

某硫化铅锌矿重介质分选白云石

饶金山^{1,2}, 陈志强^{1,2}, 胡红喜^{1,2}, 刘超^{1,2}, 邱显扬^{1,2}, 管则皋^{1,2}

(1. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东 广州 510650; 2. 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510650)

摘要: 某硫化铅锌矿为热水喷流-改造成矿型矿床, 脉石矿物主要是白云石。产率 40%~50% 的浮选尾矿需尾矿库堆存, 由于不能扩建或新建尾矿库, 矿山的生产面临困难, 因此提出全资源化的策略。本研究对磨矿给料中的-15+4 mm 粗粒进行重介质旋流器分离白云石, 在重悬浮液比重 2.1、旋流器压力 1.0 kg/cm² 的条件下, 白云石产率 32.70%, 含铅 0.043%、锌 0.16%, 铅锌作业损失率分别为 1.46% 和 1.60%, 白云石产品经化学分析, 满足 NBYS19A 级耐火材料用白云石。-15+4 mm 粒级通过重介质旋流器分离出白云石, 可减少 32.70% 的矿石进入磨浮作业, 降低磨浮成本, 并实现了白云石的资源化利用, 这对推进矿山的全资源化具有重要意义。

关键词: 硫化铅锌矿; 白云石; 热水喷流改造; 重介质旋流器

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.025

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 02-0178-06

引用格式: 饶金山, 陈志强, 胡红喜, 等. 某硫化铅锌矿重介质分选白云石[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 178-183.

RAO Jinshan, CHEN Zhiqiang, HU Hongxi, et al. Separation of dolomite from a lead-zinc sulfide by dense medium[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 178-183.

某铅锌矿铅锌综合品位约 3.5%, 目前矿山仅产出铅精矿和锌精矿, 综合产率约 15%, 而产率 35%~45% 的中粗粒尾矿用于井下充填, 40%~50% 细粒尾矿需堆存于尾矿库。受限于《尾矿库安全管理规定(2019 年修订稿)》, 该矿不能扩建或新建尾矿库, 其扩产甚至生产面临困境, 因此提出了全资源化的策略。

目前矿山全资源化研究主要集中在尾矿:

(1) 胶结充填^[1], (2) 再选回收有价金属^[2], (3) 制初级建材如免烧砖^[3]、微晶玻璃^[4]和硅酸盐水泥^[5]等, (4) 少数研究者用尾矿制备高端材料, 如储水泡沫陶瓷^[6]、多孔陶瓷^[7]。磨矿给料端(-15 mm 粒级)全资源化的研究较少, 但其具有独特的优势, 可大幅减少磨浮处理量、降低磨浮成本。

粗粒矿石分选采用的方法有光电分选、重介质旋流器和跳汰。光电分选适合大块废石和大块有用矿石的拣选^[8], 粒度约-70+15 mm; 重介质旋流器则适合-40+0.5 mm 粒级分选; 跳汰适合-3 mm 物料的分离。重介质旋流器已在选煤^[9]和磷灰石^[10]分选领域大规模应用, 在铁、锰、铅、锌^[11]、钨^[12]、锡、铋^[13]、萤石、锂辉石等金属矿选别中常有应用。

本文对-15+4 mm 粗粒进行重介质旋流器分离白云石的工艺研究, 探索在磨矿给料端进行脉石资源化的可行性。

1 矿石性质

1.1 物质组成

矿石取自西南某铅锌矿, 该矿是热水喷流-改

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2021GDASYL-20210302004、2020GDASZH-20220101104)

