

文章编号:1673-9981(2019)04-0307-06

国外某海滨砂矿难选锆中矿选矿综合利用研究^{*}

肖飞燕,喻连香,周吉奎,梁冬云,李 波

广东省资源综合利用研究所,稀有金属分离与综合利用国家重点实验室,广东省矿产资源开发和综合利用重点实验室,广东 广州 510650



摘 要:通过对国外某海滨砂矿难选锆中矿进行工艺矿物学和选矿分离试验研究,采用湿式磁选—重选—干式磁选—电选联合选矿工艺流程,最终得到富钛钛铁矿含 TiO_2 52.31%,金红石含 TiO_2 92.43%,锆英石含 $\text{Zr}(\text{Hf})\text{O}_2$ 65.10%,独居石精矿含 REO 61.77% 产品,为同类型海滨砂矿综合回收利用提供了技术依据。

关键词:锆中矿;富钛钛铁矿;磁选;电选

中图分类号:TD913

文献标识码:A

锆是重要的稀有金属,其具有耐腐蚀、耐高温、可塑性强及机械加工性能好等优良性质,主要用于国防和航天工业领域中。锆是我国短缺的稀有金属之一,锆矿石资源主要分布在广东、海南、广西等东南沿海地区^[1],以海滨砂矿为主,一般伴生于钛铁矿、金红石和独居石中。随着中国经济的高速发展,对锆矿石的需求量不断增长,国外大量的锆原料、锆中矿进入中国,因此研究锆中矿分离及综合回收钛铁矿、金红石和独居石等具有十分重要的意义。

本研究的矿样为国外某地海滨原砂经粗选后的锆中矿,在对锆中矿样品进行详细的工艺矿物学研究的基础上,根据各矿物在磁性、导电性、密度等方面存在差异,采用湿式磁选—重选—干磁—电选联合选矿工艺流程,最终得到富钛钛铁矿、金红石、锆

英石、独居石精矿产品,使该难选锆中矿得到有效综合回收。

1 工艺矿物学研究

1.1 多元素化学分析

试验矿样为国外某地海滨砂矿的原砂经粗选后的锆中矿,其多元素化学分析结果列于表 1。由表 1 可知,矿样中除锆、钛可回收外,还有伴生的重要的稀土元素。

1.2 矿物组成

通过对矿样进行工艺矿物学研究,结果表明:矿样中钛矿物种类较多,主要为富钛钛铁矿,以及金红

表 1 矿样多元素化学分析结果

Table 1 Results of multi-elements chemical analysis of the ore

元素	TiO_2	$\text{Zr}(\text{Hf})\text{O}_2$	REO	Nb_2O_5	Fe	P	Al_2O_3	CaO	MgO	Cr_2O_3	SiO_2
含量 $w/\%$	29.66	27.48	3.03	0.079	10.48	0.94	5.53	0.16	0.094	0.80	20.11

收稿日期:2019-06-01

^{*} 基金项目:广东省科学院专项(2018GDASCX-0109);广东省科学院专项(2016GDASPT-0307);广东省科技厅项目(2017B030314046)

作者简介:肖飞燕(1965-),女,江西吉安人,高级工程师,本科。

石、白钛石和铌铁金红石;锆矿物为锆石;稀土矿物主要是独居石,以及少量的磷钇矿等;铁矿物含量极少,只有少量的钛磁铁矿;脉石矿物含量少、种类多,主要为石英、十字石、蓝晶石,其次为绿帘石、电气石、刚玉等。

1.3 钛物相分析

对矿样进行了钛物相分析,其分析结果列于表2。由表2可知,矿样中富钛钛铁矿占原砂总钛60.49%,金红石和白钛石占原砂总钛38.70%,本矿样主要回收是富钛钛铁矿和金红石。

表 2 钛物相分析结果

Table 2 Results of titanium phase analysis

钛物相	TiO ₂ 含量 w/%	分布率/%
钛磁铁矿	<0.01	—
钛铁矿	17.82	60.49
金红石/白钛石	11.40	38.70
硅酸盐	0.24	0.81
合计	29.46	100.00

表 3 矿样中各有价矿物粒度分布结果

Table 3 Size distribution pattern analysis results of valuable minerals in the ore

