型,具明显 Eu 负异常,与下寒武统娄山关群含泥质白云岩稀土特征参数和配分模式相似,指出该矿床成矿物质来源以下寒武统娄山关群含泥质白云岩为主,在相对氧化环境下经风化作用成矿。矿床中稀土元素主要富集于矿体及其周围,与 Al₂O₃ 含量具正相关关系。矿石中稀土元素含量大多达到或超过综合利用标准,具有巨大的潜在经济价值。

关键词:铝土矿;稀土元素;地球化学特征;小山坝

中图分类号:P618.450.673 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2007)03-0228-06

The REE Geochemical Characteristics of the Xiaoshanba Bauxite Deposit, Guizhou

YE Lin^{1,2}, CHENG Zeng-tao^{1,3}, PAN Zi-ping^{1,3}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: There are plenty bauxite resources in Guizhou Province. Although a large amount of valuable data for the geology of bauxite deposits have been obtained, it is still not understood clearly about the relationship between bauxite ores and their contained rare earth elements (REE). This study has analyzed REE compositions of various types of bauxite ores and wall rocks from the Xiaoshanba bauxite deposit in Xiuwen County by using ICP-MS. The results show that the REE distribution patterns of bauxite ores are characterized with LREE rich and obvious negative Eu anomaly. These characters are similar to that of the argillaceous dolomite from the Lower Cambrian Loushanguan Group. It is believed that the ore-forming materials were mainly sourced from the argillaceous dolomite of the Lower Cambrian Loushanguan Group and the bauxite deposit was formed through weathering of the dolomite in relatively oxidative environment. In addition, the REE is only enriched in the bauxite ore and the red mud nearby, with positive correlation to the Al₂O₃ contents of samples. The REE contents in bauxite ores are up to or high enough for industrial comprehensive utilization with tremendous economic potential.

Key words: bauxite; rare earth elements; geochemical characteristics; Xiaoshanba

贵州铝土矿广布,自贵阳—清镇一线及凯里—黄平,北经修文、息烽、开阳、遵义、正安、道真、务川,至重庆和四川南部等地,构成北北东向长约 370 km 的黔中—渝南铝土矿成矿带^[1,2]。前人对贵州铝土矿的矿床类型、含矿岩性、分布、分类和沉积相等进行了详细的地质调查研究^[3~8],积累了大量成果。各矿带的铝土矿石稀土和微量元素组成差异明显,

成矿物质具不同来源^[9],并可能与矿床的形成环境以及成矿作用过程的演化特征有关。修文矿带铝土矿的成矿物质与寒武系碳酸盐岩有关^[10],而稀土元素和铝土矿的关系有待进一步工作^[11]。

修文小山坝铝土矿床是黔中铝土矿带具代表性的露天矿床之一。本文研究了矿体与含矿岩系的稀土元素组成,探讨了矿床成因和成矿物质来源。

收稿日期:2006-08-21 收到,11-01 改回

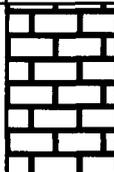
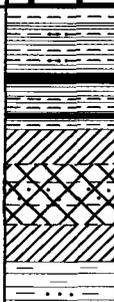
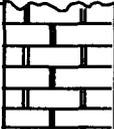
基金项目:贵州省科技项目(黔科合计[2004]3082号);矿床地球化学国家重点实验室项目

第一作者简介:叶霖(1970—),男,副研究员,博士,从事矿床地球化学研究。E-mail: yelin@vip. gyig. ac. cn.

1 区域及矿床地质特征

修文小山坝铝土矿床位于贵阳市北西 30 km 处,北起银厂坡,南至挖泥坑,全长 7 km,属于黔中—川南成矿带南部的修文铝土矿成矿带的一部分。矿体产状平缓,呈似层状,倾角 5°~10°,向北东倾斜。铝土矿层长 500~1400 m,宽数百米至 1000 m 不等,厚 2~20 m,一般厚 8 m 左右。符合工业要求的铝土矿层平均厚 2~3 m,位于含矿系中部,多数由粗糙状(土状)铝土矿石、半粗糙状(半土状)铝土矿石、砾屑豆鲕状铝土矿石,以及致密状铝土矿石等自然矿石类型组成。1957 年开始勘探,累计探明铝土矿 2026.4 万 t,矿石平均品位为 67.91%。