作者简介: 饶金山(1988-), 男, 高级工程师, 研究方向为有色及稀土矿产资源利用。

通信作者: 陈志强, 教授级高级工程师, 电话: 020-61086391。

造成矿型矿床^[4]，成矿温度较低，矿化不均匀，采出的矿石品位差别大，这为重选预富集提供了基础。矿石的多元素分析结果见表1，矿物组成见表2。

由表1可知，主要有价金属为铅和锌，硫酸钡含量为14.21%，金银含量较低；主要的脉石元素是CaO和MgO，其次是Al₂O₃和SiO₂。

表1 矿石主要元素组成/%
Table 1 Main elements composition of the ore

Pb	Zn	S	Fe	BaSO ₄	Au*	Ag*	As	P
0.84	2.92	8.01	4.65	14.21	0.13	11.32	0.42	0.008
Cd	In	Ge	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	烧失量	
0.01	<0.001	<0.001	19.11	13.36	1.61	3.86	20.70	

*单位为g/t。

表2 某铅锌矿矿物组成
Table 2 Mineral composition of the Pb-Zn ore

矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%
闪锌矿	4.350	铁白云石	0.487	角闪石	0.022	褐铁矿	0.167	黄钾铁矾	0.047
方铅矿	0.729	方解石	0.080	电气石	0.014	萤石	0.005	其他	0.390
灰硫砷(锑)铅矿	0.066	石英	1.984	镁铝蛇纹石	0.013	金红石	0.006	合计	100.000
白铅矿	0.048	钾长石	0.014	高岭石	0.013	重晶石	16.020		
黄铁矿	10.506	钡冰长石	0.072	磷灰石	0.007	碳酸钙钡矿	0.021		
白云石	63.722	绢云母	1.205	菱铁矿(含锌)	0.011	碳酸锶矿	0.001		

由表2可见，有价矿物为闪锌矿（比重3.9）、方铅矿（比重7.5）和重晶石（比重4.3），含量分别为4.350%、0.729%和16.020%，其他的硫化物主要是黄铁矿（比重6.4），含量为10.506%；主要的脉石矿物是白云石（比重2.8）和石英（比重2.7），含量为63.772%。有价矿物与脉石矿物

的比重相差较大，这为重选分离提供了基础。

1.2 嵌布状态

原矿方铅矿和闪锌矿的嵌布状态见图1。由图1可见，矿石中方铅矿常交代闪锌矿、黄铁矿，与闪锌矿或黄铁矿形成复杂的连生关系，如图1(a)；少量方铅矿与闪锌矿、微晶黄铁矿呈点状

