

纳米陶瓷球在普朗铜矿立式球磨机中的应用研究

郇超¹, 周浩¹, 龚丽¹, 曾剑武²

- 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 香格里拉 674400;
- 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD453 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)01-0023-05
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.08.018

摘要 迪庆有色普朗铜矿选矿厂采用立式球磨机进行粗精矿再磨, 磨矿过程中存在钢球介质失圆率和负荷高、磨矿细度差、衬板使用周期短等问题。为了探索提高该立式球磨机磨矿效率的技术途径, 对比研究了纳米陶瓷球和钢球的磨矿效果。结果表明, 与钢球相比, 采用纳米陶瓷球作为磨矿介质后, 立磨机的磨矿效果得到明显提升, 即磨矿产品-0.049 mm 粒级的含量提升了近 8 个百分点; 同时, 显著降低了磨矿成本, 即磨矿介质消耗降低了 82.32%, 衬板使用成本降低了 63.83%, 能耗降低了 25.71%。由此可知, 采用纳米陶瓷球替代钢球, 能有效提高普朗铜矿选矿厂粗精矿再磨的磨矿效率。

关键词 立磨机; 磨矿介质; 陶瓷球; 衬板

引言

磨矿是借助介质与矿石之间的相互碰撞冲击和磨剥, 使矿石粒度减小并使目的矿物实现单体解离的作业, 是矿物分选的关键环节^[1-2]。目前, 球磨机是矿石细磨的主要设备, 其具有破碎比大、粉碎效果好、适用性强等优点^[3-4]。但是, 球磨机主要是依靠磨矿介质的冲击碰撞来研磨矿物, 碰撞研磨效率低, 只有部分能量用于矿石的破碎、研磨^[5]。因此, 球磨机普遍存在磨矿效率低、能量消耗量大、衬板磨损大等问题, 并且对矿石的超细磨效果差^[6]。搅拌磨机是通过研磨摩擦来进行磨矿的设备, 具有能量消耗低、磨矿效率高、产品粒度分布范围窄等优点, 属于高效超细磨设备^[7-8]。选矿厂中细磨作业中能耗高、球耗高, 因此越来越多的选矿厂中细磨工段采用搅拌磨机。

目前, 搅拌磨机采用的磨矿介质有钢球、铸铁球和陶瓷球, 其中钢球是应用最广泛的磨矿介质^[9-10]。但是, 在实际磨矿生产中, 钢球存在失圆率高、比重大, 同时磨机磨矿效果差和衬板使用寿命短的现状, 并且在超细磨中容易造成目的矿物过磨, 这极大限制了其在搅拌磨机中的应用^[11]。纳米陶瓷球是由氧化铝、氧化锆或者硼化硅等耐磨性材料制成, 具有比重小、重量轻、耐热性好、耐磨性好、耐酸碱性好等优点, 因此

采用新型纳米陶瓷球是一种很好的技术途径, 这也得到了众多科技工作者的关注^[12]。例如, 景德镇百特威尔新材料有限公司通过高温煅烧, 并添加氧化物和稀土材料, 研制了一种耐磨的亚纳米陶瓷球, 显著改善了其材质的均一性和耐磨性^[13]。章恒兴等通过对上述亚纳米陶瓷球的耐磨性测试发现, 其耐磨性明显高于钢球, 并且在相同磨矿效率下, 其球耗降低 84% 以上^[14]。吴志强等通过对比纳米陶瓷球和钢球的磨矿效率发现, 纳米陶瓷球获得的磨矿产品的粒度分布规律与钢球相似, 但纳米陶瓷球对能量的利用率更高, 磨矿产品中过粉碎更轻, 超细磨效果更好^[15]。

迪庆有色普朗铜矿选矿厂采用 CSM-850 立式球磨机进行粗精矿再磨, 这对提高含铜矿物的解离并减少过磨现象有积极意义, 并能显著提升后续浮选铜(精矿)回收率和铜品位。但是, 在生产应用初期, 该立磨机采用钢球作为磨矿介质, 磨矿细度一直未达到设计值(-0.049 mm 大于 86%)的要求。因此, 寻找新的磨矿介质替代钢球, 对提高磨矿效率和降低磨矿成本具有重要意义。

