

用磁分离和高梯度磁选综合利用

铅锌选厂尾矿^①

彭世英

(中南工业大学矿物工程系, 长沙 410083)

摘 要 用磁分离和高梯度磁选(HGMS)处理黄岩铅锌选厂尾矿,使尾矿 MnO 含量由 7.37%降至 0.42%, Fe₂O₃ 含量由 6.66%降至 1.05%。处理后的尾矿可用作陶瓷节能原料,分离出的磁性产物可研究作为磁性肥料使用。

关键词 磁分离 高梯度磁选(HGMS) 尾矿综合利用

浙江黄岩铅锌矿尾矿日产百吨,堆聚于危坝中,严重威胁下游两县一市。其主要成分是硅酸盐和含铝矿物,如石英、绢云母、伊利石等,可代替长石作陶瓷节能原料,使成瓷温度降低 100℃左右。但陶瓷节能原料要求 Fe₂O₃+MnO 含量小于 1.5%,而黄岩尾矿中的则为 14.03%,大大超标。其铁锰矿物为黄铁矿、赤铁矿、菱锰矿、锰方解石,多能用磁分离和高梯度磁选除去。本研究使尾矿 Fe₂O₃+MnO 含量降至 1.47%,其中铁降低了 5.7 倍,锰降低了 13 倍。对高梯度磁选来说,其大型工业性设备的生产指标往往优于实验室试验指标;这在广西栗木锡矿和 CL d 500 HGMS 都得到了证明^[1]。黄岩铅锌矿尾矿的综合利用,还可减轻尾矿危坝对其下游地区的威胁,意义重大。

1 粒度分析

1.1 筛分分析

取矿样 1 kg,用 100、200、300 及 360 目标准套筛筛析。为保证筛分效率,进行高频击振湿筛。然后考查各粒级锰铁含量及分布率,结果列于表 1。

从表 1 可看出:大于 300 目的占 56%, Mn 的分布率为 51.3%,而 Fe₂O₃ 只有 43.72%;-300 目的占 44%,Mn 为 48.70%,Fe₂O₃ 达 56.28%。其中 Mn 品位只有 3.19%,Fe₂O₃ 2.53%;而-100 目的 Mn 最低品位亦达到 5.46%,Fe₂O₃ 最高达到 6.74%,低的亦在 3.72%以上。这表明锰铁量富集于细粒矿物中,增加了其分选的难度。

1.2 水析

本试验对+0.074~-0.005 mm 的矿物粒度组成进行了分析,结果列于表 2。

从表 2 可以看出:细级别的锰含量增高,-0.074~+0.04 mm 粒级的 MnO 含量达到 9.55%,而-5 μm 粒级 MnO 又降到 3.17%;但是 Fe₂O₃ 含量却相当接近。这就决定了对细粒级、尤其是铁矿物只能不分级处理。从 K₂O、Al₂O₃ 和 SiO₂ 含量来看,只要能降低铁锰,此尾矿即可以成为较理想的陶瓷节能原料。尤其细粒级 Al₂O₃ 品位提高,-5 μm 粒级达到 21.09%,如果分离出,不但可以作陶瓷用高岭土的原料,还可掺和作其他用途的高岭土代料。K₂O 含量达 5.83%,是陶瓷用长石的良好代料。

① 收稿日期:1994-06-10;修回日期:1994-09-24

表1 筛分分析结果

筛析粒度/目	重量/g	产率%	品位%			分布率%		
			Mn	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Mn	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
+100	88.98	9.62	3.19	2.53	2.40	5.28	5.15	7.94
-100~+200	313.00	33.84	5.46	3.72	2.15	31.87	26.65	25.05
-200~+300	116.00	12.54	6.45	4.49	2.01	14.15	11.92	8.67
-300~+360	145.10	15.67	6.57	4.78	3.93	17.76	15.85	21.20
-360	260.00	28.33	6.32	6.74	3.81	30.94	40.43	31.14
合计	924.98	100.00	5.79	4.72	2.91	100.00	100.00	100.00