粒级/mm	粒度分布率/%							
	锆石	富钛钛铁矿	金红石	铌铁金红石	白钛石	钽铌铁矿	独居石	磷钇矿
+0.32	—	0.17	—	—	—	—	—	—
−0.32+0.16	4.87	12.03	6.69	10.96	5.64	16.96	1.20	5.86
−0.16+0.08	71.97	72.38	72.73	71.63	68.62	51.96	62.69	59.70
−0.08+0.04	21.35	13.45	17.57	16.91	16.93	19.23	33.16	24.26
−0.04+0.02	1.67	1.49	2.35	0.27	5.46	5.25	2.71	6.89
−0.02+0.01	0.13	0.30	0.49	0.21	2.27	3.21	0.23	2.12
−0.01	0.01	0.18	0.17	0.02	1.08	3.39	0.01	1.17

2.1 高梯度磁场强度试验

根据工艺矿物学研究结果表明富钛钛铁矿在0.55~0.97T场强下进入磁性产品,铌铁金红石、白钛石在0.88~1.40T场强下才能进入磁性产品,而锆石和大多数金红石属非磁性矿物则进入非磁性产品,根据各矿物之间的磁性差异,对该矿样进行了高梯度磁选场强试验。试验使用SSS-1型500湿式高梯度磁选机,磁场强度试验流程为一次粗选、一次精选如图1所示。

1.4 主要矿物粒度

用MLA测定矿样中各个有价矿物粒度的大小,测定结果列于表3。由表3可知,矿样中各个有价矿物粒度大小相近,粒度范围分布较窄,主要集中在0.04~0.16mm粒级,属于重选、磁选的易选粒级。由于矿样中锆石、富钛钛铁矿、金红石、独居石等有用矿物具有良好的天然解离性,因此不需要磨矿可直接进行分选。

2 选矿试验研究

矿样中的有价矿物主要为富钛钛铁矿、金红石、锆石和独居石,由于钛铁矿、金红石、独居石各具有不同程度的磁性,其中金红石具较强导电性,而锆石既无磁性也无导电性,脉石矿物的比重低于以上有用矿物的比重^[2]。因此,利用各矿物之间的性能差异,采用湿式磁选—重选—干磁—电选联合选矿工艺流程对该矿样进行回收,最终得到富钛钛铁矿、金红石、锆英石、独居石精矿产品。

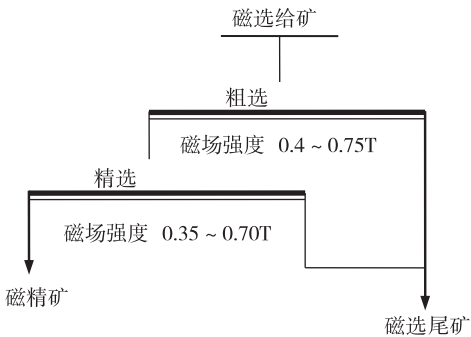


图 1 磁场强度试验流程图

Fig. 1 Flow-sheet of magnetic field intensity test

表 4 为一粗、一精高梯度磁场强度试验结果. 从表 4 可知,粗选磁场强度 0.60T、精选磁场强度 0.55T 时,TiO₂ 的回收率为 63.01%,磁性精矿中

TiO₂ 的品位为 47.20%,表明富钛钛铁矿均进入磁性产品中,适宜的粗选场强为 0.60 T、精选为 0.55 T.

表 4 一粗、一精高梯度磁场强度试验结果
Table 4 Results of magnetic field intensity test on HGMS with 1 stage rougher and cleaner

磁场强度/T	产品名称	产率/%	品位 w/%			回收率/%		
			TiO ₂	Zr(Hf)O ₂	REO	TiO ₂	Zr(Hf)O ₂	REO
粗选:0.41	磁精矿	20.86	52.29	0.42	4.19	36.90	0.32	28.73
精选:0.36	磁选尾矿	79.14	23.57	34.25	2.74	63.10	99.68	71.27
	磁选给矿	100.00	29.56	27.19	3.04	100.00	100.00	100.00
粗选:0.50	磁精矿	29.05	49.50	0.58	5.38	48.20	0.62	52.79
精选:0.46	磁选尾矿	70.95	21.78	37.89	1.97	51.80	99.38	47.21
	磁选给矿	100.00	29.83	27.05	2.96	100.00	100.00	100.00
粗选:0.60	磁精矿	39.55	47.20	0.65	5.36	63.01	0.94	70.04
精选:0.55	磁选尾矿	60.45	18.13	44.85	1.50	36.99	99.06	29.96
	磁选给矿	100.00	29.63	27.37	3.03	100.00	100.00	100.00
粗选:0.73	磁精矿	44.62	44.58	0.88	6.55	67.79	1.46	97.06
精选:0.68	磁选尾矿	55.38	17.07	48.21	0.16	32.21	98.55	2.94
	磁选给矿	100.00	29.35	27.09	3.01	100.00	100.00	100.00