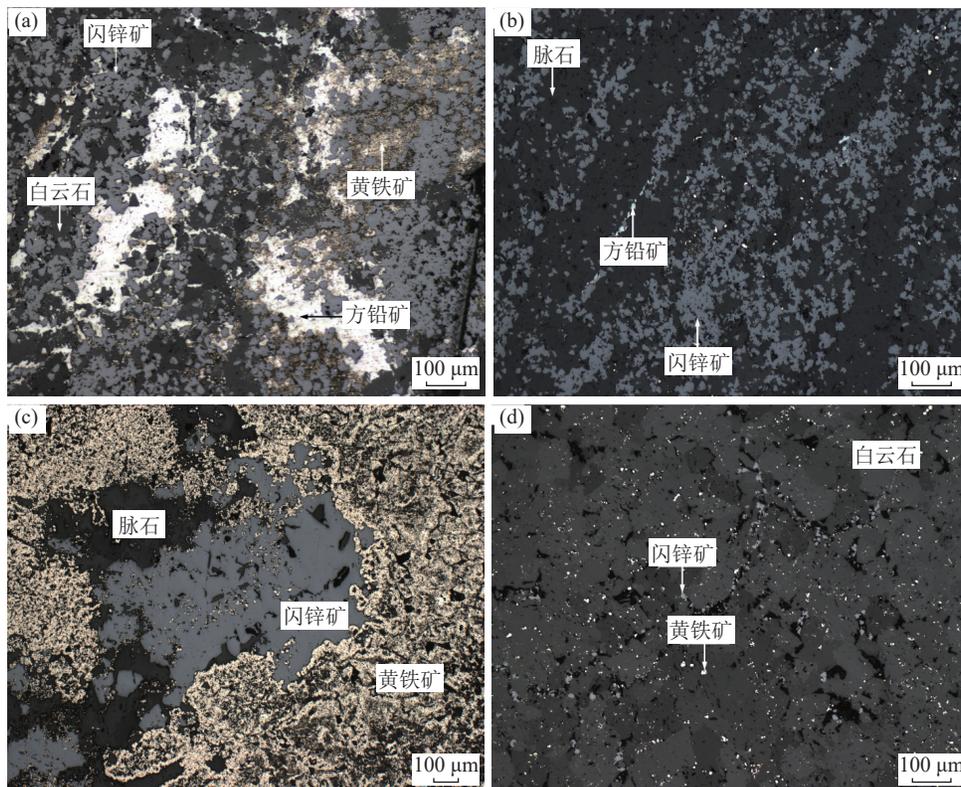


图1 铅锌矿物的嵌布状态（显微镜反射光）

Fig.1 Occurrence of galena and sphalerite (Microscope reflected light)

分布于白云石晶间隙中，如图 1(b)；闪锌矿常呈浸染状分布于脉石中，粒度大于 100 μm，可见闪锌矿包含黄铁矿和方铅矿，如图 1(c)；部分闪锌矿呈自形晶粒状或微晶集合体分布在白云石，如图 1(d)。从矿物的嵌布状态可知，方铅矿、闪锌矿和黄铁矿关系密切，倾向于共同聚集长大的规律，而少部分以微细粒包裹于脉石中，这为重选分离提供了矿物学基础。

2 实验

2.1 物料准备

将代表性矿石样品通过破碎、筛分和洗矿获得-15+4 mm 粒级，粒级占比 77.37%，该粒级作为重介质分选的给料。

2.2 设备

矿物定量设备为矿物自动分离系统 (MLA)，型号 MLA-650；研究矿物嵌布状态的设备为偏光显微镜，型号 ZEISS Axio Scope. A1。粗粒分离白云石的设备为三产品重介质旋流器，型号 WTM-250/175，一段旋流器底流口直径 70 mm，二段旋流器底流口直径 45 mm。

2.3 分选实验

浮沉实验：(1) 采用硅铁粉为加重剂，在合适容器中调节好重悬浮液的比重，并将重悬浮液搅拌均匀；(2) 给入待分选的粒级，与重悬浮液再次搅拌均匀后静置合适时间；(3) 用 0.5 mm 孔径漏勺捞出浮在重悬浮液上层的轻产品，重复搅拌-捞出轻产品，直至分选比较彻底，容器下层的为重产品；(4) 对重产品和轻产品分别进行脱介、烘干、破碎和制样后，分析铅锌元素。

重介质旋流器分选实验：(1) 调节重悬浮液比重和旋流器压力；(2) 从给料斗给入待分选的粒级，经分选后获得重产品和轻产品；(3) 对重产品和轻产品分别进行脱介、烘干、破碎和制样

后，分析铅锌元素，并对轻产品进行矿物定量分析。

3 实验结果及讨论

3.1 物料准备

将矿石破碎至-15 mm 后进行筛分，粒级的金属分配见表 3。

表 3 -15 mm 粒级金属分配
Table 3 Metal distribution of -15 mm size range

粒级/mm	产率/%	品位/%		分配率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
-2	16.04	1.02	3.02	16.88	14.56
-4+2	6.59	1.07	3.44	7.28	6.82
-15+4	77.37	0.95	3.38	75.84	78.62
合计	100.00	0.97	3.33	100.00	100.00

由表 3 可知，-15+4 mm 粒级产率 77.37%，含铅 0.95%、锌 3.38%，铅分配率 75.48%、锌分配率 78.62%。考虑脱介的可操作性，确定-15+4 mm 粒级作为浮沉实验和重介质旋流器实验的给料。