表2 水析粒级分析结果

粒度/mm	产率%	品位%					分布率%				
		MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
+0.074	28.50	6.57	3.67	1.93	7.14	70.41	26.16	27.61	22.33	21.55	33.65
-0.074~+0.040	26.05	9.55	3.86	1.53	6.23	55.38	34.76	26.56	16.18	17.18	24.20
-0.040~+0.020	13.74	7.75	3.46	1.68	6.73	61.25	14.88	12.54	9.37	9.79	14.12
-0.020~+0.010	14.44	7.10	3.73	2.57	10.52	55.71	14.33	15.82	15.07	16.09	13.49
-0.010~+0.005	9.87	4.33	3.29	4.88	18.05	51.99	5.97	11.27	19.56	18.86	8.61
-0.005	7.40	3.77	3.17	5.82	21.09	47.74	3.90	6.20	17.49	16.53	5.93
合计	100.00	7.16	3.79	2.46	9.44	59.62	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

2 试验及结果

从粒度分析及磁分离的难易来看,本试验尾矿宜先除铁钛,以粗、细级别分级后分别处理。

2.1 粗粒级矿物的磁力分析及分选

筛分分析的结果表明+100目锰铁含量较低,分别为3.19%和2.53%,但也大大超过综合利用的要求;而+300目到-200目锰铁含量在5.46%及3.72%以上,与更细粒级含量相近,均需除锰脱铁。本研究以+300目作为一个分选作业,首先对+300目矿样进行了磁力分析。

将+300目的矿样分成+100目、-100~+200目、-200~+300目三个级别,分别在1400、3600、5800Gs、6600Gs条件下进行磁力分析。磁析结果见表3。

由表可见:非磁性产品中铁、锰的含量随磁场强度提高明显降低。磁析+100目产品在6600Gs时,MnO由4.20%降到了1.24%,Fe₂O₃由0.70%降到了0.53%;而-100~+200目的MnO₂由7.68%只降到了4.38%,Fe₂O₃由0.86%降到了0.68%;-200~+300

目MnO由6.45%降到了1.84%,Fe₂O₃则由4.49%降至0.55%。这证明铁锰可以用磁选降低。

本试验还表明:各粒级物料中磁性产品产率随场强提高而大大增加,如+100目在1400Gs时,仅1%;到6600Gs可达18.8%。

2.2 粗粒级的磁选试验

在不同磁场强度下,分别对+300目矿物铁、锰的除去进行了试验。

除铁分析结果见表4。

磁析结果说明了Fe₂O₃的除去是效果明显

表3 +300目各粒级磁析结果

粒度/目	非磁性产品	品位%			
		1400/Gs	3600/Gs	5800/Gs	6600/Gs
+100	MnO	4.20	2.70	2.57	1.24
	Fe ₂ O ₃	0.70	0.52	0.42	0.53
	FeO	1.97	1.33	1.35	0.72
	K ₂ O	2.25	2.27	2.27	2.40
-100至+200	MnO	7.68	7.52	5.18	4.38
	Fe ₂ O ₃	0.86	0.76	0.74	0.68
	FeO	3.43	3.30	2.07	2.03
	K ₂ O	1.88	1.91	2.02	2.08
-200至+300	MnO	5.09	5.44	2.29	1.84
	Fe ₂ O ₃	0.66	0.92	0.71	0.55
	FeO	2.28	2.43	1.28	1.22
	K ₂ O	2.16	2.26	2.25	2.42

表4 不同磁感强度非磁性产品 Fe₂O₃ 品位(%)

粒度/目	磁感强度/Gs				原矿
	1 400	3 600	5 800	6 600	
+100	0.70	0.52	0.42	0.41	3.23
−100 ~+200	0.86	0.71	0.70	0.68	3.72
−200 ~+300	0.66	0.62	0.61	0.55	4.49

的：在较低的磁感强度下就能降到1.0%以下；磁场升高到6 600Gs时，可降到0.70%以下；+100目还可降至0.41%。只是−100~+200目尚有0.68%；−200~+300目亦可以降至0.55%。

