

## 四川德昌大陆槽稀土矿选矿工艺的思考

徐建新

(中稀(凉山)稀土有限公司, 四川 西昌 61500)

**摘要:** 这是一篇矿物加工工程领域的论文。四川冕宁—德昌稀土成矿带是我国重要的与晚渐新世—中新世碳酸岩相关的硬岩型稀土成矿带。该成矿带内分布着与霓石石英正长岩—碳酸岩杂岩体密切相关的牦牛坪超大型、大陆槽大型、木洛和里庄中型轻稀土矿床; 该成矿带查明的稀土资源储量 (REO) 达数百万吨, 占全国查明资源量的 8.73%, 是我国重要硬岩型稀土资源基地。大陆槽稀土资源优于牦牛坪之处是矿体厚大, 便于开采, 矿石平均 REO 品位比牦牛坪高出 1%~2%, 矿石中以氟碳铈铀矿物相赋存的稀土分配率高, 氟碳铈铀中  $\text{ThO}_2$  量微 (牦牛坪 0.18%~0.43%), 对深加工和环保十分有利。本文基于稀土选矿生产实践, 总结不同时期的生产工艺流程对稀土资源的回收利用情况, 对大陆槽稀土选矿工艺提出了新的思考和见解, 为合理利用稀土资源提供参考依据。

**关键词:** 矿物加工工程; 大陆槽矿区; 稀土; 磁选-重选-浮选联合流程

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.012

中图分类号: TD97 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0076-09

**引用格式:** 徐建新. 四川德昌大陆槽稀土矿选矿工艺的思考[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 76-84+94.

XU Jianxin. Sichuan dechang continental trough rare earth ore beneficiation process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 76-84+94.

四川冕宁—德昌稀土成矿带是我国重要的与晚渐新世—中新世碳酸岩相关的硬岩型稀土成矿带。该成矿带内分布着与霓石石英正长岩—碳酸岩杂岩体密切相关的牦牛坪超大型、大陆槽大型、木洛和里庄中型轻稀土矿床<sup>[1]</sup>, 该成矿带查明的稀土资源储量 (REO) 达数百万 t, 占全国查明资源量的 8.73%, 是我国重要硬岩型稀土资源基地<sup>[2]</sup>。德昌稀土大陆槽矿区位于县城西南 32 公里的大陆槽乡原乡政府所在地, 公路、铁路交通运输条件较好、通信方便。该矿于 1974 年 7 月经四川省地勘局 109 地质队发现和初探, 在两平方公里内进行了槽探、坑探、钻探工作。经检测, 实验 REO D 级储量 28 万 t, 推测远景储量为 78 万 t, 属大型稀土矿山。通过实验室分析, 大陆稀土矿属氟碳铈铀稀土矿, 与冕宁、包头稀土矿同为轻稀土, 综合 REO 品位 5%~7%, 单样 REO 品位最高达 17.68%。含镧、铈、镨、钕等 16 种元素<sup>[1-3]</sup>。

中稀(凉山)稀土有限公司作为西南地区最大的采、选、冶国有企业, 德昌稀土是其重要的后备稀土矿产资源总结好、利用好德昌优质稀土资源, 对中稀公司可持续发展具有重要意义。

## 1 矿石性质

大陆槽稀土矿床位于南北向雅砻江断裂带的北段, 是一个与喜马拉雅期霓辉正长(斑)岩侵入体(即矿源体)有关的稀土矿床新类型。矿床围岩主要为晋宁期石英闪长岩, 其基本矿床地质特征与牦牛坪大型稀土矿床可以对比, 但又具有独自的特点。现已初步圈定 I、II、III 和 IV 四个矿体, 其中 I、III 为主矿体。构造控矿显著, 主矿体走向 NW-SE, 倾向 NE, 倾角 60°以上, 矿体长几百米, 宽几十米到上百米。构成矿体的主要矿脉和矿石类型有: 含霓辉萤石锶重晶石型大矿

收稿日期: 2023-08-09

作者简介: 徐建新 (1971-), 男, 工程师, 主要从事稀土生产工艺流程技术服务和生产现场管理等工作。

脉（矿石）、萤石钡天青石型大矿脉（矿石）和碳酸岩型矿脉（矿石）以及由上述矿石组成的细网脉—石英闪长岩型或霓辉正长岩型矿脉带（矿石）<sup>[1]</sup>。矿石中不仅含有丰富的稀土，还含有可供综合利用的伴生组分 Pb、Sr、Ba、CaF<sub>2</sub> 等，特别是铈的含量很高，达 25.73%~27.68%，已超过独立铈矿床工业品位 SrSO<sub>4</sub>≥25% 的指标要求。工业稀土矿物为单一氟碳铈矿，其他矿物主要有铈重晶石、钡天青石、萤石、霓辉石、方解石、毒重石等。矿石呈斑杂状、浸染状、角砾状、似条带状、多孔状构造，自形晶半自形—他形晶，碎裂结构。风化带矿石泥化较严重。稀土配分属 Ce>La>Nd 富 LREE 的强选择配分型，为典型的轻稀土原生矿床<sup>[4]</sup>，矿石、矿泥和氟碳铈矿的稀土配分见表 1，矿石化学分析结果、氟碳铈矿的工艺粒度测定结果、矿石中矿物组成及相对含量分别

见表 2~4<sup>[5]</sup>。

表 1 矿石、矿泥和氟碳铈矿的稀土配分 (ZREO=100%)

名称	LREO	MREO	HREO	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
矿石	97.62	1.83	0.55	44.20	0.19	0.48
矿泥	96.83	2.29	0.88	45.40	0.26	0.76
氟碳铈矿	98.83	1.08	0.09	47.43	0.094	0.064