含矿层位为下石炭统九架炉组(图 1)。

地质时代	地层名称	代号	柱状图	厚度/m	岩性描述
下石炭统	摆佐组	C _{1b}		6~22	灰、浅灰、灰黄色厚层结晶灰岩,偶夹泥质或砂质,方解石脉多,底部为白云岩及白云质灰岩
	九架炉组	C _{1j}		2~20	上部为灰—浅灰色铝土质页岩、黄色页岩及粉砂岩互层,有时夹碳质页岩或劣质煤 铝土矿含矿层,上、下部为致密铝土质粘土岩,中间为铝土矿,底部为赤铁质粘土岩夹紫红色砂质页岩 与下伏基岩为喀斯特侵蚀面接触
中上寒武统	娄山关群	C _{2,3}			灰色厚层块状细纹白云岩

据贵州省地质局区测队,1978;层序岩性据修文地质队,1958

图 1 贵州修文小山坝铝土矿矿床地层柱状剖面图

Fig. 1 Stratigraphic sectional drawing of Xiaoshanba bauxite deposit, Xiuwen, Guizhou Province

(1)摆佐组:上部为结晶灰岩夹泥岩,下部为白云岩,共厚 6~22 m。

(2)九架炉组:主要含矿层位。上部为灰色铝土质页岩、粘土岩、粉砂岩夹碳质页岩及劣质煤层;中部为铝土矿层,其中铝土矿与铝土质粘土岩互层;下部为铁质粘土岩夹砂岩。总厚 2~20 m。

(3)下伏地层为中—上寒武统娄山关群,由白云岩组成。

2 稀土元素分析结果

研究用的 18 件样品采自小山坝一矿和二矿露天采场,其中铝土矿石样品 8 件,高岭土粘土岩样品 6 件,绿泥石化页岩样品 1 件,风化残留白云岩样品 3 件。稀土元素组成用中国科学院地球化学研究所的 Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型 ICP-MS 测定,分析方法见文献[12],用 GSR-3 和 JG-2 标样测定的误差小于 5%~10%,结果见表 1。

(1)寒武系娄山关群风化后的碳酸盐岩:该类岩石夹于铝土矿层、高岭土粘土岩中,分布不均。CaO 含量为 39.10%~48.2%,与典型白云岩相比 MgO 含量较低(0.23%~7.65%),SiO₂ 明显偏高(1.99%~7.71%),属于寒武系娄山关群白云岩半风化后的残留碳酸盐岩。稀土元素分析结果表明,稀土元素总量变化较大(75.22×10⁻⁶~341.80×10⁻⁶,平均 197.02×10⁻⁶),以轻稀土富集为特征,其(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 0.76~3.38(平均 2.44)、1.81~2.97(平均 2.30)和 1.37~9.16(平均 5.91)。稀土配分模式为中等右倾平坦曲线(图 2),LREE/HREE 值为 1.71~6.22,平均 4.06, Eu 明显负异常(0.57~0.66,平均 0.62),Ce 负异常或异常不明显(0.58~0.96,平均 0.83)。

(2)绿泥石化页岩:主要呈层状分布于含矿岩系夹层,厚约 20 cm。稀土总量较低(181.46×10⁻⁶),轻稀土富集(LREE/HREE=5.15), (La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 7.98、0.59 和 4.64。稀土配分模式为中等右倾曲线(图 2),Eu 明显负异常(0.51),Ce 异常不明显(0.99)。

(3)紫红色铁质粘土岩:位于含矿岩系底部,其 Al₂O₃(37.80%)和 SiO₂(42.10%)含量较高,稀土总量较高(553.60×10⁻⁶),轻稀土富集(LREE/HREE=11.87), (La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 4.83、1.69 和 12.91。稀土配分模式为中等右倾曲线(图 2),Eu 明显负异常(0.58),Ce 异常不明显(0.97)。