2.2 重选试验

对磁选所获得的磁精矿和磁选尾矿分别进行重选摇床试验. 试验采用 XZY1100×500 细泥摇床,试验条件为:冲程 14 mm,冲次 326 r/min,坡度 3.5°. 磁精矿中主要含富钛钛铁矿和独居石,对富钛钛铁

矿和独居石进行分离,其试验结果列于表 5. 由表 5 可知,经摇床选别后,摇床的精矿主要含独居石,其中稀土含量 REO 为 23.55%,作业回收率达 94.73%,摇床的尾矿为含富钛钛铁矿精矿,TiO₂ 含量为 51.38%,作业回收率为 86.14%.

表 5 磁选精矿摇床试验结果
Table 5 Results of shaking table test on magnetic separation concentrate

产品	作业 产率/%	品位 w/%			作业回收率/%		
		Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO	Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO
摇床精矿	21.56	1.01	30.35	23.55	33.54	13.86	94.73
钛铁矿精矿	78.44	0.55	51.83	0.36	66.46	86.14	5.27
摇床给矿	100.00	0.65	47.20	5.36	100.00	100.00	100.00

磁选尾矿中主要含锆英石、金红石、其次有脉石英、蓝晶石、刚玉等,采用摇床分离出大部分比重较轻的脉石矿物,摇床精矿 1 主要是锆英石、金红石和独居石,试验结果见表 6.

由表 6 可知,经摇床选别后,摇床的精矿 1 主要含锆英石和独居石,其中 Zr(Hf)O₂ 含量 58.48%,REO 含量 3.01%,摇床的尾矿为金红石,TiO₂ 含量为 23.25%.

2.3 干磁选试验

根据重选产品中主要矿物的磁性差异,可采用干磁选分别对重选分组后的摇床精矿进行分离,实现独居石和富钛钛铁矿的分离,以及锆、金红石与独居石的分离. 试验采用 138A-C3 型应辍型磁选机,经过系列试验结果表明,在磁场强度 0.97T 条件下可使富钛钛铁矿、独居石与锆英石和金红石有效分

表 6 磁选尾矿摇床试验结果

Table 6 Results of shaking table test on magnetic separation tailing

产品	作业 产率/%	品位 $w/\%$			作业回收率/%		
		Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO	Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO
摇床精矿 1	35.71	58.48	5.51	3.01	46.57	10.85	71.53
摇床精矿 2	54.12	42.61	27.38	0.78	51.42	81.72	28.13
摇床尾矿	10.17	8.89	23.25	0.05	2.01	7.43	0.34
摇床给矿	100.00	44.85	18.13	1.50	100.00	100.00	100.00

离,分离出的非磁性产品 1 进一步通过电选分离锆英石和金红石;在磁场强度 0.55T 条件下对一次干磁选精矿进一步有效分离,获得 TiO₂ 含量为 53.66%,回收率为 8.12%的钛铁精矿;在磁场强度 0.65T 条件下精选独居石,可得到 REO 含量为 61.74%、回收率为 60.44%的稀土精矿,干磁选试验流程见图 2。

高梯度磁选尾矿经摇床重选后,重矿物主要是锆英石、金红石和独居石等,采用图 2 干磁选试验流程及磁选条件进行有效分离后,在磁场强度 0.55T 条件下精选得到 TiO₂ 含量为 57.27%的钛精矿;在磁场强度 0.65T 条件下精选独居石,可得到 REO 含量为 61.89%的稀土精矿,分离出的非磁性产品 2 进一步通过电选分离锆英石和金红石. 试验结果见表 7。