表 2 矿石化学成分分析结果/%

TREO	La	Ce	Nd	Th	SrO	SiO <sub>2</sub>	S	CaO
2.81	0.81	1.13	0.27	0.024	10.86	18.08	1.95	29.31
MgO	TFe	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	BaO	F	
0.30	3.22	0.20	13.04	2.63	0.12	7.24	7.13	

表 3 氟碳铈矿的工艺粒度测定结果

Table 3 Process particle size determination results of cerium lanthanum fluorocarbon ores

粒径/mm	>0.5	0.5~0.2	0.2~0.15	0.15~0.074	0.074~0.04	0.04~0.02	0.02~0.01	<0.01
含量/%	27.17	27.02	9.25	8.37	14.10	10.42	3.38	0.29
累计/%	27.17	54.19	63.44	71.81	85.91	96.33	99.71	100.00

表 4 矿石中矿物组成及相对含量

Table 4 Mineral composition and relative content of ores

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
氟碳铈矿	3.82	方解石	10.75
独居石	0.03	钾长石	19.10
钽石	0.01	白云母	1.80
碳酸铈矿	7.60	黑云母	1.32
天青石	1.50	石英	7.45
重晶石	2.21	褐铁矿	2.85
铈钡硫酸盐矿物	17.10	其他矿物	6.77
萤石	17.69	总计	100.00

## 2 研究成果回顾

德昌大陆槽稀土矿石结构构造复杂，且氟碳铈矿嵌布粒度极不均匀，大部分粒度细小，不易单体解离；同时，由于氟碳铈矿与主要脉石矿物的比重和可浮性相近，加之矿石风化严重，泥化率高，给稀土及其伴生元素的综合回收带来不利影响。为寻求合理的选矿生产工艺流程，各大高校、研究院所针对该矿的矿石性质，先后开展了不同的选矿工艺流程实验研究，为最大限度的

提高选矿金属回收率，进一步对稀土及其伴生有用矿物的回收，提高选矿经济效益提供参考依据。

昆明理工大学资源开发工程系张宗华<sup>[6]</sup>等进行了单一重选、单一磁选、重—磁联合、磁—重联合流程的实验研究。实验结果表明磁—重联合流程优于其他工艺流程，可以得到品位 REO 51.08% 的优质稀土精矿，回收率 78.11%。本次实验研究的原料化学成分分析结果见表 5，工艺流程分别见图 1，对比实验结果见表 6。

表 5 昆明理工大学实验所用试料化学成分分析结果

Table 5 Results of chemical composition analysis of test materials used in Kunming University of Science and Technology tests

REO	La	Ce	Nd	Th	SrO	SiO <sub>2</sub>	S	Ca
5.01	1.48	1.83	0.73	0.058	7.55	26.68	4.25	10.80
Mg	Fe	Ti	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	BaO	F	
1.45	2.59	0.22	7.38	2.84	0.80	2.60	6.91	

赣州有色冶金研究院采用磁选—重选流程进行了工业试验，取得的工业实验指标<sup>[7]</sup>见表 7。

2011 年，中国地质科学院矿产综合利用研究

表 6 昆明理工大学实验对比结果  
Table 6 Comparison results of Kunming University of Science and Technology tests

工艺流程	产物名称	产率/%	品位/%	回收率/%
重选流程	精矿	6.15	50.39	60.96
	中矿	64.11	2.59	32.66
	尾矿	29.74	1.09	6.38
重—磁流程	给矿	100.00	5.08	100.00
	精矿	7.50	50.35	74.04
	中矿	14.31	4.88	13.69
磁—重流程	尾矿	78.19	0.80	12.27
	给矿	100.00	5.10	100.00
	精矿	7.13	50.51	71.12
磁选流程	中矿	4.85	6.38	6.11
	尾矿	88.02	1.31	22.77
	给矿	100.00	5.06	100.00
磁—重流程	精矿	7.77	51.08	78.11
	中矿	32.41	2.01	12.82
	尾矿	59.82	0.77	9.07
	给矿	100.00	5.08	100.00

所通过调研分析认为，稀土矿入选品位 REO 含量在 4.5% 左右时，采用重—磁联合流程，稀土回收率仅仅为 35% 左右；回收率之所以不高，是因为采用的重—磁工艺对粒度较粗的稀土矿物回收效果较好，而大部分细粒稀土矿物则损失在重选中矿和尾矿中。实验采用浮—磁流程，所用原矿 REO 品位在 2.6% 左右，取得了较好的实验结果<sup>[8]</sup>。实验流程见图 2，实验结果见表 8。

2018 年，根据生产中硫化物较多影响选别的情况，国土资源部成都矿产资源监督检测中心进行了流程优化实验。实验流程见图 3，实验结果<sup>[9]</sup>见表 9。采用该工艺流程，获得产率 2.60%、硫含

量 43.63%、硫（硫化物硫）脱除率 84.03% 的硫精矿和产率为 3.52%（对原矿）、TREO 品位 61.48%，TREO 回收率 63.10% 的稀土精矿。

### 3 德昌稀土选厂生产现状<sup>[10]</sup>

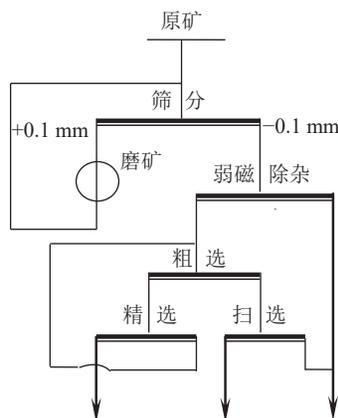
德昌大陆槽稀土矿采选厂主要有德昌厚地稀土矿业有限公司及四川和地矿业发展有限公司。目前德昌厚地稀土矿业有限公司处于停产状态，四川和地矿业发展有限公司仍在生产。上述两家公司选厂的稀土选矿流程基本相同，见图 4。

2023 年间，中稀（凉山）稀土有限公司曾派驻技术人员调研德昌稀土生产厂家的实际生产指标情况，见表 10。

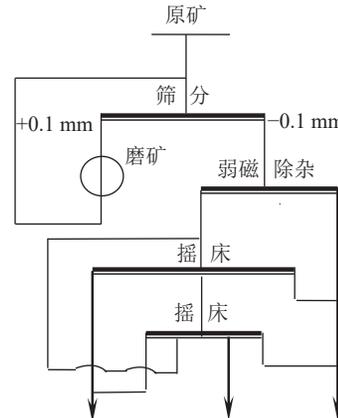
从表 10 可以看出，现有生产流程在平均给矿 REO 品位 1.82% 情况下，所得稀土精矿平均 REO 品位 54.65%，精矿产率 1.05%，精矿 REO 回收率 31.50%，总尾 REO 品位 1.26%。

可以说，目前德昌现有稀土选厂生产指标较差，精矿品位在 45%~61% 之间，波动较大，平均 REO 品位在 55% 左右，精矿 REO 品位较低；稀土精矿回收率低，全流程回收率只有 30% 左右，极大地影响选厂的经济效益，同时造成稀土资源的较大浪费。

强磁作为德昌稀土回收打头的粗选设备，富集效果差，给矿 REO 品位 1.82%，强磁精矿 REO 品位 2.67%，强磁粗选精矿 REO 品位提升不到 1 个百分点，而其作业回收率只有 68% 左右，有 30% 以上的稀土矿物在强磁粗选阶段进入尾矿直接损失掉了；强磁粗精矿浮选时，浮选作业回收率在 65% 左右，又有约 35% 的稀土矿物通过浮