3.2 浮沉实验

按图 2 流程，研究不同重悬浮液比重中铅锌分布，结果见表 4。

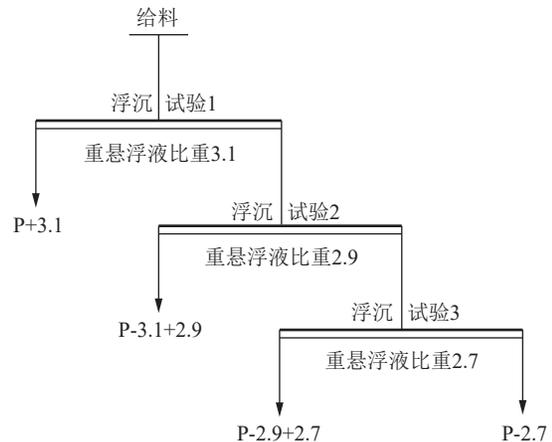


图 2 -15+4 mm 粒级浮沉实验流程
Fig.2 Sink-float test flowsheet of -15+4 mm

表 4 -15+4 mm 粒级浮沉实验结果
Table 4 Sink-float test results of -15+4 mm

产品	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Pb		Zn		Pb		Zn	
		个别	累计	个别	累计	个别	累计	个别	累计
-2.7 mm	0.98	0.094		0.34		0.11		0.10	
-2.9+2.7 mm	27.28	0.030	0.034	0.12	0.13	0.91	1.02	1.02	1.12
-3.1+2.9 mm	25.39	0.081	0.061	0.91	0.50	2.37		7.01	
+3.1 mm	23.72	2.65		9.80		72.45		70.49	
给料(-15+4 mm)	77.37	0.95		3.35		75.84		78.62	

由表4可知，比重大于2.9的产品中铅、锌回收率分别为74.82%、77.50%；比重小于2.9的产品产率为28.26%，含Pb 0.034%、Zn 0.13%，低于选厂浮选尾矿的铅锌品位（Pb 0.15%、Zn 0.35%），可预先分离。

3.3 重介质分选小型实验

3.3.1 重悬浮液比重

选择重介质旋流器压力为1.1 kg/cm²，介质流量30 m³/h，矿介比为1/6（进行了1/3~1/10矿介比实验，结果表明矿介比对分选指标影响较小，综合考虑确定矿介比为1/6），研究重悬浮液比重对白云石产率和铅锌损失率的影响，结果见图3。

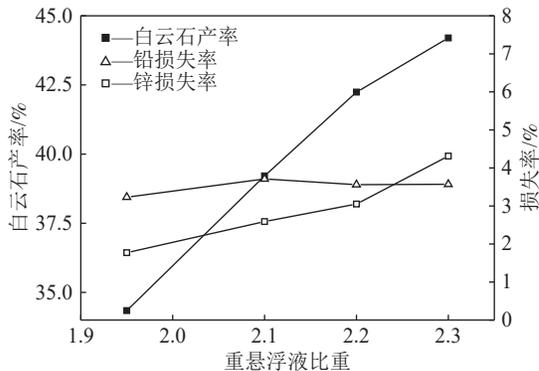


图3 重悬浮液比重对白云石产率和金属损失率的影响
Fig.3 Dolomite yield and metals loss rate as a function of suspension special gravity

由图3可知，重悬浮液比重对白云石产率影响显著，随着重悬浮液比重增大，产率升高，铅的损失率变化较小，锌的损失率增加；当比重为2.3时，锌的损失率超过4%；重悬浮液比重在1.95~2.30时，铅锌的损失率在5%以内；综合考虑白云石产率、铅锌损失率，选择重悬浮液比重为2.1。