(4)高岭土粘土岩:分布于铝土矿层上下,为贫矿层,Al₂O₃ 含量为 30.30%~51.95%,SiO₂ 为 30.30%~47.30%。分析结果表明,矿层上部的高岭土粘土岩的稀土元素总量为(63.16~116.82)×10⁻⁶,平均 89.99×10⁻⁶,轻稀土富集,其(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 1.72~4.10(平均 2.91)、1.12~1.14(平均 1.13)和 2.37~6.06(平均 4.22),稀土配分模式为中等右倾平坦曲线(图 2),LREE/HREE 值为 3.53~6.43,平均

表1 修文小山坝铝土矿稀土元素含量($\times 10^{-6}$)及相关参数
 Table 1 Contents ($\times 10^{-6}$) of rare earth elements and their parameters of Xiaoshanba bauxite deposit,
 Xiuwen County, Guizhou Province

样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
0116-9	风化残留 白云岩	82.24	89.82	17.05	68.37	15.30	3.79	22.29	3.18	18.78	3.57	9.35	1.15	6.06	0.84
0116-13		14.72	29.11	3.65	13.84	2.92	0.56	3.09	0.50	2.77	0.63	1.63	0.22	1.38	0.22
0116-8		14.56	39.88	7.03	33.14	12.05	3.23	18.67	3.14	19.29	3.72	10.01	1.24	7.15	0.93
0116-11	高岭土粘	24.93	46.76	5.62	19.21	3.82	0.74	3.92	0.64	4.12	0.88	2.58	0.40	2.78	0.42
0116-6	土岩(上部)	9.12	22.42	2.54	11.00	3.34	0.80	3.62	0.54	3.49	0.74	2.19	0.40	2.60	0.36
0116-3	鲕状铝土 矿矿石	46.17	124.42	9.93	38.89	7.35	1.43	8.82	1.51	9.31	1.85	5.00	0.73	4.87	0.67
0116-12	土状铝土 矿矿石	90.46	172.91	19.30	72.45	13.68	2.44	11.78	1.50	8.59	1.65	4.78	0.68	4.66	0.65
0119-1		56.02	83.45	12.43	46.85	8.31	1.46	9.11	1.55	9.56	2.02	5.87	0.86	5.51	0.79
0121-2		161.34	262.72	34.96	123.05	17.78	2.81	12.90	1.71	10.72	2.32	7.29	1.08	7.97	1.24
0116-4		91.02	149.21	20.01	71.37	11.45	1.98	9.85	1.42	8.65	1.65	5.06	0.73	4.78	0.73
0120-2		214.91	782.80	47.61	182.66	40.07	7.74	43.19	5.44	31.56	6.01	15.77	1.99	11.96	1.59
0116-5	碎屑型 铝土矿矿石	77.74	148.98	15.89	55.57	7.75	1.07	6.49	0.90	4.90	0.94	2.68	0.39	2.80	0.39
0116-14	高铁富铝 矿矿石	20.76	35.72	4.00	14.89	3.15	0.62	4.22	0.86	6.64	1.57	5.12	0.76	5.70	0.83
0116-7	绿泥石化 页岩	46.28	73.43	6.90	20.99	3.65	0.70	4.92	0.99	7.63	1.72	5.66	0.89	6.72	0.99