(a) 磁选工艺流程



(b) 重选工艺流程

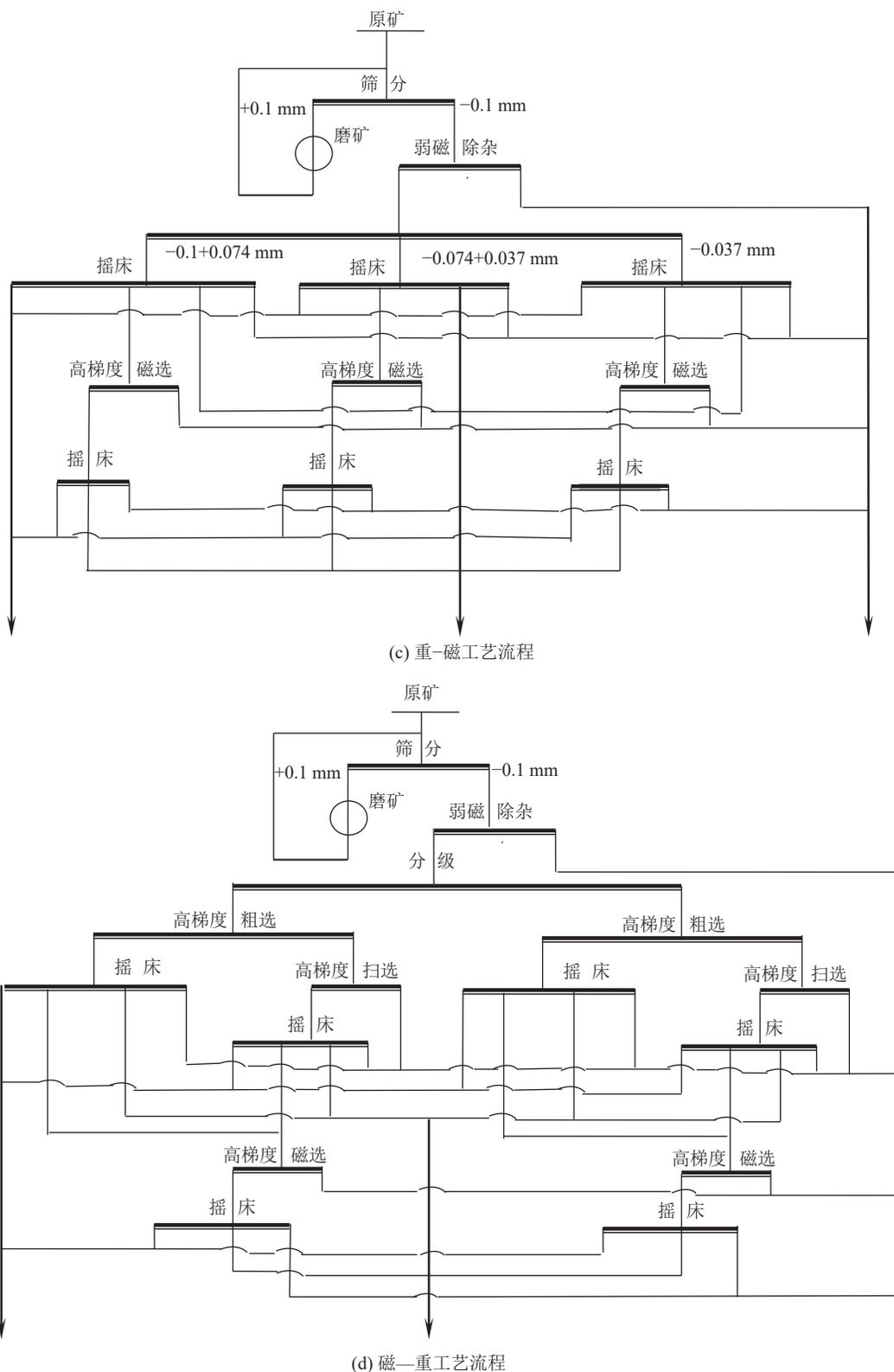


图1 昆明理工大学实验工艺流程

Fig.1 Kunming University of Science and Technology test process

选作业流失进入尾矿（对浮选给矿），这也说明稀土浮选采用的药剂制度仍需改进优化。两个主要稀土选别回收作业回收率均较低，结果导致选

厂全流程稀土回收率只有30%左右。

综上所述，目前德昌稀土选厂普遍采用的磁—浮—磁联合流程，稀土回收率低，稀土精矿

表 7 磁—重流程连续工业实验指标  
Table 7 Indicators of continuous industrial tests of magnetic - heavy separation process

原矿	REO品位/%			精矿产率/%	回收率/%
	给矿	精矿	尾矿		
>7.00	7.35	55.67	4.09	5.94	45.04
6.00~7.00	6.42	52.59	3.66	5.64	46.19
4.00~6.00	5.13	50.39	3.04	4.40	43.26
4.00~7.00	6.44	53.07	3.73	5.49	45.22

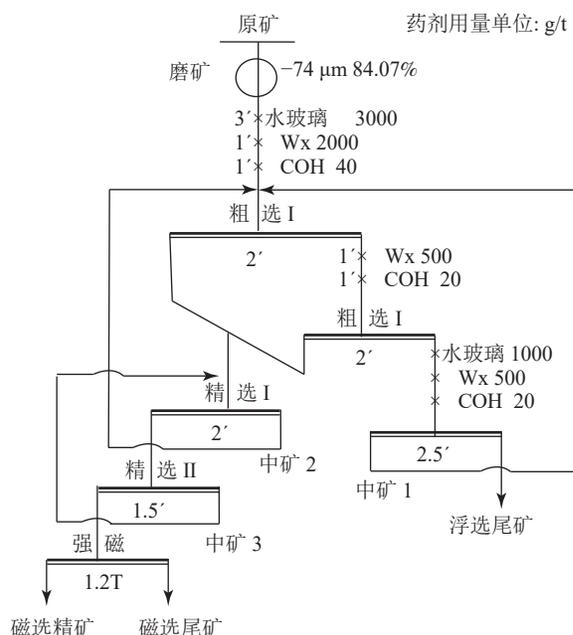


图 2 浮—磁流程及药剂制度

Fig.2 Float-magnetization process and armaceutical system

表 8 浮—磁联合流程实验结果

Table 8 Test results of combined float-magnetic process

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		REO	Sr	REO	Sr
磁选精矿	2.78	60.41	4.67	66.18	1.36
磁选尾矿	1.54	9.14	32.03	5.55	5.14
浮选尾矿	95.68	0.75	9.37	28.27	93.50
原矿	100.00	2.54	9.59	100.00	100.00

品位较低，需进一步优化。

#### 4 德昌稀土选矿研究新进展<sup>[11]</sup>

中稀（凉山）稀土有限公司牦牛坪选矿厂技术组及邛崃公司对德昌稀土选矿进行了实验研究，取得了较好的实验结果。实验矿样取自德昌厚地稀土矿业有限公司选矿厂矿石堆场，试样破碎至-1 mm、磨矿后-0.074 mm 60%左右。实验原则流程见图 5，开路实验数质量流程见图 6。

实验所用矿样 REO 品位为 1.09%，属低品位矿石矿样。以水玻璃为 pH 值调整剂，混浮 FCF 为捕收剂，在碱性条件下一粗三精选别，所得混浮粗精矿 REO 品位为 5.64%，开路作业回收率 83.88%，混浮尾矿 REO 品位为 0.21%；富集比为 5.17。若此时将混浮粗精矿直接强磁选，不能得到 REO 品位 60% 以上的稀土精矿，需进一步在酸性条件下浮选去杂。以 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 为 pH 值调整剂，药剂 BC-2 为捕收剂，在酸性条件下一粗两精选别，所得稀土粗精矿 REO 品位提升到 14% 左右；该段酸性浮选作业回收率为 88.61%（对浮给为 74.33%）。将两段浮选所得稀土粗精矿强磁选，经一粗一精选别，可以得到 REO 品位 60% 以上的稀土精矿，强磁作业回收率 84.93%（对浮给为 63.13%）。

实验结果达到了“双 60”指标，即：稀土精矿 REO 品位 60% 以上，稀土回收率 60% 以上。

实验组通过大量的探索性实验，对于德昌稀土选矿有了新的认识：

(1) 强磁选对德昌稀土原矿分选效果差，并且磨矿粒度变细时分选效果越差；富集比低，经一段强磁选别，强磁精矿 REO 品位提升不到 1%；强磁回收率低，就此次实验矿样而言，一段强磁作业回收率低于 50%。因此认为，强磁选不能作为德昌稀土选矿时打头的预富集抛尾作业。表 11 为德昌稀土原矿强磁选实验结果。