本文即针对这一问题, 对比研究了普朗铜矿粗精矿再磨磨机中采用纳米陶瓷球与钢球两种磨矿介质的磨矿效果, 探索提高磨矿效率和降低磨矿成本的技术途径。

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 云南省基础研究计划项目(202201AU070139); 云南省高层次人才引进计划项目(CCC2132005A)

作者简介: 郇超(1988—), 男, 湖南邵阳人, 选矿工程师, 主要从事选矿工艺流程现场管理, E-mail: lchao88725@163.com。

通信作者: 曾剑武(1990—), 男, 江西赣州人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事高梯度磁选理论与技术研究, E-mail: jianwuzeng@163.com。

1 生产现状

1.1 生产工艺流程简介

迪庆有色普朗铜矿选矿厂采用 SABC+混合浮选的生产流程; SABC 工艺为半自磨机+球磨机+顽石破碎机碎磨流程; 混合浮选工艺为一次粗选—粗精矿再磨—三次扫选—两次精选流程。

其中, 粗精矿再磨是为了使目的矿物得到进一步解离, 进而提升混合精矿品位, 以保证混合浮选指标; 浮选粗精矿的再磨即是采用 CSM-850 立磨机。

1.2 原钢球介质生产现状

CSM-850 立磨机的有效容积为 45.4 m³, 生产初期, 该立磨机采用 $\Phi 25$ mm 钢球作为磨矿介质。为保证立磨机的磨矿效率, 立磨机的初装球量为 75 t, 初装钢球充填率为 34%, 钢球补加量 1 t/d, 针对磨矿量的钢球单耗为 42.56 g/t; 磨机运转电流约 42 A; 螺旋衬板使用周期约 6 个月, 每个周期更换的螺旋衬板数量为 4~6 块。

使用原钢球介质时, 立磨机二段再磨的磨矿细度约为-300 目占 84%, 略低于工艺技术参数要求。此外, 在钢球作为磨矿介质的实际生产中还存在以下弊端: (1) 钢球易变形失圆, 而失圆后的钢球容易在筒体底部堆积板结, 降低磨机筒体的有效容积; (2) 钢球表面容易形成“凹”区域, 进而产生无效研磨, 降低磨矿效率, 如图 1 所示。

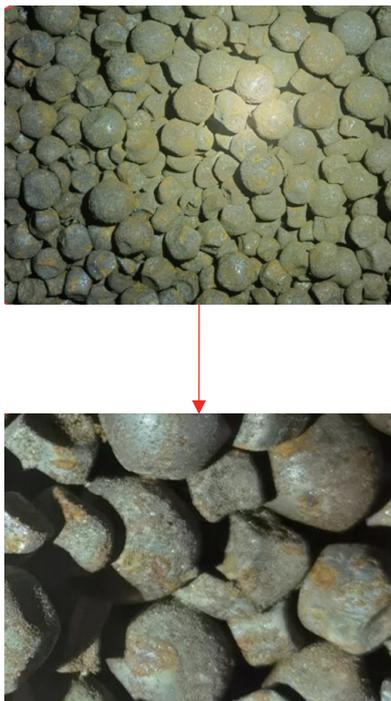


图 1 立磨机中钢球失圆率和变形变化情况
Fig. 1 Ball wear rate and deformation changes in the vertical mill

2 结果与讨论

2.1 纳米陶瓷球现场使用总体情况

为了提高磨矿效率和降低磨矿成本, 普朗铜矿选矿厂在粗精矿再磨中, 采用纳米陶瓷球替代钢球作为磨矿介质进行技术改造。陶瓷球初装填充量由 30% 提高至 34%, 算装球量为 39 t, 初装球配比为 $m(\Phi 10 \text{ mm}) : m(\Phi 15 \text{ mm}) : m(\Phi 20 \text{ mm}) = 3 : 4 : 3$, 即 $\Phi 10$ mm 陶瓷球 12 t, $\Phi 15$ mm 陶瓷球 15 t, $\Phi 20$ mm 陶瓷球 12 t。