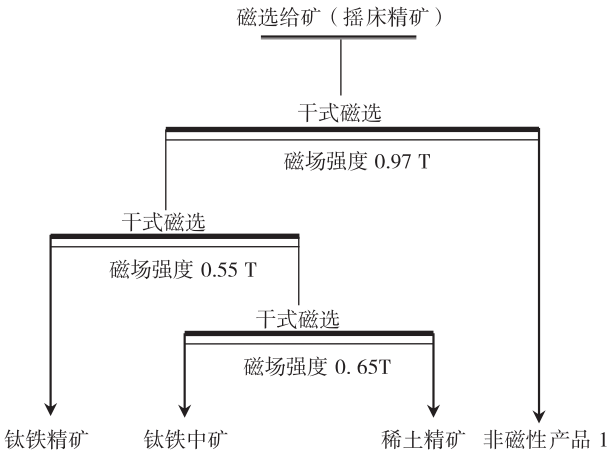


图 2 干磁选试验流程

Fig. 2 Testflow-sheet of dry magnetic separation

表 7 干磁选分离试验结果

Table 7 Test results of dry magnetic separation

产品	作业 产率/%	品位 $w/\%$			作业回收率/%		
		Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO	Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO
钛铁精矿	3.29	0.46	57.27	0.32	0.03	10.08	0.64
钛铁中矿	4.52	3.68	46.52	13.47	0.34	11.26	36.80
稀土精矿	1.56	0.21	3.48	61.89	0.01	0.29	58.18
非磁性产品 2	90.63	53.77	16.16	0.08	99.62	78.37	4.38
干磁选给矿	100.00	48.92	18.69	1.66	100.00	100.00	100.00

2.4 电选试验

电选就是基于被分离物料在电性质上的差异,利用电选机使物料颗粒带电,在电场中颗粒受到电场力和机械力的作用,不同电性的颗粒运动轨迹发生差异而使物料得到分选,在海滨砂矿中常用来分离金红石和锆英石,钛铁矿和长石、石英等^[3]。

采用干磁选所获得的非磁性产品 1,非磁性产品 2,主要为锆英石和金红石,还有少量的刚玉和蓝

晶石,根据锆英石和金红石的电导性差异,利用电选分离锆英石和金红石. 试验采用 MARKⅢ筛网式电选机,电压对分选效果有直接关系,随着工作电压升高,金红石品位逐步提高,但回收率下降,试验探索了不同条件下的电压对金红石的品位和回收率的影响,为了获得高品位的锆精矿,对非磁性产品 1 和非磁性产品 2 分别进行电选,非磁性产品电选试验流程见图 3,非磁产品电选试验结果见表 8。

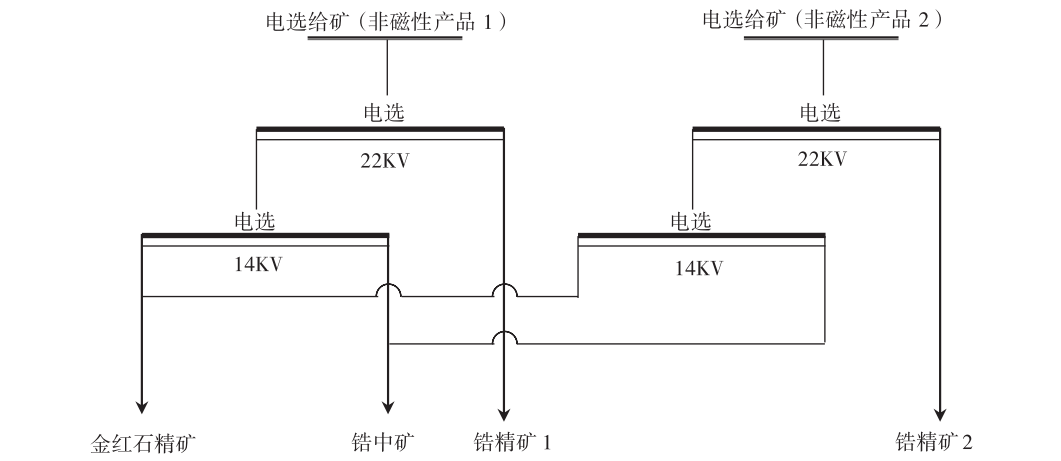


图 3 电选试验流程

Fig. 3 Test flow-sheet of electric separation

表 8 电选试验结果

Table 8 Test results of electrical separation

产品	作业 产率/%	品位 $w/\%$			作业回收率/%		
		Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO	Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO
锆精矿 1	70.39	65.10	0.07	0.03	85.59	0.31	25.98
锆精矿 2	7.57	60.15	0.85	0.06	8.50	0.40	5.59
锆中矿	6.2	48.85	21.56	0.77	5.65	8.30	58.69
金红石精矿	15.84	0.87	92.43	0.05	0.62	90.99	9.74
电选给矿	100.00	53.54	16.09	0.08	100.00	100.00	100.00