从磁析了解到铁的除去，对+300目矿样来说是易在生产中实现的，重要的是要研究锰的分选。

首先对+300目进行了磁析并对−300目产率及锰赋存进行了分析，结果见表5。

表5 +300目磁析及−300目锰赋存分析结果

分析项目	磁感强度/Gs				非磁性物	−300目
	1 400	3 000	5 000	6 500		
产品重/g	18.50	76.5	14.50	4.50	101.00	281.00
产率%	3.73	15.42	2.92	0.91	20.36	56.65
锰品位%	14.89	8.60	5.35	3.91	0.59	5.77
累积锰分布%	10.16	34.44	37.30	37.96	40.15	100.00
锰分布率%	10.16	24.28	2.86	0.66	2.10	59.85

从表5可以看出：当磁场达6 500Gs时，锰的除去率为37.96%，而非磁性物锰分布才2.10%。大部分锰赋存在−300目产物中，达到59.85%，说明粗级别除锰较易，而−300目的脱锰较难。

在以上研究基础上进行了+300目试样的

干式磁选。使用设备为XCGG1-64型单辊干式磁选机，分选结果与磁析一致。

含Mn为5.46%的给矿(+300目)，经四次干式磁选后，Mn可以降至0.59%。

2.3 细粒级的高梯度磁选

2.3.1 矿物组成分析

矿物组成分析结果如表6所示。

表6 试样(−300目)矿物成分分析

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	
含量%	63.02	10.69	2.89	1.22	0.44	7.61	
成分	Fe ₂ O ₃	FeO	T _{Fe}	Cu	Pb	Zn	Cd
含量%	1.14	4.78	6.45	0.005	0.40	0.28	0.002
成分	TiO ₂	S	Cr	Ni	Sn	As	
含量%	0.10	0.25	0.01	0.001	0.003	<0.03	

由表可知：黄岩铅锌尾矿细粒部分Pb、Zn已降到了1.0%以下；主要成分是SiO₂、Al₂O₃、K₂O等；而锰、铁大大超标。

−300目以下细粒级矿物用常规选矿方法效果是不佳的；用浮选，因为这已是浮选的尾矿，需用大量药剂去活化；重选对−300目矿物分选效果也差；而高梯度磁选则是有效的方法。本研究采用T型磁系电磁式振动高梯度磁选机，试验参数主要有磁场强度、矿浆流速、磁介质充填率、负荷比等。由于处理细矿粒，比表面能大，矿粒间互相粘附，因此加分散剂可使磁性矿粒与非磁性矿粒互相分散，提高分选效率和分选指标。

2.3.2 磁感强度试验

磁感强度试验结果如表7所示。

表7 磁感强度条件试验

磁感强度/Gs	分选的产品	产率%	品位%			回收率%		
			Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O
2 500	非磁性物	72.36	3.46	2.22	4.63	37.59	23.55	83.97
	磁性物	27.64	14.76	17.22	2.28	62.41	76.45	16.03
5 000	非磁性物	67.85	3.02	1.71	4.65	30.77	17.01	79.07
	磁性物	32.15	14.34	17.60	2.60	69.23	82.99	20.93
10 000	非磁性物	58.39	2.67	1.27	4.82	23.41	10.87	70.54
	磁性物	41.61	12.26	14.61	2.83	76.59	89.13	29.46
15 000	非磁性物	61.00	2.60	1.21	4.72	23.81	10.82	72.16
	磁性物	39.00	13.01	15.59	2.85	76.19	89.18	27.84
原矿的参数		100	6.66	6.82	3.99	100	100	100

其他试验参数为：介质充填率 5%，给矿浓度 10%，分散剂用量 2 kg/t(干矿)，矿浆流速 1 cm/s；振动电流 5A。

试验表明：随着磁感强度增加，磁性产品产率增加，非磁性物(目的矿物) Fe_2O_3 、 MnO 品位为 3.46%、2.22%；去除率为 62.41%、76.45%；而当磁场增加到 10 kGs 时，铁、锰的含量降到 2.67%、1.27%，去除率分别为 76.59%、89.13%。但磁场再增加到 15 000 Gs 时，以上指标不再发生变化，由此可确定较优磁感强度为 13 000 Gs。