2.2 对磨矿产品质量浓度和细度的影响

磨矿产品浓度细度是衡量磨矿效率的重要指标, 因此首先对采用陶瓷球后磨矿产品的旋流器溢流浓度细度, 与采用钢球时的磨矿产品进行对比分析, 结果如表 1 所示。

由对比分析结果可知, 使用陶瓷球和钢球介质时, 再磨溢流浓度相近, 都在技术要求范围内(17%~24%)。但是, 使用钢球作为磨矿介质时, 磨矿产品的浓度在 17.27%~23.62% 之间波动, 波动幅度较大。而在使用陶瓷球作为磨矿介质后, 磨矿产品的浓度稳定在 20% 左右, 这有利于后续精选作业的技术参数调控和操作。

另一方面, 使用陶瓷球替换钢球后, 磨矿产品的细度得到较明显提升, 显著提高了磨矿效率。

表 1 不同磨矿介质下溢流质量浓度和细度数据对比
Table 1 Comparison table of overflow concentration and fineness data under different grinding media

磨矿介质	质量浓度 /%	溢流细度 (-0.049 mm 含量) /%	台效 / (t·h ⁻¹)
钢球	17.27	85.42	923
	20.17	85.47	923
	23.62	85.96	861
	19.21	86.41	915
平均值	20.07	85.81	905.5
陶瓷球	20.05	86.33	904
	21.03	86.55	871
	19.35	88.44	832
	20.12	88.64	886
	平均值	20.14	87.49

2.3 对磨矿效率的影响

磨矿产品粒度分布和磨矿选择性是衡量磨矿效果的重要参数。分别对采用钢球介质和陶瓷球介质后的磨矿产品进行粒度分析, 结果见表 2。需说明的是, 上述关于磨矿产品浓度与细度研究中提到的

表 2 不同磨矿介质下磨矿效果对比

Table 2 Comparison table of grinding effects under different grinding media

磨矿介质	名称	质量浓度/%	+0.074 mm含量/%	-0.074+0.049 mm含量/%	-0.049+0.038 mm含量/%	-0.038 mm含量/%
钢球	给料	63.55	27.34	19.52	16.97	36.17
	排料	61.97	19.16	19.31	18.69	42.85
	粒级新生率	/	-8.18	-0.21	1.72	6.68
	累计新生率	/	/	8.19	8.40	6.68
陶瓷球	给料	60.49	26.38	19.83	16.49	37.3
	排料	59.94	14.11	15.32	17.36	53.31
	粒级新生率	/	-12.27	-4.51	0.87	16.01
	累计新生率	/	/	12.37	16.88	16.01

“-0.049 mm 含量”,是指旋流器溢流产品的粒度分布情况;而本项研究中所指的磨矿细度,则指立式球磨机排矿口直接排出的磨矿产品的粒度大小。

从表 2 结果可知,在采用陶瓷球作为磨矿介质后,磨矿产品中+300 目细粒级含量明显降低。即在采用陶瓷球作为磨矿介质后,磨矿产品中-300 目细粒级的含量和新生率明显提高,其中-300 目粒级的含量提升了近 8 个百分点;尤其是磨矿产品中-400 目细粒级的含量提升了近 10 个百分点,效果显著。由此可知,采用陶瓷球作为磨矿介质,可有效提高磨矿效率。

2.4 对磨矿介质消耗的影响

实际生产中,结合给料及产品粒度分布情况,优化补加球直径及补加球量,最终确定的陶瓷球补加量为 150 kg/d,补加的陶瓷球直径为 $\Phi 20$ mm,补加球情况详见表 3。

由表 3 可知,采用陶瓷球替代钢球作为磨矿介质后,磨矿介质的日补加量明显降低,这说明采用陶瓷球能够显著降低磨矿介质的消耗。例如,陶瓷球的单耗为 7.91 g/t,而钢球的单耗为 42.79 g/t;采用陶瓷球作为磨矿介质后,磨矿介质的单耗下降了 34.88 g/t,降幅达 82.32%。

此外,通过观察立磨机筒体内磨矿介质形状可看出,陶瓷球的失圆率得到有效控制,基本不存在失圆球,如图 2 所示。这说明,陶瓷球的使用能够显著降低磨矿介质的磨损和消耗。