(2) 试样中含有部分硫化物，在中性或弱酸性条件下，添加黄药、2#油浮选可得产率 3% 左右的硫化物粗精矿；矿浆呈碱性浮选时，硫化物绝大部分被抑制进入浮尾，进入混浮精矿中的硫化物很少。受牦牛坪选厂化验条件限制，未做硫元素化验，只化验了硫化物粗精矿的 REO 品位，为 1.45%，说明硫化物浮选时，稀土在硫化物粗精矿中得到一定程度富集，浮硫作业会造成部分稀土损失。实验组探索实验表明，是否预先浮硫，对最终稀土精矿 REO 品位影响较小。因此，若只对回收稀土矿物而言，没必要在德昌稀土选矿时加入浮硫作业。

(3) 碱性混浮所得的稀土粗精矿，REO 品位 5%~6%；该粗精矿直接强磁选，一粗一精、一粗两精、甚至一粗三精均不能得到 REO 品位 60% 以上的强磁稀土精矿；化验碱性混浮精矿

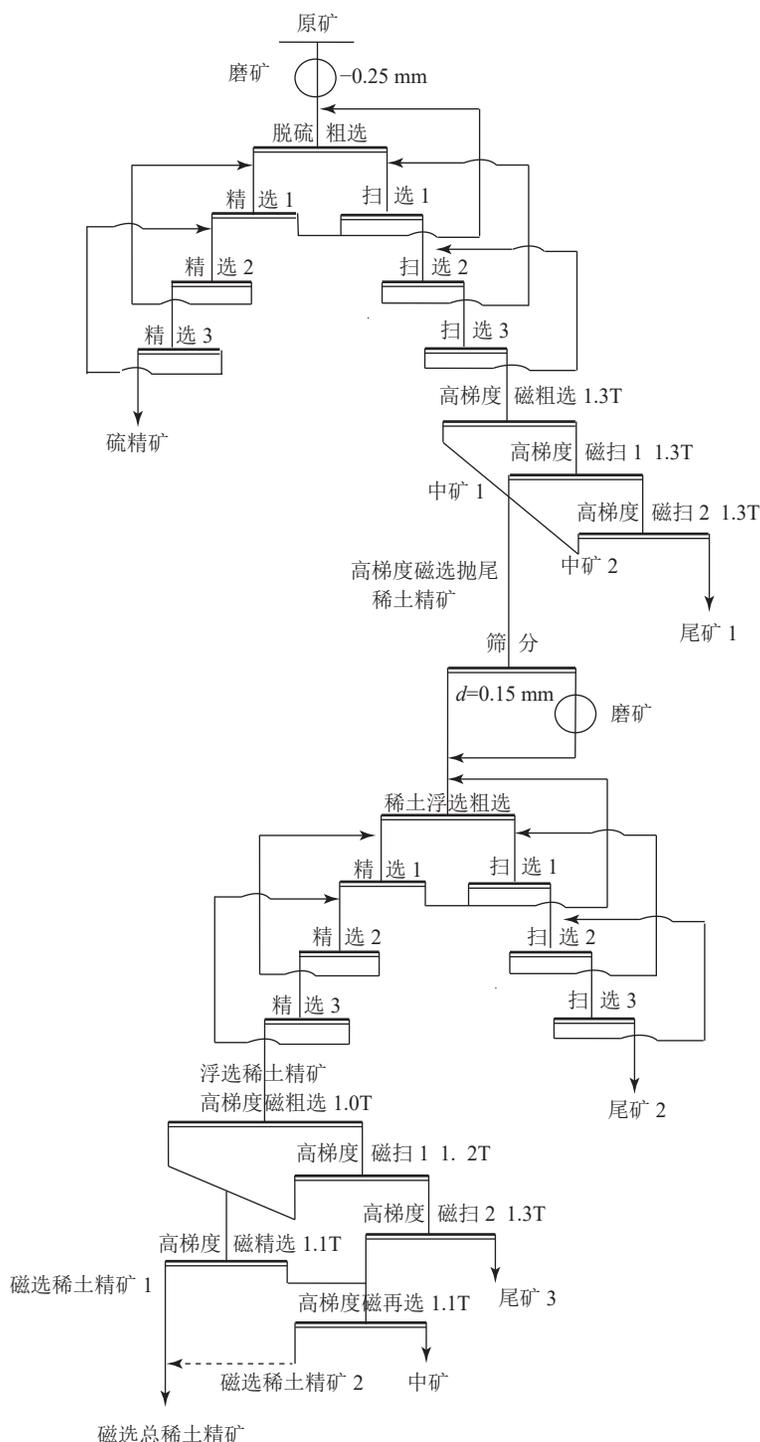


图 3 优化后的选矿工艺流程

Fig.3 Optimized beneficiation process flow

TFe 含量为 0.89%，基本可以排除含铁质矿物影响所致。因此，需作进一步除杂处理。

(4) 以  $H_2SO_4$  为 pH 值调整剂，药剂 BC-2 为捕收剂，在酸性条件下一粗两精选别，所得稀土粗精矿 REO 品位提升到 14% 左右；经酸性条件下选别所得的浮选精矿，再强磁选，一粗一精即

可得到 REO 品位 60% 以上的强磁稀土精矿；此时强磁分选效果好，作业回收率高达 85% 左右。探索实验还发现，只要经过酸性选别去杂的浮选粗精矿，即使 REO 品位降低到 8% 左右，强磁分选效果依然很好，一粗一精可得到 REO 品位 60% 以上的强磁稀土精矿，强磁作业回收率 80% 以上。

表 9 流程优化实验结果  
Table 9 Process optimization test results

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TREO	S	TREO	S
硫精矿	2.60	0.99	43.63	0.75	84.03
稀土精矿	3.52	61.48	0.12	63.10	0.31
稀土中矿（返回浮选或单独处理）	1.50	24.15	/	10.58	/
尾矿1（抛尾尾矿）	54.46	0.90	/	14.29	/
尾矿2（稀土浮选尾矿）	33.81	0.58	/	5.72	/
尾矿3（浮选精矿的磁选尾矿）	4.11	4.64（实测3.87）	/	5.56	/
总尾矿（尾矿1+尾矿2+尾矿3）	92.38	0.95	/	25.57	/
原矿	100.00	3.43	1.35	100.00	100.00

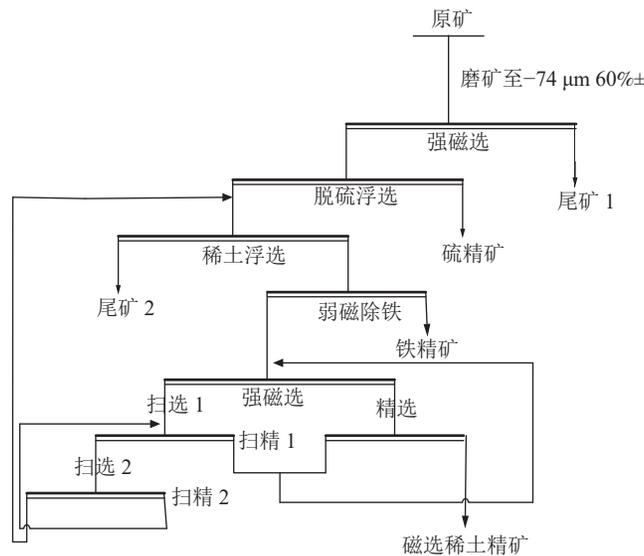


图 4 德昌大陆槽稀土选厂选矿工艺流程

Fig.4 Dechang continental tank rare earth beneficiation plant beneficiation process flow

表 10 调研期间德昌厚地选厂生产指标

Table 10 Production indicators of Dechang Houidi plant during the research period

一段筛下品位（给矿）/%	大强磁尾 品位/%	稀土浮选			小强磁		总尾/%
		原矿/%	精矿/%	尾矿/%	精矿/%	尾矿/%	
1.75	1.12	2.70	11.11	1.36	57.70	9.18	1.44
1.94	0.94	2.73	29.57	0.92	46.26	20.54	1.26
2.01	1.02	3.14	21.80	1.13	45.12	11.21	1.02
1.56	0.82	2.92	25.81	0.98	53.58	8.63	1.28
1.77	1.20	2.59	24.44	0.73	54.70	13.42	1.31
1.87	0.89	2.37	29.05	0.81	61.47	14.48	1.21
1.75	1.30	2.51	24.36	0.81	58.02	13.22	1.24
1.87	1.33	2.36	27.88	0.89	60.31	9.98	1.30
平均	1.82	1.08	2.67	24.25	54.65	12.58	1.26

因此，酸性浮选去杂作业较为重要。

(5) 强磁选是德昌稀土选矿最终得到合格稀土精矿的重要选别作业。强磁机作为预富集抛尾设备处理德昌原矿时，分选效果差，回收率低；当通过碱性浮选—酸性浮选为其提供适合物料

时，强磁分选效率大幅度提升，效果很好。

(6) 碱性浮选—酸性浮选—强磁选流程作为德昌稀土选矿回收的新探索流程，具有选别指标较稳定的特点：碱性浮选—酸性浮选均采用脂肪酸类捕收剂，捕收力强，回收率高，适合作为预

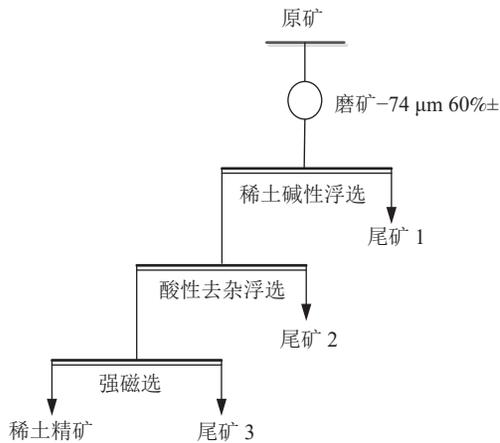


图5 中稀公司—邛崃公司实验原则工艺流程  
Fig.5 Sinochem-Qionglai Company test principle process flow

富集抛尾去杂的打头作业段，为后续强磁选提供

适宜物料；该物料强磁选别的精矿指标稳定，回收率高，并最终达到全流程“双60”的选矿指标。

### 5 关于德昌稀土选矿的思考

(1) 冕宁—德昌稀土虽属同一成矿带，矿石性质存在较大差异。前期关于德昌大陆槽稀土选矿的研究成果较少，有些选矿工艺在生产实践中被淘汰，如摇床重选工艺；目前被生产厂家普遍采用的为磁—浮—磁选矿工艺流程，该选矿工艺流程对德昌稀土矿石适应性较差，所得稀土精矿REO品位波动较大，平均REO品位低于60%，全流程稀土回收率30%~35%，极大地影响选厂的经济效益，同时造成稀土资源的较大浪费。

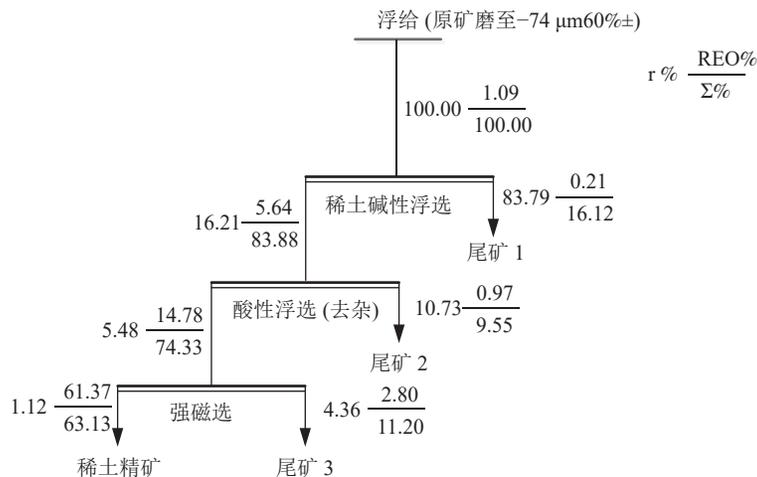


图6 中稀公司—邛崃公司实验结果（开路）  
Fig.6 Test results (open circuit) of Sinochem-Qionglai Company Technology

(2) 中稀（凉山）稀土有限公司牦牛坪选厂：磁—重（摇床）—浮（重晶石）—浮（稀土萤石）—磁（稀土）选矿工艺流程对德昌稀土选矿虽有参考借鉴意义，由于二者矿石性质不同，不能复制粘贴使用。牦牛坪选厂选矿工艺流程

表11 德昌稀土原矿强磁选预富集实验结果/%  
Table 11 Test results of Dechang rare earth raw ore strong magnetic separation pre-enrichment

74μm 含量 /%±	给矿品位 REO/%	精矿品位 REO/%	尾矿品位 REO/%	精矿产率 /%	REO回收 率/%
50	1.10	1.65	0.83	32.51	48.76
60	1.08	1.87	0.79	26.68	46.19
70	1.13	1.69	0.91	28.46	42.56
80	1.10	1.28	1.02	30.80	35.84

也是在生产实践中在原设计流程基础上逐渐优化演变而来的，如取消了单一稀土浮选作业，末段增加了强磁选回收稀土作业等。因此，借鉴科研单位的研究成果时，需与已有生产实践经验和自身科研实验结果相结合，尽量避免工艺流程和设备已经建设完成后又进行较大的技术改造。

(3) 中稀（凉山）稀土有限公司牦牛坪选厂技术组及邛崃公司对德昌稀土选矿工艺流程有创新性，采用碱性浮选—酸性浮选—强磁选的工艺流程，取得了较好的试验指标。为了该工艺流程的推广应用实践，有待于采取多种形式的验证试验，做出对该工艺路线的准确评价，为中稀公司将来开采利用德昌稀土资源储备技术成果。

## 6 结 论

德昌大陆槽稀土矿氟碳铈矿结晶粒度极不均匀, 嵌布复杂, 较难选别。针对该矿前期研究成果较少, 随着生产现场矿石性质的变化, 大部分工艺被生产实践所淘汰。目前生产厂家普遍采用的磁选—浮选—磁选工艺流程, 稀土回收率较低, 精矿 REO 品位较低。中稀(凉山)稀土有限公司牦牛坪选厂提出的碱性浮选—酸性浮选—强磁选流程为德昌大陆槽稀土矿物的有效回收提供了新思路。

### 参考文献:

- [1] 郭金承, 聂飞, 吴松洋, 等. 川西德昌馒头山离子吸附型重稀土矿床的发现及其地质意义[J]. 沉积与特与提斯地质, 2024, 44(1):86-99.
- GUO J C, NIE F, WU S Y, et al. The discovery and geological significance of the Mantoushan ion-adsorption type heavy rare earth deposit in Dechang, western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2024, 44(1):86-99.
- [2] 郭东旭, 刘琰, 陈超, 等. 川西冕宁-德昌稀土矿带正长岩-碳酸岩杂岩体中锆石矿物学特征与矿化过程[J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(3):343-359.
- GUO D X, LIU Y, CHEN C, et al. Mineral characteristics of zircons in the syenite-carbonatite complex in the Mianning-Dechang REE ore belt, Sichuan Province, SW China[J]. *Indicative of REE Mineralization*, 2017, 36(3):343-359.
- [3] 科学规划利用, 德昌打造强势稀土产业[N]. 凉山日报(汉), 2008-10-8(T6B).
- Scientific planning and utilization, Dechang builds strong rare earth industry [N]. *Liangshan Daily (Han)*, 2008-10-8(T6B).
- [4] 施泽民, 李小渝. 德昌大陆槽稀土矿床的发现及其意义[J]. 四川地质学报, 1995, 15(3):216-217.
- SHI Z M, LI X Y. Discovery and significance of rare earth deposits in the Dechang continental trough[J]. *Sichuan Geological Journal*, 1995, 15(3):216-217.
- [5] 朱志敏. 四川德昌大陆槽稀土矿工艺矿物学[J]. *矿产综合利用*, 2016(5):76-79.
- ZHU Z M. Process mineralogy of the rare earth mine in the continental trough of Dechang, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(5):76-79.
- [6] 张宗华, 罗长青, 杨德坤, 等. 德昌大陆槽稀土选矿实验研究[J]. 稀土, 1998, 19(5):1-8.
- ZHANG Z H, LUO C Q, YANG D K, et al. Experimental study of rare earth beneficiation in Dechang continental trough[J]. *Rare earth*, 1998, 19(5):1-8.
- [7] 四川德昌稀土矿磁选-重选流程工业实验取得良好指标[R]. 赣州有色冶金研究所, 2011.
- Industrial experiments on the magnetic separation-heavy separation process of Sichuan Dechang rare earth ore achieved good indicators[R]. *Ganzhou Institute of Nonferrous Metallurgy*, 2011.
- [8] 熊文良. 德昌大陆槽稀土选矿实验研究[R]. 成都: 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 2011.
- XIONG W L. Experimental study on rare earth beneficiation in Dechang continental trough[R]. *Chengdu: Institute of Comprehensive Utilization of Minerals, Chinese Academy of Geological Sciences*, 2011.
- [9] 四川省凉山州德昌县大陆槽乡大陆槽稀土矿实验室选矿流程实验研究报告[R]. 国土资源部成都矿产资源监督检测中心, 德昌县厚地稀土矿业有限公司, 2018.
- Report on the experimental study of the laboratory beneficiation process of the Continental Trough rare earth mine, Continental Trough Township, Dechang County, Liangshan Prefecture, Sichuan Province [R]. *Chengdu Mineral Resources Supervision and Testing Center, Ministry of Land and Resources, Dechang County Houdi Rare Earth Mining Co, Ltd*, 2018.
- [10] 朱英江, 王士伦. 提高德昌大陆槽稀土选矿回收率的研究[J]. 中国稀土, 资源综合利用与环境保护研讨会论文集, 2007: 74-77.
- ZHU Y J, WANG S L. Research on improving the recovery rate of rare earth beneficiation in Dechang continental trough[J]. *China Rare Earths, Proceedings of the Symposium on Comprehensive Utilization of Resources and Environmental Protection*, 2007: 74-77.
- [11] 德昌大陆槽稀土矿稀土回收实验报告[R]. 中稀(凉山)稀土有限公司牦牛坪选矿厂, 邛崃市豪致科技有限公司, 2023.
- Experimental report on rare earth recovery at Dechang continental trough rare earth mine [R]. *Maoniuping Beneficiation Plant of China Rare (Liangshan) Rare Earth Co. Ltd, Qionglai Haozhi Science and Technology Co, Ltd*, 2023.