由表 8 可知,非磁性产品 1 主要含锆英石和金红石,在 22kV 电场条件能选出高品位的锆精矿,锆精矿品位大于 65%,在 14kV 电场条件下精选出的金红石精矿较纯,TiO₂ 含量达 92.43%。非磁性产品 2 主要含锆英石和金红石还有少量的刚玉和蓝晶石,在 22kV 电场条件下能选锆精矿品位为 60.15%,在显微镜下观察主要含少量比重较大的刚

玉和蓝晶石影响锆精矿的品位,这部分锆精矿量比较少可以作为四级品锆精矿出售,含 Zr(Hf)O₂ 为 65.10%的一级品锆精矿和含 Zr(Hf)O₂ 为 60.15%的四级品锆精矿,两部分合并锆精矿对原矿的总作业回收率为 91.19%,达到选矿综合回收的试验目的。试验结果表明,锆中矿经湿式磁选—重选—干磁选—电选联合流程选别后最终获得精矿产品结果见表 9。

表 9 最终精矿产品试验结果

Table 9 Test results of final concentrates

产品	产率/%	品位 $w/\%$			作业回收率/%		
		Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO	Zr(Hf)O ₂	TiO ₂	REO
锆精矿 1	34.88	65.10	0.07	0.03	82.95	0.08	0.35
锆精矿 2	3.75	60.15	0.85	0.06	8.24	0.11	0.07
金红石精矿	7.85	0.87	92.43	0.05	0.25	24.46	0.13
钛铁矿精矿	37.29	0.49	52.31	0.41	0.66	65.84	4.98
稀土精矿	3.81	0.65	2.53	61.77	0.09	0.33	77.81

3 结 论

(1)国外某海滨砂矿锆中矿具有复杂的矿物组成,可回收的有价矿物主要为锆石和富钛钛铁矿,有用矿物有良好的天然解离性,不需磨矿就可分选,同时可综合回收金红石和独居石。

(2)试验开发出了湿式磁选—重选—干磁选—电选经济合理的联合选矿工艺流程,使锆中矿得到有效综合利用,最终获得富钛钛铁矿、金红石、锆英石、独居石精矿产品。

(3)试验开发的锆中矿精选分离工艺流程无药剂污染,尾水可全部回用,无尾渣污染,符合环保要求。

(4)本研究的选矿工艺流程分选指标好,适用于工业生产,并产生良好的经济效益,为同类型海滨砂矿综合回收利用提供了技术依据。

参考文献:

[1] 梁冬云,李波. 稀有金属矿工艺矿物学[M]. 北京:冶金工业出版社,2015:127-128.

[2] 侯军发,张婷婷. 高梯度湿式磁选机在锆钛选矿生产中的应用[J]. 建材世界,2013,34(5):68-69.

[3] 董天颂. 钛选矿[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:91-92.

[4] 张建文,梁汉,张华,等. 莫桑比克海滨砂矿中金红石选矿综合利用研究[J]. 有色金属:选矿部分,2013(增刊):169-172.

Study on zirconium medium ore comprehensive utilization from a refractory coastal sand mine abroad

XIAO Feiyan, YU Lianxiang, ZHOU Jikui, LIANG Dongyun, LI Bo

Abstract: Based on the process mineralogy and separation test on a refractory foreign seashore zirconiummedium, a wet magnetic separation-gravity separation-dry magnetic separation-electrical separation combined beneficiation process was used to obtain titanium-rich ilmenite (52.31% TiO₂) and rutile (92.43% TiO₂), zircon (65.10% Zr(Hf)O₂) and monazite concentrate (61.77% REO) products, and provides a technical basis for comprehensive recovery and utilization of the similar coastal sand ore.

Key words: zirconium ore;titanium-rich ilmenite;magnetic separation;electrical separation