3.3.2 旋流器压力

选择重悬浮液比重为2.1，研究旋流器压力对白云石产率和铅锌损失率的影响，结果见图4。

由图4可知，旋流器压力对白云石产率有一

定影响，随着旋流器压力增大，产率升高；在0.8~1.5 kg/cm²的压力范围内，铅锌的损失率均小于3%；旋流器压力在1.0 kg/cm²，白云石产率36.03%，铅锌的损失率较低，因此确定旋流器压力为1.0 kg/cm²。

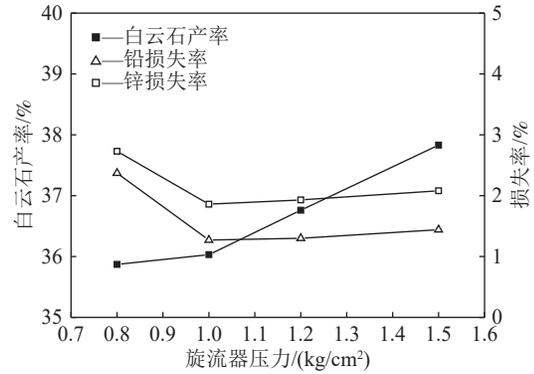


图4 旋流器压力对白云石产率和金属损失率的影响
Fig.4 Dolomite yield and metals loss rate as a function of cyclone pressure

3.4 重介质分选扩大实验

选择重介质悬浮液比重为2.1、旋流器压力为1.0 kg/cm²，进行重介质分选扩大实验，取得分选指标见表5。

表5 重介质分选扩大实验结果
Table 5 Results of scale-up test of heavy medium cyclone

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
精矿	44.67	1.61	5.68	74.38	77.02
白云石	32.70	0.043	0.16	1.46	1.60
给料	77.37	0.95	3.35	75.84	78.62

由表5可知，白云石产率32.70%，含铅0.043%、锌0.16%，铅锌损失率分别为1.46%和1.60%。

3.4.1 白云石产品分析

白云石产品的矿物定量结果见表6，矿物嵌布状态见图5。

表6 白云石产品矿物定量结果
Table 6 Mineral composition of dolomite products

矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%
白云石	92.68	黄铁矿	3.16	石英	1.17	铁白云石	1.13	重晶石	0.79
闪锌矿	0.21	角闪石	0.15	碳酸钙钡矿	0.09	方铅矿	0.04	方解石	0.03
萤石	0.02	电气石	0.01	金红石	0.01	正长石	0.01	其他	0.05
								绢云母	0.42
								钡冰长石	0.03

由表6可知，白云石产品中白云石含量达到93.81%，含黄铁矿3.16%、石英1.17%。

从图5可以看出，白云石产品中大部分为碳酸盐矿物，零星包裹黄铁矿和方铅矿，黄铁矿粒

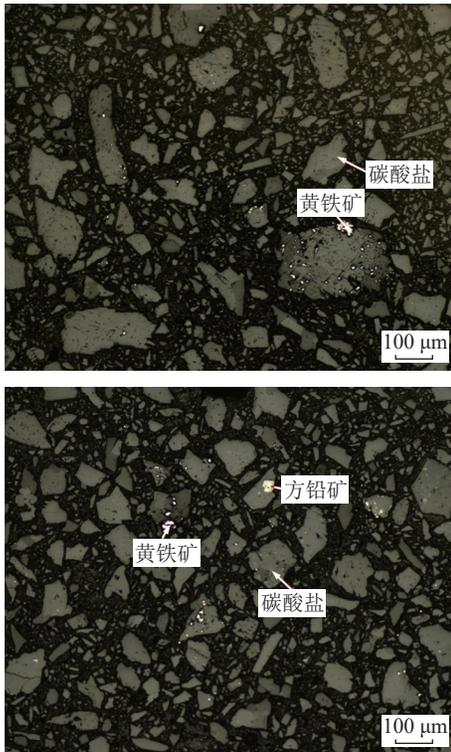


图5 白云石产品的矿物嵌布状态（显微镜反射光）
Fig.5 Minerals occurrence of dolomite product (microscope reflected light)

度约几微米至几十微米，方铅矿粒度约 30 μm。

对白云石产品进行主元素化学分析，并与耐火材料用白云石化学成分（YB/T 5278—2007）标准进行对比，结果见表 7。

表 7 白云石产品主要元素分析

Table 7 Multi-element analysis of dolomite products

元素	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄
含量/%	19.45	1.34	28.14	0.36	0.94	0.29
NBYS19A	MgO	SiO ₂	CaO			
	≥19	≤2.0	≥25			

由表 7 可知，白云石产品含 MgO 19.45%、Al₂O₃ 0.36%、Fe₂O₃ 0.94%、SiO₂ 1.34%、Mn₃O₄ 0.29% 和 CaO 28.14%，符合 NBYS19A 级耐火材料标准。

对-15+4 mm 粗粒级采用重介质旋流器可分离出对原矿产率 32.70% 的白云石产品，降低进入磨浮作业的矿量，并实现了白云石资源化，这对推进矿山的全资源化具有重要意义。

4 结 论

(1) 某铅锌矿为热水喷流-改造成矿，矿化不

均匀，闪锌矿、方铅矿、重晶石和黄铁矿等有价值矿物与白云石和石英等脉石矿物比重具有显著差异，为重选分离提供了良好基础。

(2) 对-15+4 mm 的粗粒级，在重悬浮液比重为 2.1、旋流器压力 1.0 kg/cm² 条件下，重介质旋流器可分离出产率 32.70% 的白云石产品，该产品含铅 0.043%、锌 0.16%，铅锌损失率分别为 1.46% 和 1.60%；白云石产品中白云石含量为 93.81%，符合 NBYS19A 级耐火材料标准。

(3) 通过重介质旋流器可预先分离出 32.70% 的白云石产品，这对推进矿山全资源化具有重要意义。

参考文献：

[1] 汪应玲, 罗绍华, 姜茂发, 等. 铁尾矿制备地质聚合物工艺条件研究[J]. 矿产综合利用, 2019(5):121-126.
WANG Y L, LUO S H, JIANG M F, et al. Study on process conditions for geopolymer from iron tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):121-126.

[2] 祁磊, 席欣月, 蔡鑫, 等. 北衙硫化矿选矿厂尾矿中金银铁综合回收实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(4):182-187.
QI L, XI X Y, CAI X, et al. Experimental research on comprehensive recovery of gold, silver and iron intailings of beiya sulfide ore concentrator[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):182-187.

[3] 刘俊杰, 梁钰, 曾宇, 等. 利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. 矿产综合利用, 2020(5):136-141.
LIU J J, LIANG Y, ZENG Y, et al. Preparation of baking-free bricks by iron tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5):136-141.

[4] 孙强强, 亢小红. 钙长石系尾矿微晶玻璃的制备及发光性能[J]. 矿产综合利用, 2020(4):152-155.
SUN Q Q, KANG X H. Experiment of preparing feldspar glass-ceramics and luminescence properties[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):152-155.

[5] 姚华辉, 蔡练兵, 刘维, 等. 我国金属矿山废石资源化综合利用现状与发展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6):1649-1660.
YAO H H, CAI L B, LIU W, et al. Current status and development of comprehensive utilization of waste rock in metal mines in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6):1649-1660.

[6] 李林, 姜涛, 陈超, 等. 攀西钒钛磁铁矿尾矿制备储水泡沫陶瓷的研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):7-13.

- LI L, JIANG T, CHEN C, et al. Study on preparation of water-retaining foam ceramics from vanadium-titanium magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):7-13.
- [7] 杨洁, 徐龙华, 陈洲, 等. 锂辉石浮选尾矿发泡法制备多孔陶瓷材料及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(9): 2234-2246.
- YANG J, XU L H, CHEN Z, et al. Preparation and properties of porous ceramics from spodumene flotation tailings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(9):2234-2246.
- [8] 选矿手册编委会. 选矿手册, 第三卷, 第一分册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 7.
- Mineral Processing handbook Editorial Board. Mineral Processing handbook, Volume 3(1) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 7.
- [9] 李晋明, 刘淑清. 用重介质涡流旋流器从洗研中回收硫铁矿[J]. *选煤技术*, 1985(4):12-14.
- LI J M, LIU S Q. Recovery of pyrite from washing waste with dense medium vortex cyclone[J]. *Coal Preparation Technology*, 1985(4):12-14.
- [10] 魏祥松, 黄启生, 李宇新. 宜昌花果树磷矿重介质选别工业生产实践[J]. *武汉工程大学学报*, 2011, 33(3):48-52.
- WEI X S, HUANG Q S, LI Y X. Study on dense medium separation and its' application in Huaguoshu phosphorite deposit[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2011, 33(3):48-52.
- [11] 陈岳麓, 罗新民. 潘家冲铅锌矿重介质旋流器选矿工艺研究[J]. *湖南有色金属*, 1988(4):26-31
- CHEN Y L, LUO X M. Research on beneficiation technology of dense medium cyclone of the lead-zinc ore in Paijiachong[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 1988(4):26-31.
- [12] 周峰, 余浔. 哈萨克斯坦某钨矿预选抛尾工艺设计研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(6):43-49.
- ZHOU F, YU X. Research on pre-discarding tailings process for a certain tungsten polymetallic ore in Kazakhstan[J]. *Non-ferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2019(6):43-49.
- [13] 郭振勋, 孙赛龙. 硫化锑矿石重介质选矿[J]. *湖南有色金属*, 1990, 6(2):21-26
- GUO Z X, SUN S L. Heavy medium beneficiation on antimony sulfide[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 1990, 6(2):21-26.
- [14] 牛佳, 郑义, 周永章, 等. 桂中盘龙铅锌矿流体包裹体特征及其对软杭成矿带热水喷流-改造成矿作用的指示[J]. *岩石学报*, 2017, 33(3): 753-766.
- NIU J, ZHENG Y, ZHOU Y Z, et al. A fluid inclusions study of the Panlong lead-zinc deposit and its implication for genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 753-766.

Separation of Dolomite from a Lead-zinc Sulfide by Dense Medium

RAO Jinshan^{1,2}, CHEN Zhiqiang^{1,2}, HU Hongxi^{1,2}, LIU Chao^{1,2}, QIU Xianyang^{1,2}, GUAN Zegao^{1,2}
(1.Guangdong Institute of Resource Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, Guangdong, China;
2.State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: A lead-zinc sulfide is a reworked SEDEX deposit, in which the main gangue mineral is dolomite. About 40%~50% yield of flotation tailing was need to be stockpiled in tailing pond. Due to the inability to expand tailings ponds or build new one, mine production was facing difficulties, so the strategy of full resource utilization was proposed. In this study, the -15+4 mm coarse-grained fraction of the grinding feed was subjected to a dense medium cyclone to separate dolomite. The dolomite product yield was 32.70% and contained 0.043% Pb and 0.16% Zn at the conditions that the specific gravity of the suspension was 2.1 and the pressure of the cyclone was 1.0 kg/cm². The loss rate of lead and zinc was 1.46% and 1.60% respectively. The dolomite product met the dolomite of NBYS19A grade refractory material by chemical analysis. The dolomite product was separated from -15+4 mm particles through the dense medium cyclone, and its resource utilization had been realized, which can reduce 32.70% feed entering the grinding and floatation operation, and can reduce the cost of grinding and floatation. It is of great significance to promote the full resource development of the mine.

Keywords: Lead-zinc sulfide ore; Dolomite; Reworked SEDEX deposit; Dense medium cyclone