(下转第 94 页)

eliminating or avoiding the passivation, robbing or secondary wrapping of gold by harmful substances, are the key and bottleneck problems to determine the gold recovery rate in refractory gold ores. Understanding the phase transformation and reconstruction evolution of gold-bearing minerals during pre-oxidation process is critical for inclusions destruction directly and gold leaching. In this article, the typical characteristics of refractory gold ores and existing pre-oxidation techniques were outlined, and the research advances in phase transformation and reconstruction of gold-bearing inclusions in roasting oxidation, hot-press oxidation, biological oxidation, chemical oxidation and other pre-oxidation processes were summarized. The result shows that the gold-bearing sulfides are mainly transformed into Fe oxides (or As oxides) and sulfate (or arsenate) by pre-oxidation. However, due to the coupling effect of multiple factors such as oxidation temperature, atmosphere or oxygen concentration, pH value, redox potential, Bacterial characteristics, etc., sulfides may also be converted into elemental sulfur, sulfur oxide, thiosulfate, jarosite and scorodite. In addition, jarosite, iron oxide and calcium sulfate are the main solid matters leading to the secondary package of gold. Pre-oxidation process and microscopic mechanisms, such as neutral thermobaric oxidation with low temperature and pressure, bacteria domestication with thermophilic, alkalophilic and arsenic-resistant properties, process enhancement of bacterial oxidation under multi-factor coupling, green and efficient oxidant screening, and chemical oxidation based on multi-field coupling, etc., still need to be deeply researched. The coupling relationship and regulation among ore characteristics, process reaction of pre-oxidation, phase transformation and reconstruction of gold-bearing materials and gold recovery rate are the research hotspots and difficulties in the green and efficient pre-oxidation field for refractory gold ores in the future.

**Keywords:** Mining engineering; Refractory gold ores; Pre-oxidation; Gold-bearing inclusions; Phase transformation; Phase reconstruction

////////////////////////////////////

(上接第 84 页)

## Sichuan Dechang Continental Trough Rare Earth Ore Beneficiation Process

XU Jianxin

(China Rare Earth (Liangshan) Co., Ltd., Xichang 61500, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an article in the field of mineral processing engineering. The Mianning-Dechang rare-earth mineralization belt in Sichuan is an important hard-rock-type rare-earth mineralization belt associated with Late Oligocene-Middle Miocene carbonatites in China. Within this metallogenic belt, there are Yakpeng super-large, Continental Trough large, Muluo and Lizhuang medium-sized light rare earth deposits closely associated with nepheline quartz orthoclase-carbonate heteroliths; the identified rare earth resource reserves (REO) in this metallogenic belt amount to several million t, which account for 8.73% of the identified resources in the country, and it is an important hardrock-type rare earth resource base in China. The advantage of rare earth resources in the continental trough over the Maoniuping is that the ore body is thick and large, easy to mine, the average grade of REO is 1%~2% higher than that of Maoniuping, and the rare earth distribution rate in the ore endowed with cerium fluorocarbon (CeF<sub>3</sub>) mineral phase is high, and the amount of ThO<sub>2</sub> in Cerium Fluorocarbon (CuF<sub>3</sub>) is small (Maoniuping 0.18%~0.43%), which is very favorable to the deep-processing and environmental protection. This article is based on rare earth beneficiation production practice, summarizes the different periods of production process on the recovery and utilization of rare earth resources, the continental trough rare earth beneficiation process puts forward new thinking and insights, for the rational use of rare earth resources to provide reference basis.

**Keywords:** Mineral processing engineering; Continental trough mine; Rare earth; Magnetic separation - re-election - flotation joint process