表 3 不同磨矿介质用量对比结果。

Table 3 Comparison results of different grinding media used

周期	磨矿介质	介质补加量/t	介质单耗/(g·t ⁻¹)
2023年3—6月	钢球	102	42.79
2023年7—12月	陶瓷球	19.95	7.91

2.5 对能耗降低的影响

在保证磨矿效率的前提下,使用陶瓷球作为磨矿介质时,立磨机的正常运转电流为 31 A,设备运转电流降低明显,用电详情见表 4。从表 4 可知,采用陶瓷球作为磨矿介质后,立磨机的运转电流由采用钢球介质的 42 A 显著下降至 31 A,用电单耗由 0.69 kW·h/t 降低至 0.52 kW·h/t,下降比例约 25.71%。这说明采用陶瓷球,能够大幅降低磨矿能耗。

2.6 对螺旋衬板使用周期的影响

磨矿衬板的磨损和消耗也是较大的磨矿成本,因此对使用陶瓷球作为磨矿介质时的螺旋衬板更换频率,与使用钢球作为磨矿介质时的更换频率进行对比分析,结果见表 5。

由表 5 可知,使用陶瓷球作为磨矿介质后,衬板的使用周期明显延长,衬板更换成本显著降低。具体来讲,采用钢球作为磨矿介质时的衬板使用周期为 6 个月,而采用陶瓷球作为磨矿介质时的衬板使用周期为 8 个月,衬板使用周期延长 2 个月。此外,使用钢球作为磨矿介质时的衬板使用成本为 0.094 元/t,而



图 2 使用一个周期后钢球和陶瓷球形状对比(左—钢球,右—陶瓷球)

Fig. 2 Comparison for the shapes of steel balls and ceramic balls after one cycle of use (Left—steel balls, Right—ceramic balls)

表 4 采用钢球和陶瓷球的磨机电耗对比结果

Table 4 Comparison results of mill power consumption between using steel balls and ceramic balls

磨矿介质	运转电流/A	用电单耗/(kW·h·t ⁻¹)
钢球	42	0.69
陶瓷球	31	0.52

表 5 衬板使用详情

Table 5 Liner usage details table

磨矿介质	更换衬板数量/块	衬板更换金额/万元	衬板使用周期/月	累计处理矿量/万t	单位成本元/t
钢球	4	32.88	6	349.96	0.094
陶瓷球	2	16.44	8	486.26	0.034

使用陶瓷球作为磨矿介质后的衬板使用成本为 0.034 元/t, 成本使用成本明显降低。

另一方面, 在使用钢球作为磨矿介质时, 每次更换衬板时需要更换 4 块衬板以上才能保证磨矿效率; 而在使用陶瓷球作为磨矿介质时, 只需每次更换 2 块衬板。这也说明了采用陶瓷球作为磨矿介质后, 螺旋衬板的更换成本明显降低。

3 结论

(1) 针对普朗铜矿选矿厂二段再磨作业, 采用陶瓷球作为磨矿介质后, 立磨机的磨矿效率明显高于采用钢球作为磨矿介质时的磨矿效率, 即磨矿产品 -0.049 mm 粒级的含量提升了近 8 个百分点。

(2) 采用陶瓷球作为磨矿介质, 能够显著降低普朗铜矿选矿厂二段再磨的磨矿介质消耗、衬板消耗和能耗; 磨矿介质消耗降低了 82.32%, 衬板使用成本降低了 63.83%, 能耗降低了 25.71%。这说明采用陶瓷球作为磨矿介质, 能有效降低磨矿成本。

参考文献:

[1] 段希祥, 肖庆飞. 碎矿与磨矿[M]. 第 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
DUAN X X, XIAO Q F. Ore crushing and grinding[M]. 3rd edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

[2] 赖春山. 降低碎矿粒度与磨矿节能降耗[J]. 有色金属(选矿部分), 2005(1): 31-32.
LAI C S. Reducing ore crushing particle size for energy conservation and consumption reduction in grinding[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2005(1): 31-32.

[3] 李同清. 球磨机磨矿介质动力学行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
LI T Q. Study on the dynamic behavior of ore grinding media in ball mills [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[4] ROSENKRANZ S, BREITUNG F S, KWADE A. Experimental

investigations and modeling of the ball motion in planetary ball mills[J]. Powder Technology, 2011, 212(1): 224-230.

[5] FURSTENAU D W, ABOUZEID A Z W. The energy efficiency of ball milling in comminution[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 67(1/2/3/4): 161-185.

[6] 王宏勋. 降低破碎与磨矿能量消耗的途径[J]. 金属矿山, 1983(8): 27-31.
WANG H X. Approaches to reducing energy consumption in crushing and grinding processes[J]. Metal Mines, 1983(8): 27-31.