0116-2	高岭土粘 土岩(下部)	38.94	87.88	8.20	28.95	4.86	0.84	3.72	0.52	3.11	0.63	2.14	0.30	2.12	0.33
0119-2		52.30	75.58	8.64	28.84	4.99	1.06	6.38	1.18	7.81	1.69	5.51	0.81	5.60	0.79
0120-1		8.02	21.05	2.19	9.23	2.15	0.57	3.21	0.40	2.22	0.45	1.29	0.15	0.84	0.13
0116-1	紫红色铁质 粘土岩 (矿底板)	125.47	238.93	28.12	98.91	16.33	2.84	13.75	1.84	10.62	2.08	6.33	0.88	6.56	0.96
灰色含泥质白云岩 (下寒武统娄山关群) ^①		9.60	19.72	2.47	10.55	2.47	0.37	2.25	0.38	1.99	0.38	0.88	0.13	0.68	0.11
样品号	岩性	Σ REE	LREE	HREE	LR/HR	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce					
0116-9	风化残留 白云岩	341.80	276.58	65.22	4.24	3.38	2.97	9.16	0.63	0.58					
0116-13		75.22	64.80	10.42	6.22	3.17	1.81	7.20	0.57	0.96					
0116-8		174.03	109.88	64.14	1.71	0.76	2.11	1.37	0.66	0.95					
0116-11	高岭土粘	116.82	101.09	15.72	6.43	4.10	1.14	6.06	0.59	0.95					
0116-6	粘土岩(上部)	63.16	49.22	13.94	3.53	1.72	1.12	2.37	0.70	1.12					
0116-3	鲕状铝土 矿矿石	260.93	228.19	32.74	6.97	3.95	1.46	6.40	0.54	1.40					
0116-12	土状铝土 矿矿石	405.53	371.23	34.30	10.82	4.16	2.04	13.10	0.59	1.00					
0119-1		243.78	208.52	35.26	5.91	4.24	1.34	6.86	0.51	0.76					
0121-2		647.88	602.66	45.22	13.33	5.71	1.31	13.65	0.57	0.84					
0116-4		377.89	345.03	32.86	10.50	5.00	1.66	12.85	0.57	0.84					
0120-2		1393.29	1275.78	117.51	10.86	3.37	2.91	12.12	0.57	1.86					
0116-5	碎屑型 铝土矿矿石	326.50	307.00	19.50	15.74	6.31	1.87	18.69	0.46	1.02					
0116-14	高铁富铝 矿矿石	104.83	79.13	25.70	3.08	4.14	0.60	2.45	0.52	0.94					
0116-7	绿泥石化 页岩	181.46	151.95	29.51	5.15	7.98	0.59	4.64	0.51	0.99					
0116-2	高岭土粘 土岩(下部)	182.53	169.66	12.88	13.17	5.04	1.42	12.40	0.60	1.18					
0119-2		201.19	171.42	29.77	5.76	6.59	0.92	6.29	0.57	0.86					
0120-1		553.60	510.59	43.01	4.97	2.35	3.08	6.41	0.67	1.21					
0116-1	紫红色铁质 粘土岩 (矿底板)	553.60	510.59	43.01	11.87	4.83	1.69	12.91	0.58	0.97					
灰色含泥质白云岩 (下寒武统娄山关群) ^①		51.98	45.18	6.80	6.64	2.44	2.67	9.52	0.48	0.97					

注:①据陈代演等,1997;分析者:矿床地球化学国家重点实验室 ICP-MS 分析室冯家毅

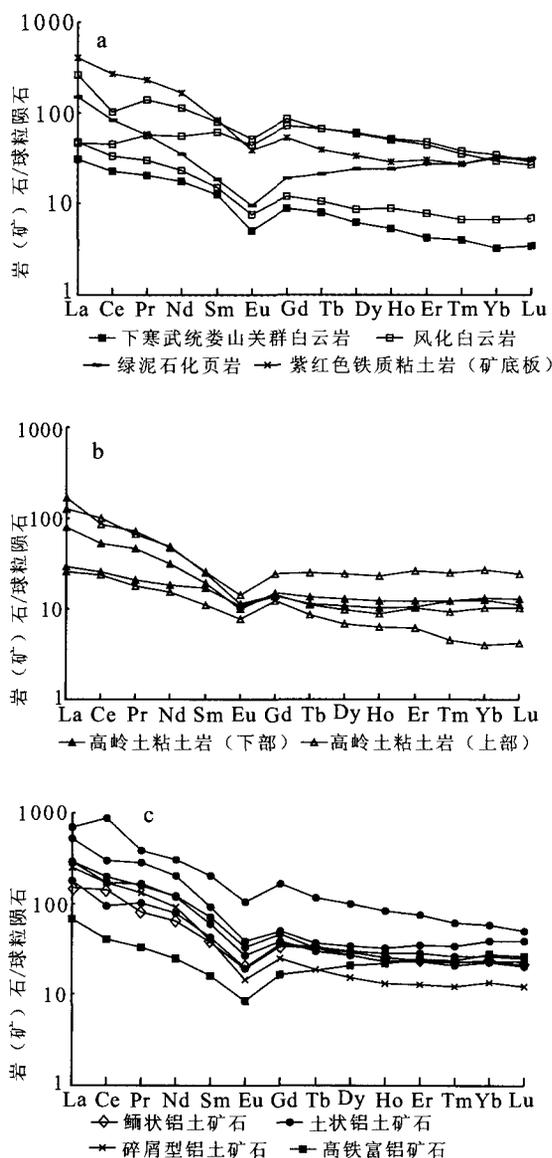


图2 小山坝矿床岩(矿)石稀土配分模式图

Fig. 2 REE distribution patterns of Xiaoshanba bauxite deposit

4.98, Eu 负异常明显(0.59~0.70, 平均 0.65), Ce 弱正异常或异常不明显(0.95~1.12, 平均 1.04)。矿层下部的高岭土粘土岩的稀土元素总量为(51.91~201.19) × 10⁻⁶, 平均 145.21 × 10⁻⁶, 轻稀土富集, 其(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 2.35~6.59(平均 4.66)、0.92~3.08(平均 1.81)和 6.29~12.40(平均 8.37), 配分模式为中等右倾平坦曲线(图 2), LREE/HREE 值为 4.97~13.17, 平均 7.97, Eu 负异常明显(0.57~0.67, 平均 0.61), Ce 正异常或异常不明显(0.86~1.21, 平均 1.08)。

(5) 铝土矿矿石: 各类矿石的稀土元素组成特征基本相似, 其中鲕状铝土矿矿石的稀土总量较高(260.93 × 10⁻⁶), 轻稀土富集(LREE/HREE = 6.97), (La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为

3.95、1.46 和 6.40, 稀土配分模式为中等右倾曲线(图 2), Eu 明显负异常(0.54), δCe 正异常明显(1.40); 碎屑型铝土矿矿石的稀土总量较高(307.00 × 10⁻⁶), 轻稀土富集(LREE/HREE = 15.74), (La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 6.31、1.87 和 18.69, 配分模式为中等右倾曲线(图 2), Eu 明显负异常(0.46), Ce 弱正异常(1.02); 高铁铝土矿矿石中 TFe(20.28%) 和 SiO₂(10.5%) 含量较高, Al₂O₃(51.13%) 含量相对较低, 其稀土总量相对最低(104.83 × 10⁻⁶), 轻稀土富集(LREE/HREE = 3.08), (La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 4.14、0.60 和 2.45, 配分模式为中等右倾曲线(图 2), Eu 明显负异常(0.52), Ce 异常不明显(0.94); 小山坝矿床主要矿石类型土状铝土矿矿石 Al₂O₃ 和 SiO₂ 分别为 70.04%~76.58% 和 4.09%~9.26%, 稀土元素总量为(243.78~1393.29) × 10⁻⁶, 平均 613.67 × 10⁻⁶, 轻稀土富集, (La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 和(La/Yb)_N 分别为 3.37~5.71(平均 4.50)、1.31~2.04(平均 1.85)和 6.86~13.65(平均 11.72), 配分模式为中等右倾平坦曲线(图 2), LREE/HREE 值为 5.91~13.33, 平均 10.28, Eu 负异常明显(0.51~0.59, 平均 0.56), Ce 弱负异常或异常不明显(0.76~1.86, 平均 1.06)。

3 讨论

3.1 稀土元素特征与岩石类型、矿物成分的关系

岩石类型的不同对稀土元素各种参数的影响非常明显^[13]。不同类型岩石的稀土含量和组成也不同, 如碳酸盐类矿物由于方解石和白云石对稀土的“稀释”作用, 稀土元素含量一般较低, 但当碳酸盐岩中的泥质增加时, 即 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量增加时, 碳酸盐中的稀土含量增高, 小山坝矿床中各类岩(矿)石中稀土元素总量分布基本都遵循这一规律。

小山坝铝土矿各类岩(矿)石中 REE 与 Al₂O₃ 和 TiO₂ 呈弱正相关, 相关系数分别为 0.52 和 0.55 (n=19), 而在铝土矿石和高岭土粘土岩中相关系数明显增加, 分别为 0.73 和 0.77 (n=11), 与 SiO₂ 呈负相关, 相关系数为 -0.66 (n=11)。表明铝土矿矿石中 REE 的富集与 Al 含量关系密切, 铝土矿富集稀土元素是由于在成矿过程源岩受到长期的风化淋滤作用, 钙质大量流失, 稀土元素则因较稳定而相对富集, 在风化成矿过程被铝矿物(一水铝石等)吸附所致。该矿床含矿岩系中稀土元素主要富集于铝土矿矿体及其附近, 稀土总量一般从铝土矿石→紫红色铁质粘土岩(铝土矿含矿岩系底板)→风化残留白

云岩→高岭土粘土岩→绿泥石化页岩逐渐降低。矿石中以土状铝土矿石的稀土总量最高,大致为土状铝土矿石>碎屑型铝土矿石>鲕状铝土矿石>高铁富铝矿石,LREE/HREE值也基本如此。值得注意的是含矿岩系底部的紫红色铁质粘土岩的稀土总量较高,仅次于土状铝土矿石的稀土总量。此外,铝土矿层上部的高岭土粘土岩的稀土总量和LREE/HREE值明显低于铝土矿层下部的高岭土粘土岩。

Al_2O_3 是铝土矿的主要成分,绝大部分赋存于硬水铝石中,其次在伊利石、高岭石和鲕绿泥石等粘土矿物中。由于粘土矿物对稀土元素的吸附作用^[14],粘土矿物含量较高者, ΣREE 也较高。矿石中同种粘土矿物由于样品纯度、结晶程度和颗粒大小不同,对稀土的吸附能力也不同,通常颗粒越小,比表面越大的粘土矿物,更利于吸附稀土阳离子。胶体成因的水铝石或风化土状的铝土矿,因比表面增大,对稀土的吸附力也增强。此外, Al_2O_3 含量越高 ΣREE 也越高。这与矿区铝土矿中由土状铝土矿石→碎屑型铝土矿石→鲕状铝土矿石→高铁富铝矿石, ΣREE 依次增高的现象相一致。

3.2 稀土元素参数与沉积环境、物化条件的关系

矿区大部分铝土矿石和高岭土粘土岩以Ce弱正异常为特征,这可能是在氧化环境的淋滤作用下 $Ce^{3+} \rightarrow Ce^{4+}$ 水解沉淀,其他REE被淋失而造成Ce正异常^[15]。研究表明^[14],在炎热潮湿、氧气充足、植物繁茂及有机质来源丰富的条件下,稀土元素可从某些矿物中解脱出来;如果这时处于酸性条件,则可能呈含水的有机酸盐类形式运移。地表酸性条件下,3价的稀土元素离子不易被粘土矿物吸附,而随径流向下迁移,但Ce的行为与其他稀土元素不同:在氧气充足的风化壳最上部, Ce^{3+} 易氧化成 Ce^{4+} ,在酸性条件下 Ce^{4+} 易水解,保存于原地,不随其他稀土元素向下运移,因而造成风化壳最上部稀土总量的降低和稀土配分的变化,即Ce含量相对增高。此外,矿区部分铝土矿矿石以弱负异常为特征,表明可能是继承了源区的特点。

小山坝铝土矿床属于碳酸盐岩古风化壳异地堆积亚型铝土矿床,由于下伏基岩是碳酸盐岩,因此风化作用形成了富铝钙红土残坡积层;一般侵蚀间断时间愈长,即风化作用时间愈长,残坡积富铝钙红土层就愈多、愈厚,生成的铝土矿物愈多,粘土矿物愈少,矿石品位愈富,矿层厚度也愈大。

3.3 REE配分模式与铝土矿成矿物质来源

综上所述,风化残留白云岩的稀土配分模式与下寒武统娄山关群含泥质白云岩的相似,除稀土总

量明显较高外,部分风化残留白云岩显示轻稀土相对亏损,这可能暗示娄山关群含泥质白云岩在风化过程中稀土元素逐渐富集而部分轻稀土流失被铝土矿吸附。铝土矿含矿岩系岩(矿)石中稀土元素特征均较相似,与下伏娄山关群灰色含泥质白云岩的稀土配分模式及其特征参数基本一致,仅表现为稀土元素总量和LREE/HREE值明显偏高,稀土元素配分模式均为轻稀土富集右倾斜型, Eu负异常明显(多为0.50~0.65), Ce异常不明显(多为1.00左右)。可见小山坝铝土矿成矿物质来源主要与下寒武统娄山关群的泥质白云岩有关,其中铝土矿中富集轻稀土为古风化壳矿床的主要特征。一般在钙红土化阶段,白云岩全部被分解, CaO、MgO等主要组分淋失殆尽,残留的 Al_2O_3 、 SiO_2 等逐渐构成以高岭石为主的粘土岩并进一步去Si形成水铝石。在形成以高岭石为主的粘土岩过程中,由于高岭石对REE的吸附作用使其不断富集,并达到比含泥质白云岩高出几个数量级。此外, REE^{3+} 的吸附能与离子半径大小有关,其吸附能随离子半径减少而按下列顺序递增: $La \rightarrow Ce \dots Yb \rightarrow Lu$ ^[16],故铝土矿石及其高岭土粘土岩相对富集LREE。

3.4 稀土元素综合利用价值

一般而言,铝土矿中稀土元素呈类置同象状态分布于一水铝石、高岭石等铝硅矿物中,在目前技术条件下,还不能用选矿方法富集,只能在氧化铝生产中综合回收利用。因此,储量概算宜选用综合利用的工业指标。全国储委制定的工业指标手册^[17]中只有稀有和稀土元素的综合利用边界品位指标。目前采用的指标为:风化壳型稀土矿床边界品位为 $REO \geq 0.08\%$,工业品位为 $REO \geq 0.1\%$ 。上述分析结果表明,修文小山坝含矿岩系中稀土元素含量大多接近或超过这一标准,且在氧化铝生产过程中,稀土元素富集于母液和尾矿赤泥中,有综合利用的潜在经济价值^[18],贵州铝土矿生产过程中赤泥的稀土元素总量明显高于铝土矿矿石^[19]。因此,加强铝土矿综合利用稀有稀土元素的研究,不仅可以推动氧化铝工业高新技术的发展,而且为中、低品位铝土矿广泛应用于氧化铝生产创造了条件,对赤泥的综合利用也将会有较好的环境效益。

4 总 结

综上所述,贵州修文小山坝铝土矿矿床中矿石的稀土配分模式为轻稀土富集右倾斜型,具明显的Eu负异常,成矿物质来源以下寒武统娄山关群含泥质白云岩为主,在相对氧化环境下经风化作用成矿,

其中稀土元素主要富集于矿体及其周围,与 Al_2O_3 含量呈密切的正相关关系,铝土矿矿石中稀土元素含量大多达到或超过综合利用标准;氧化铝生产过程产生的母液和尾矿赤泥中稀土元素高度富集,有巨大的潜在经济价值。

参考文献 (References):

- [1] 董家龙. 贵州铝土矿基本地质特征及勘查开发的思考——以凯里-黄平铝土矿为例[J]. 矿产与地质, 2004, 18(6): 555—558.
Dong Jialong. Geological feature of bauxite in Guizhou Province and thoughts of exploration & development [J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18(6): 555—558. (in Chinese with English abstract)
- [2] 廖莉萍, 练兵. 贵州铝土矿资源特征及矿业可持续发展建议[J]. 贵州地质, 2004, 21(1): 67—70.
Liao Liping, Lian Bing. Characteristic of bauxite resource in Guizhou province and Proposals for mining sustainable development [J]. Guizhou Geology, 2004, 21(1): 67—70. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘平. 初论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, 1987, (1): 2—11.
Liu Ping. Primary discussion on bauxite in Guizhou [J]. Guizhou Geology, 1987, (1): 2—11. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈有能, 汪生杰, 杨文会. 贵州北部含铝岩系地质时代及沉积相特征[J]. 贵州地质, 1987, (3): 323—337.
Chen Youneng, Wang Shengjie, Yang Wenhui. The Geological age of Al-bearing rock system and its features of sedimentary facies in northern Guizhou [J]. Guizhou Geology, 1987, (3): 323—337. (in Chinese with English abstract)
- [5] 廖士范. 铝土矿矿床成因与类型(及亚类)划分的新意见[J]. 贵州地质, 1998, 15(2): 139—144.
Liao Shifan. A new review in genesis and classification of bauxites [J]. Guizhou Geology, 1998, 15(2): 139—144. (in Chinese with English abstract)
- [6] 廖士范. 我国古生代铝土矿矿石结构构造成因命名及矿床命名问题[J]. 贵州地质, 1991, 8(2): 109—117.
Liao Shifan. A discussion on origin of Palaeozoic bauxite ore textures and structure and bauxite deposit names in China [J]. Guizhou Geology, 1991, 8(2): 109—117. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘文凯. 遵义后槽铝土矿床矿体的环状分带及其形成机理[J]. 贵州地质, 1991, 8(2): 203—215.
Liu Wenkai. The ring-zoning and forming mechanism of Houcao bauxite deposit body in Zunyi City [J]. Guizhou Geology, 1991, 8(2): 203—215. (in Chinese with English abstract)
- [8] 时中越, 王庆生. 遵义苟江铝土矿区水井坎矿段铝土矿成矿化学组分演化序列及成矿阶段的划分[J]. 贵州地质, 1992, 9(1): 1—8.
Shi Zhongyue, Wang Qingsheng. The chemical component evolutionary sequence of bauxite mineralization and the division of mineralization stages of Shuijingkan mining section of Goujiang bauxite area in Zunyi, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 1992, 9(1): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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'nan Bauxite in Guizhou and its genesis [J]. Guizhou Geology, 2001, 18(4): 238—243. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈代演, 王华. 贵州若干铝土矿床的稀土元素地球化学研究[J]. 贵州地质, 1997, 14(2): 132—144.
Chen Daiyan, Wang Hua. A study on REE geochemistry of some bauxite deposits in Guizhou [J]. Guizhou Geology, 1997, 14(2): 132—144. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘平. 四论贵州之铝土矿——黔中—川南成矿带铝土矿的稀散、稀土组分特征[J]. 贵州地质, 1994, 11(3): 179—187.
Liu Ping. On the bauxite in Guizhou Province—IV patterns of rare elements and rare earth elements in bauxite in mineralization belts from the central Guizhou to the southern Sichuan [J]. Guizhou Geology, 1994, 11(3): 179—187. (in Chinese with English abstract)
- [12] Yoshida S, Muramatsu Y, Taga M U. Determination of major and trace elements in Japanese rock reference samples by ICP-MS [J]. Int. J. Environ. Anal. Chem., 1996, 63: 195.
- [13] 周国华, 马生明, 喻劲松, 朱立新, 王徽. 土壤剖面元素分布及其地质、环境意义[J]. 地质与勘探, 2002, (6): 70—75.
Zhou Guohua, Ma Shengming, Yu Jinsong, Zhu Lixin, Wang Hui. Vertical distribution of elements in soil profiles and their significance for geological and environmental [J]. Geol. Pros., 2002, (6): 70—75. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
Liu Yingjun, Cao Limin. Geochemistry of elements [M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [15] Elderfield H, Greaves M J. The rare elements in seawater [J]. Nature, 1982, 296: 214—219.
- [16] 陈潜德. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
Chen Qiande. Practical rare earth elements geochemistry [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [17] 《矿产资源综合利用手册》编委会. 矿产资源综合利用手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 445.
Editorial Committee of Handbook about Byproduction Utilization of Underground Resources. Handbook about byproduction utilization of underground resources [M]. Beijing: Science Press, 2000: 445. (in Chinese)
- [18] 赵运发, 元小卫, 王智勇, 柴东浩. 山西铝土矿稀有稀土元素综合利用评价[J]. 世界有色金属, 2004, (6): 35—37.
Zhao Yunfa, Yuan Xiaowei, Wang Zhiyong, Chai Donghao. Appraisal of byproduction utilization about rare elements in Shanxi bauxite ore [J]. World Nonferrous Metals, 2004, (6): 35—37. (in Chinese)
- [19] 肖金凯, 雷剑泉. 贵州铝厂赤泥中钆和稀土[J]. 科学通报, 1994, 39(13): 1248.
Xiao Jinkai, Lei Jianquan. Sc and REE in red mud of Guizhou aluminium factory [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(13): 1248. (in Chinese)