2.3.3 流速试验

磁选的磁捕集率与矿浆流速成反比^[3]，为取得优化的磁捕集率，必须控制流速。本流速试验磁感强度取 13 000 Gs，浆料浓度 10%，介质充填率同前，分散剂仍为 2 kg/t(干矿)。取四个流速点：0.96、2.32、3.39、4.0 cm/s。

试验结果列于表 8。试验表明：矿浆流速在 0.96~2.32 cm/s 时，铁锰品位低于其他流速，即非磁性物——目的矿物质量好；大于此

流速产品中含 Fe_2O_3 和 MnO 明显增加，说明流速大竞争力大，使磁性物在分选介质上脱附而进入了非磁产品中。因此矿浆流速不能过大；但流速小，生产处理量会降低，故流速选 2.4 cm/s 较为适合。

2.3.4 分散剂用量试验

处理微细粒矿物，磁性矿物与非磁性矿物表面电性键力吸引，而影响 HGMS 的效果^[4]，故必须加分散剂，使带同种电性矿粒互相分散，优化分选效果。为探索分散剂最佳用量，取四水平进行试验，HGMS 其他值同前并取优化值。

分散剂使用六偏磷酸钠，试验结果见表 9。

结果表明：分散剂用量 10 kg/t 时铁锰含量最低，去铁锰率达 69.7%，但采用 10 kg/t 从经济观点看是不合算的。而采用 2.5 kg/t 时，去铁率仍达 66.67%，接近 10 kg/t 的指标，故生产上采用 2.5 kg/t 为宜。

以上为单因素试验，且均只分离一次，难达工业性生产要求，须再进行综合条件试验。

表 8 流速试验结果

流速 /cm·s ⁻¹	产品名称	产率 %	品位%			回收率%		
			Fe_2O_3	MnO	K_2O	Fe_2O_3	MnO	K_2O
0.96	非磁性物	65.64	3.37	2.09	4.46	33.21	20.12	73.37
	磁性物	34.33	12.95	15.86	3.09	66.79	79.88	26.63
2.32	非磁性物	66.49	2.92	1.53	4.56	29.15	14.92	75.99
	磁性物	33.51	14.08	17.32	2.86	70.85	85.08	24.01
3.40	非磁性物	67.12	3.58	2.33	4.54	36.08	22.93	83.98
	磁性物	32.88	12.95	15.84	2.84	63.92	77.01	16.02
4.00	非磁性物	72.57	3.80	2.58	4.61	41.40	27.45	83.85
	磁性物	27.43	14.23	18.04	2.35	58.60	72.55	16.15

表 9 分散剂用量试验

用量 /kg·t ⁻¹	试样 产品	产率 %	品位%			回收率%		
			Fe_2O_3	MnO	K_2O	Fe_2O_3	MnO	K_2O
0	非磁性物	60.17	3.63	2.41	4.12	32.80	21.26	62.12
	磁性物	39.83	11.24	13.48	3.79	67.20	78.74	37.88
2.5	非磁性物	71.38	3.11	1.78	4.33	33.33	18.63	77.76
	磁性物	28.62	15.51	19.39	3.14	66.67	81.37	22.24
5.0	非磁性物	72.81	3.46	2.13	4.14	37.83	22.74	75.56
	磁性物	27.19	15.23	19.38	3.59	62.17	74.26	24.44
10.0	非磁性物	68.18	2.96	1.67	4.18	30.30	16.70	71.43
	磁性物	31.82	15.59	17.85	3.58	69.70	83.30	28.57

(下转 33 页)

显然所取函数系列 φ_{mn} 满足(10)所示边界条件, 而此 B_{mn} 为待定系数, 由变分原理:

$$\iint \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \delta \phi \, dx dy = 0 \quad (18)$$

取变分

$$\delta \phi = \varphi_{ij} \delta B_{ij} \quad (19)$$

代入并移项有:

$$\begin{aligned} & \int_0^a \int_0^b \frac{1}{E} \nabla^2 \nabla^2 \phi \left[\sum \sum B_{mn} \cos \frac{n\pi x}{a} \right. \\ & \times \left. \sin \frac{m\pi y}{b} \right] \varphi_{ij} \, dx dy \\ & = \int_0^a \int_0^b f(x, y) \varphi_{ij} \, dx dy \end{aligned} \quad (20)$$

又由于三角级数的正交性, 有:

$$B_{mn} = \frac{4Ea^3b^3}{[(n\pi b)^2 + (m\pi a)^2]}$$

$$\times \int_0^a \int_0^b f(x) \cos \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \, dx dy \quad (21)$$

$f(x, y)$ 仍由(13)所定义, 此积分由辛卜生公式进行数值求积, 取 $\delta < 10^{-5}$ 为收敛数据, 一般积分取 50 为宜。又由端部应力边值

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \bar{\sigma}_0/2 \\ &= \frac{1}{2b} \int_0^b (Q_x^I + \frac{\partial M_{xy}^I}{\partial x}) \, dy \end{aligned} \quad (22)$$

将式(21)、(22)、代入式(17)便可求解。

参考文献

- 1 伍洪泽. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(增刊 2): 1.
- 2 徐芝纶. 弹性力学. 北京: 人民教育出版社, 1979.

(上接 26 页)

2.3.5 多参数综合条件试验

各条件参数选优取: 流速 2.32 cm/s, 分散剂用量 2.5 kg/t, 浓度 10%, 磁场强度依次为 2500、5000、13000Gs, 介质钢毛充填率为 5%, 钢板网 10%。分选结果: 原矿(-300 目)的品位为: Fe_2O_3 6.66%, MnO 6.82%, K_2O 3.99%; 精矿的品位为: Fe_2O_3 1.05%, MnO 0.41%, K_2O 4.33%。可见, 经 2500~13000Gs 场强的高梯度磁选, 黄岩铅锌尾矿的 Fe_2O_3 + MnO 含量小于 1.5% 达到了综合利用要求。

高梯度磁选多年生产实践证明, 工业性高梯度磁选的指标优于实验室指标; 原因是生产型高梯度磁选实践工作条件稳定, 操作完全自动化。我们研制的工业型 CLd500 振动脉动高梯度磁选机^[5, 6], 在现厂生产连续运转两年, 工作正常, 生产指标优于实验室指标。用于微细粒钽铌黑细泥分选的 ZLd500 振动鼓动式高梯度磁选机^[7]也在工业性试验中取得成功。最

近笔者还研制成功了 YC-P001 型永磁高梯度磁选机^[8], 这保证了黄岩铅锌尾矿除铁锰工艺设备的可靠。吴县青山白泥矿尾矿和双王金矿尾矿的综合利用^[9, 10]使用的是重选和浮选; 黄岩铅锌尾矿用磁选全流程使之得以综合利用, 是尾矿利用的又一选矿工艺, 生产成本低, 无工业污染。

参考文献

- 1 彭世英. 矿产保护与利用, 1994, (3): 28-30.
- 2 彭世英. 陶瓷, 1989, 2: 41-42.
- 3 彭世英, 文南, 缪中柱. 矿产综合利用, 1989, 4: 5.
- 4 彭世英, 陆杰等. 非金属矿, 1988, 4: 17-18.
- 5 彭世英, 文南等. CN892126507. 1990.
- 6 彭世英, 文南等. CN89105748X. 1992.
- 7 孙仲元, 彭世英. CN901054992. 1993.
- 8 彭世英, 文南. CN932342655. 1994.
- 9 黄祥云, 邢华昌. 矿产综合利用, 1988, 1: 33.
- 10 孙继寿. 矿产综合利用, 1988, 1: 36-38.