[7] 张国旺, 黄圣生. 高效超细搅拌磨机的设计和应用[J]. 矿冶工程, 2002, 22(3): 45-47.
ZHANG G W, HUANG S S. Design and application of an efficient ultra-fine stirred Mill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(3): 45-47.

[8] 吴任欧. 立式搅拌磨机的研究与应用进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(10): 79-81.
WU R O. Research and application progress of vertical stirred mills[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(10): 79-81.

[9] 凌永发, 段希祥. 细磨介质形状的选择及应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2001(6): 41-44+35.
LING Y F, DUAN X X. Selection and application research of fine grinding media shapes[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2001(6): 41-44+35.

[10] 杨有洪, 徐胜旗, 申滔. 新型磨矿介质在立式螺旋搅拌磨机的应用实践与改进[J]. 机械加工与制造, 2019(8): 27-29.
YANG Y H, XU S Q, SHEN T. Application practice and improvement of new grinding media in vertical spiral stirred mills[J]. Mechanical Processing and Manufacturing, 2019(8): 27-29.

[11] 姚伟, 白晓卿, 侯四海. 纳米陶瓷球在 VTM-300 立磨机中的应用试验研究[J]. 中国钨业, 2020(12): 46-49.
YAO W, BAI X Q, HOU S H. Experimental study on the application of nano-ceramic balls in VTM-300 vertical mill[J]. China Molybdenum Industry, 2020(12): 46-49.

[12] 廖宁宁. 纳米陶瓷球在立式磨机中的磨矿性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019: 47-58.
LIAO N N. Study on the grinding performance of nano-ceramic balls in vertical mills[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019: 47-58.

[13] 周洪林. 纳米陶瓷球在金属矿细磨中的应用及前景[J]. 现代矿业, 2022, 639(7): 192-196+200.
ZHOU H L. Application and prospect of nano-ceramic balls in fine grinding of metal ores[J]. Modern Mining, 2022, 639(7): 192-196+200.

[14] 章恒兴, 郑萍, 凌佩红, 等. 纳米陶瓷球的耐磨性能研究[J]. 中国钨业, 2022, 37(5): 113-17.
ZHANG H X, ZHENG P, LING P H, et al. Research on the wear resistance of nano-ceramic balls[J]. China Tcmgsten Industry, 2022, 37(5): 113-17.

[15] 吴志强, 方鑫, 童佳琪, 等. 纳米陶瓷球作细磨介质下的磨矿能耗与粒度分布特征[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(5): 91-96.
WU Z Q, FANG X, TONG J Q, et al. Characteristics of grinding energy consumption and particle size distribution using nano-ceramic balls as fine grinding media[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(5): 91-96.

Application Study of Nano-ceramic Balls in the Vertical Ball Mill of Pulang Copper Mine

LI Chao¹, ZHOU Hao¹, GONG Li¹, ZENG Jianwu²

1. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd, Shangri-La 674400, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

Abstract: The Pulang Copper Mine uses vertical ball mills to regrind coarse concentrates, which encounters problems such as high loss of roundness and overloading of steel balls, poor grinding fineness, and short service life of liners. To improve the grinding efficiency of this vertical ball mill, the grinding effects of nanoceramic balls and steel balls were compared in this investigation. The results show that the grinding performance of the vertical mill is significantly improved after adopting nanoceramic balls as the grinding media, with the content of -0.049 mm particle size in the ground product increasing by nearly 8 percentage points. Moreover, the grinding costs are significantly reduced after adopting nanoceramic balls as the grinding media. Specifically, the consumption of grinding media is decreased by 82.32%, the cost of liner usage is reduced by 63.83%, and energy consumption is reduced by 25.71%. Therefore, replacing steel balls with nanoceramic balls could effectively enhance the grinding efficiency in the Pulang Copper Mine Concentrator.

Keywords: vertical mill; grinding media; ceramic ball; liner

引用格式: 郦超, 周浩, 龚丽, 曾剑武. 纳米陶瓷球在普朗铜矿立式球磨机中的应用研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(1): 23-27.

LI Chao, ZHOU Hao, GONG Li, ZENG Jianwu. Application study of nano-ceramic balls in the vertical ball mill of Pulang Copper Mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(1): 23-27.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn