

选矿工艺

某铜选矿厂高压辊闭路湿式筛分工艺 应用实践

The Application of HPGR Closed Circuit Wet Screening Process in a Copper Beneficiation

刘兆瑞¹, 张 慧², 何荣权¹, 李松平²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 中冶集团资源开发有限公司, 北京 100028)

摘要:为了检验高压辊闭路湿式筛分工艺运用效果,为类似铜选矿厂提供有价值的工业运用数据,本文对某铜选矿厂高压辊闭路湿式工艺应用情况进行系统研究和分析。高压辊闭路湿式筛分工艺的工业实践证明,与处理同样矿石的三段一闭路工艺相比,显著提高细粒级含量, -3 mm 增加 24.90%;降低单位能耗,月单位能耗降低 $2.28\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}_{\text{原矿}}$,总功耗下降约 10.5%;降低材料消耗,钢球消耗减少 15.8%;提高浮选回收率,Cu 回收率提高 0.5%;但高压辊辊钉寿命相对较低,约 6 500 h。

关键词:高压辊磨机; 闭路湿式筛分; 电耗; 钢耗; 回收率

中图分类号: TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0089-06

Abstract: In order to evaluate the application effectiveness of HPGR wet screening closed-circuit process and provide valuable industrial application data for similar copper beneficiation, this paper systematically studies and analyzes the application of HPGR closed-circuit wet screening process in a copper beneficiation. The industrial practice of High-Pressure Grinding Roll (HPGR) closed-circuit wet screening process has proved that compared with the three-stage one closed-circuit process for treating the same ore, the fine particles are significantly increased, the particles below 3 mm are increased by 24.90%; the unit energy consumption is reduced by $2.28\text{ kW}\cdot\text{h}$ per ton of ROM, and the total power consumption is reduced by 10.5%. The reduce of materials consumption is remarkable. The steel ball consumption is reduced by 15.8%. The flotation recovery is increased by 0.5%; However, the service life of the HPGR studs was relatively low, about 6 500 h.

Key words: HPGR; wet screening closed-circuit process; energy consumption; steel ball consumption; recovery rate

1 前言

高压辊磨机起源于 20 世纪 80 年代,由德国克虿伯公司首次开发并应用于水泥行业的物料粉碎,其核心优势在于通过层压粉碎原理实现高效节能的破碎效果。由于受设备结构、材质等技术发展水平的限制,高压辊磨机初始的应用仅限于破碎磨蚀性较低的水泥工业原料、脆性物料,如石灰石、煤、钨矿石等。随着技术进步,该工艺逐步推广至矿业领域,初期主要应用于铁矿的细碎与预处理,显著降低了能耗并提高了矿物解离度。进入 21 世纪以来,随着对能源需求的重视、高压辊磨机应用技术的成熟和

其特有的节能特点,高压辊磨机在硬岩金属矿山的应用受到越来越多的重视^[1],成为新的“多碎少磨”流程的核心设备。

在国内,高压辊磨工艺的推广得益于大型矿山企业的技术创新。例如,紫金矿业、江铜集团等企业率先在铜矿选厂引入高压辊磨设备,用于替代传统破碎流程,有效解决了硬岩矿石粉碎效率低、能耗高的问题。在工艺路径上,国内应用经历了从第四段开路、第三段开路的粗放式流程,逐步升级为高压辊作为第四段超细碎作业,闭路干式筛分的改进模式。但干式筛分仍面临粉尘污染、筛网堵塞及粉矿仓下矿困难的挑战。随着高压辊辊套寿命的延长,设备

[作者简介] 刘兆瑞(1988—),男,工程师,主要从事矿山工程咨询与设计研究工作。

[引用格式] 刘兆瑞,张慧,何荣权,等. 某铜选矿厂高压辊闭路湿式筛分工艺应用实践[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):89-94.

作业率逐步上升,部分选矿厂进一步优化为第四段湿式闭路筛分工艺,高压辊和球磨机采用同一作业率,成为当前技术发展的主流方向^[2-6]。

本文系统的介绍了某露天铜矿高压辊湿式闭路筛分的运用情况,为类似选矿厂生产实践提供参考。

2 高压辊磨湿式闭路工艺

国外某大型铜选矿厂有两条生产线,一条生产规模 425 万 t/年,建成于 20 世纪 90 年代,碎磨工艺为常规三段一闭路;另一条生产 330 万 t/年,建成于 2024 年,碎磨工艺采用高压辊磨作为第四段破碎新工艺。高压辊磨闭路湿式筛分工艺为粗碎 + 中碎 + 细碎 + 25 mm 闭路筛分 + 第四段高压辊超细碎 + 3 mm 闭路湿式筛分,工艺流程如图 1 所示。

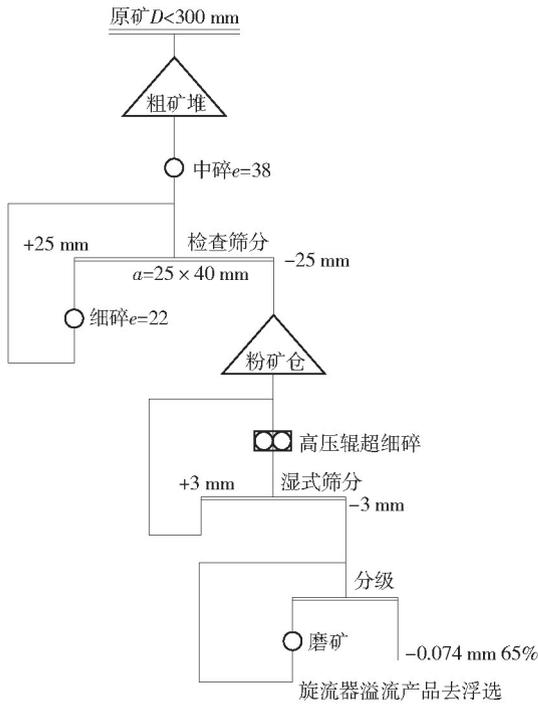


图 1 高压辊闭路湿式筛分工艺流程图

露天采场采出矿石经汽车运输至露天采矿场附近粗碎站进行粗碎,粗碎产品粒度 - 300 mm,再经带式输送机输送至至粗矿堆。粗矿堆底设置 3 台 1 250 mm × 4 500 mm 重型板式给矿机(2 用 1 备),矿石经重型板式给料机和带式输送机输送至 1 台 CH550 圆锥破碎机进行中碎,中碎破碎产品给人双层香蕉型振动筛进行筛分。筛上产品(+ 25 mm)给人 1 台 630 kW 圆锥破碎机进行细碎,细碎产品与中碎产品合并返回双层香蕉型振动筛进行筛分。筛下产品进入细矿仓,再经过细矿仓下给矿设备和带式输送机向高压辊磨机湿式闭路作业供矿。高压辊磨

湿式闭路作业由 1 台 $\phi 1.7\text{ m} \times 1.4\text{ m}$ 高压辊磨机和 2 台 $3.6\text{ m} \times 8.5\text{ m}$ 双层直线振动筛构成。直线振动筛筛上产品(+ 3 mm)经细矿仓底部带式输送机返回高压辊磨机,筛下产品(- 3 mm)自流至一段磨矿回路泵池。磨矿回路由 1 台 $\phi 5.5\text{ m} \times 8.5\text{ m}$ 溢流型球磨机和 1 组 $10\phi 660\text{ mm}$ 水力旋流器构成,磨矿系统最终产品细度为 - 0.074 mm 65%,自流进入后续浮选作业选别。高压辊湿式闭路作业制度与球磨机一致均为 24 h。

3 应用效果

3.1 产品粒度

根据生产、调试经验,高压辊磨机高效稳定的运行核心在于三个方面:充足的给矿,稳定的高压及合理的阀门开度。高压辊磨机需保证足够的矿石通过量才能保证辊缝被充分撑开,实现良好的挤压效果。现场通过调整湿筛筛孔尺寸分布(下层筛板筛孔尺寸占比:6 mm 占 30.76%、4 mm 占 41.54%、3 mm 占 27.69%)来控制循环量,使总通过量满足高压辊磨机的要求。

在稳定生产时,经测定,筛分效率为 89.21%。破碎系统最终产品(即高压辊新给矿)的 $P_{80} = 12.16\text{ mm}$;高压辊磨机排矿产品 - 3 mm 粒级产率约为 46.8% ~ 52%,低于设计值 56%。经高压辊磨机超细碎后, - 3 mm 粒级产品平均新增 24.55%。相关粒度曲线如图 2 至图 4 所示。

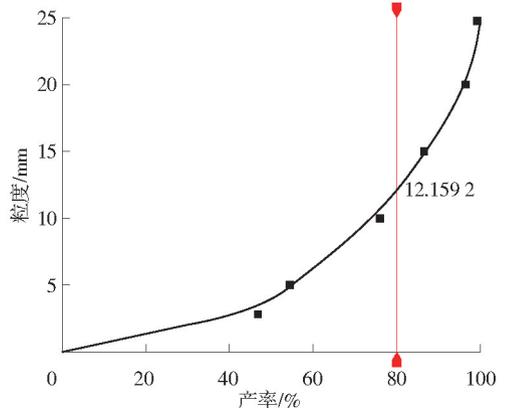


图 2 高压辊排矿产品粒度曲线

3.2 运行能耗及材料消耗

常规碎磨入磨粒度 $P_{80} = 8.5\text{ mm}$,高压辊闭路湿式筛分生产实际入磨粒度 $P_{80} = 2.5\text{ mm}$,入磨粒度的降低减少了钢球消耗和衬板消耗。生产实践数据对比表明,常规碎磨一段球磨钢耗 $0.95\text{ kg/t}_{\text{原矿}}$,

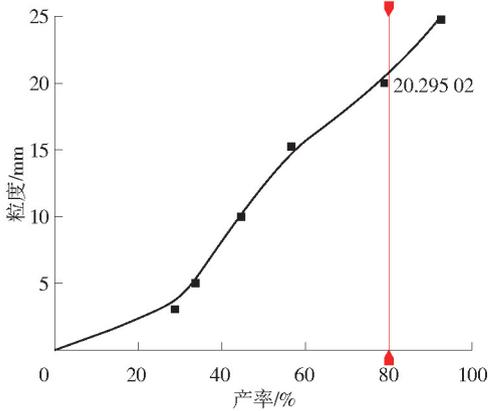


图3 高压辊系统新给矿粒度曲线

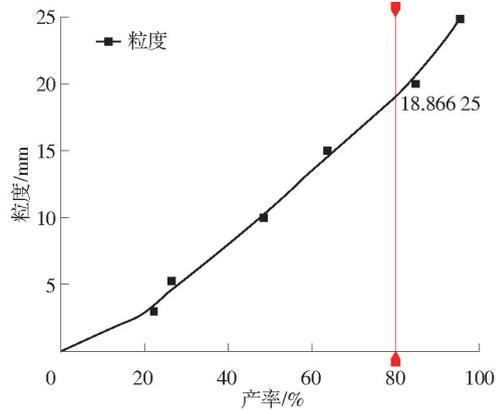


图4 高压辊混合给矿(新给矿+循环料)粒度曲线

高压辊磨闭路湿式筛分一段球磨钢耗 0.80 kg/t_{原矿}, 平均减少 15.8%, 初步估算每年节成本约 300 万元。

大量文献报告显示,高压辊磨机在铁矿生产应用中辊套使用寿命大多超过 12 000 h,个别达到 20 000 h。本铜矿山矿石中石英含量高达 41.74%,磨蚀性远高于铁矿石。辊套设计使用寿命为 10 000 h,但实际生产仅达到约 6 500 h。辊套磨损后,其排矿粒度变粗,系统循环量由 120% 增大到 150%,导致球磨机处理能力下降,选厂单位能耗显

著上升。常规流程与高压辊闭路湿筛流程的生产供电数据见表 1 和图 5。由表 1 和图 5 可知,1 月至 7 月高压辊柱钉完好(无破碎和脱落),高压辊闭路湿筛工艺月平均单位能耗为 21.80 kW·h/t_{原矿},比常规流程的 24.08 kW·h/t_{原矿} 低 2.28 kW·h/t_{原矿}。按照当地重油发电 0.9 元/(kW·h) 电价估算,1 月至 7 月期间可节省生产成本 389 万元。8 月份以后,因物流原因未能及时更换高压辊磨辊套,导致柱钉大面积脱落。最终 8 月至 11 月平均单位能耗增至 27.90 kW·h/t_{原矿},显著高于常规流程。

表 1 常规流程与高压辊闭路湿式筛分流程用电对比表

流程	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
高压辊闭路湿筛	23.69	23.98	22.45	20.85	23.64	18.07	19.9	23.56	25.76	30.58	32.39
常规流程	23.67	24.93	23.51	23.46	23.67	24.61	24.71	22.17	21.44	21.25	22.27

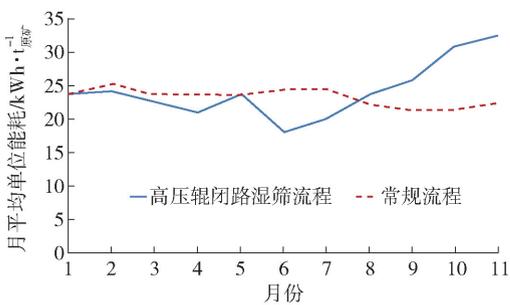


图5 常规流程与高压辊闭路湿式筛分流程用电趋势图

提升,减少了浮选过程中的夹带损失^[9]。王中才等研究表明,大冶铁矿的高压辊磨产品因解离度提高,浮选时精矿品位更稳定^[10]。

高压辊磨闭路湿式筛分工艺投入运行后,在入选原矿品位、磨矿产品细度、浮选流程一致情况下,对比常规流程。两个流程浮选指标见表 2 和图 6。由表 2 和图 6 可知,高压辊磨闭路湿式筛分 1 月至 8 月 Cu 平均回收率达 89.97% 比常规碎磨流程回收率 89.38% 高 0.5%;Cu 精矿品位分别为 23.87% 和 23.76%,基本相当。

3.3 对选别指标影响

研究文献表明,高压辊磨具有“选择性粉碎”特性,可使有用矿物与脉石的矿物破碎时沿着解离面解离,更有利于后续选别^[7-8]。印万忠等研究表明,西藏邦铺钼铜矿石经高压辊磨后,SEM 和 EDS 分析显示,钼、铜矿物与脉石的界面更清晰,单体解离度

3.4 柱钉辊面磨损分析

由于柱钉使用的材质一般为钨钴类硬质合金,原材料价格较为昂贵,一旦辊面整体损坏,对选厂造成较大损失,因此柱钉辊面的维保技术研究显得极其重要。该选矿厂高压辊磨机采用柱钉辊面,相比市场上的堆焊辊面和复合辊面寿命更长,可减少现

表2 两个流程月选矿指标对比表

流程	指标/%	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
高压辊闭路湿筛流程	品位/%	24.19	24.06	22.73	23.35	23.19	22.85	24.68	25.93
	回收率/%	90.63	90.94	87.84	90.82	89.86	90.05	90.19	89.4
常规流程	品位/%	23.53	23.27	23.49	23.65	23.47	23.79	24.14	24.77
	回收率/%	88.86	89.26	89.41	89.17	90.32	89.73	89.83	88.45

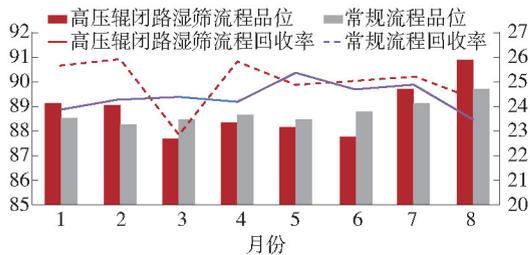


图6 两个流程月选矿指标图

场对辊面的维护,提高高压辊磨机的运转率。

柱钉辊面寿命未达预期,除矿石磨蚀系数较高外,主要有以下原因。

3.4.1 维护因素

近年来,经过多年的经验积累,市场上主要有以下几种柱钉辊面维保技术。

1) 高温堆焊

辊面堆焊是高压辊应用早期使用较为普遍的一种修复技术,是借助一定的热源手段,将具有一定使用性能的合金材料熔敷在母材材料上,尽量保证母材原有的力学性能,并恢复零件原有形状尺寸。郑州机械研究所针对高压辊磨机辊面修复,专门研制了一种ZD系列耐磨堆焊焊丝和焊条以及堆焊技术。其焊丝具有较高的耐磨性,其堆焊焊层为高碳高铬铸铁型堆焊材料,与辊体材质能合理匹配,同时又有较好的抗冲击和抗剥落性能^[11]。后续随着高压辊钉及辊套材质的变化,硬质合金柱钉辊面一旦柱钉损坏、剥落、崩角后,单纯的辊面堆焊耐磨层已无法满足使用性能要求。早期的水泥厂、姑山铁矿等均是采用该辊面修补技术。

2) 柱钉镶套焊接

由于新型硬质合金柱钉无法通过焊接将柱钉直接焊接在辊面上,于江提出了柱钉镶套修补方案,即通过在柱钉外圆柱面过盈安装钢套,然后将钢套焊接在辊面上,实现柱钉固定在辊套上。该修复方案解决了有深坑情况下无法固定柱钉的问题,同时,修复后的辊套更耐磨,使用寿命更长。但柱钉镶套焊接形式操作比较复杂,停机时间较长,易出现

焊接应力,导致辊套抗疲劳性能下降。

3) 金属修补剂修复

孙永生等提出了通过使用高强度的金属修补剂掺入金刚砂细粉,对柱钉辊套基体增材,同时安装新柱钉,可实现柱钉辊面的无损修复的技术。该辊面修复技术无需焊接,可有效避免辊套受到热应力和焊接应力,不会对辊套组织和性能产生影响。

以上柱钉辊面的维保技术主要针对大面积柱钉辊面损坏时采用,在目前高压辊的维护经验来看,生产中一般以柱钉和辊面同步磨损为宜,实现辊面免维护,只对柱钉定期检查及维护。由于该选厂高压辊湿筛系统是24h连续运行设计,设备使用初期,第一套辊面先后出现了磨损过快、断钉、崩角等早期失效形式。选矿厂未定期停机检查并修复柱钉,导致局部柱钉崩落或损坏后,该区域自垫料层脱落,失去保护垫层的辊面加速磨损,也无法形成有效的挤压力。每月应及时更换超限磨损的柱钉,且更换柱钉的长度应与其他柱钉的磨损程度一致。柱钉通过胶黏或过盈配合镶嵌在辊面上。粘黏连接方式可通过加热的方式使胶水失效,然后进行柱钉更换。过盈连接方式无法通过加热拆除旧柱钉,可通过在原断裂柱钉周围钻制小尺寸柱钉孔,然后安装上小柱钉,以保护断裂柱钉处的辊面。

3.4.2 操作因素

基于当前技术发展,高压辊的核心控制方式主要包括恒辊缝控制与恒压力控制两种模式。

本项目采用恒辊缝的控制方式,即以辊缝间隙为控制核心,通过液压系统实时调整辊子位置,维持设定辊缝间隙。一般情况下,辊缝一般设置为辊径的2%。恒辊缝控制方案的适用性和稳定性更强,可兼容物料硬度和粒度的波动,响应更快,适合更大的给矿粒度。这种控制方式也是目前有色金属矿山主流的控制方式。

由于该矿山高压辊采用定频电机,无法通过降低转速增大运行辊缝的方式调整通过量。在固定转速(21 r/min)下,该规格高压辊需要约920 t/h以上

的矿石通过量才能充分撑开辊缝,达到最佳辊缝,实现良好的挤压效果。设计新给矿量为 417 t/h,因此需要通过调整湿式筛分的筛孔尺寸,使循环量维持在 500 t/h 以上。由于缺少经验,现场一直难以找到高压辊-湿筛系统的物料进出平衡点,在返回量不足时,为提高通过量保证挤压效果,曾通过短暂关闭-再打开高压辊料流阀门的方式进行间断给料。间断给料的产生瞬间的高速冲击,使已形成的物料自垫层被再次冲刷掉,形成恶性循环。最终导致辊面在试车前两个月就被磨掉了 4 mm。后续选矿厂对操作方式进行了优化,辊面柱钉寿命得到了一定的改善,具体见表 3。

表 3 选矿厂辊面寿命情况

内容	第一套辊面	设计辊面	铁矿应用
有效柱钉长度/mm	40	40	40
寿命/h	5 330	~8 000	~12 000
磨损速率/h·mm ⁻¹	266.5	315	377

说明:使用寿命统计至辊面大范围脱落时。

3.4.3 给矿因素

原矿黏性矿物(或黏土)含量高达 18%,筛上产品水分难以控制,含水量维持在 3.5%~8%。高水分物料进入高压辊系统后,虽然有助于形成自垫层,但也易形成难以打散的“饼块”,导致高压辊磨机的比处理能力降低,磨损速率增加。类似的问题在 Bendigo 金矿和 Cerro Verde 铜矿处理风化程度较高的软矿石时也曾遇到。

同时,新给矿与返回物料混合不均匀,进入稳压仓后进一步离析,导致沿辊宽方向的水分、粒度分布不均。在当前的喂料开度,辊面无法形成均匀、有效的料柱压力,使两辊呈现“八字形”工作。反馈到设备运行参数上,两辊“八字形”工作状态下,原始辊缝设定为 28 mm,非驱动端工作辊缝为 36.2 mm,驱动端工作辊缝为 31.7 mm,左右辊缝偏差约 4.5 mm;预设压力 6.5 MPa,非驱动端工作压力 10~13 MPa,驱动端工作压力 9.5~10.5 MPa,两端压力偏差约 2.5~3 MPa;动辊主电机工作电流 109.7 A,定辊主电机工作电流 75.7 A,最大电流偏差达到 24 A。最终将喂料开度联动控制改为分别控制,偏辊缝、偏电流现象明显改善,但对偏压力仍无明显改善。

3.4.4 除铁系统效果不佳

物料冲刷辊面、辊面和柱钉磨损不同步的问

题导致辊面存在零星的断钉,这些断钉进入高压辊闭路湿筛系统,难以使用传统的除铁器去除,经高压辊磨机再次辊压,造成大面积的新柱钉断裂,最终导致断钉在系统内循环,不断破坏辊面。有研究表明,在高压辊磨机挤压及粉碎物料的过程中,硬质合金的柱钉循环进出高压区域挤压矿料,并带有不规律的冲击性,硬质合金柱钉承受巨大的正压力、切向力及交变应力作用,这种受力方式导致柱钉产生疲劳断裂。为解决柱钉累积问题,选厂定期停止高压辊-湿筛闭路系统新给矿,并持续运行一小时左右,系统剩余的柱钉和其他难碎物,进入湿筛筛上,通过临时溜槽排出系统。系统定期排出的辊钉如图 7 所示。



图 7 高压辊-湿筛系统定期排出辊钉

4 结论

高压辊闭路湿式筛分工艺在某铜矿选矿厂的工业实践获得以下结论:

(1) 采用高压辊磨闭路湿式筛分工艺,入磨产品-3 mm 粒级产品占比显著提升,由辊磨新给矿平均占比 24.50% 增加至辊磨排矿平均占比 46.8%~52%, -3 mm 粒级产品平均新增约 24.90%。由此可见,高压辊磨机闭路湿式筛分能显著提升细粒级产品含量。

(2) 与常规流程相比,高压辊磨闭路湿式筛分工艺月均单位能耗 21.80 kW·h/t_{原矿},能耗降低 2.28 kW·h/t_{原矿},选厂功耗下降约 10.5%。这表明该工艺节能潜力巨大,能源消耗减少显著,尤其适用于高电价地区的选矿厂。

(3) 高压辊磨闭路湿式筛分工艺通过降低入磨粒度,降低了球磨机钢球,平均减少 15.8%,初步估算每年成本节约 300 万元。

(4) 高压辊磨闭路湿式筛分工艺有利于后续浮选指标提升,1月至8月 Cu 平均回收率达 89.97%,与常规流程相比提高 0.5%。

(5)本项目高压辊的辊面寿命远低于铁矿行业平均水平(通常大于12 000 h),辊面有效寿命仅有6 500多小时,为铁矿行业的三分之二。在铜矿选矿行业,高压辊工艺未来研究方向应聚焦于优化操作工艺参数、提高系统长期运行的稳定性与可靠性,以及延长高压辊耐磨件(辊钉、侧挡板等)的使用寿命。

综上所述,工业实践证明,该工艺流程满足铜矿选矿要求,具有显著的节能降耗作用,可有效降低生产运营成本。同时,该工艺有助于提高后续选别指标,促进有用矿物和脉石矿物解离,对有色行业高压辊选厂的设计与应用提供了参考与借鉴。

[参考文献]

- [1] 杨松荣,蒋仲亚,刘文拯. 碎磨工艺及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2013
- [2] 常亮亮,何荣权. 浅析高压辊磨机在有色矿山的适用工艺[J]. 中国矿山工程,2020,49(3):56-58.
- [3] 雷存友,余浔,冯裕果. 碎磨工艺现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分),2019(5):15-19.

(上接第88页)

(2)通过分析不同金属价格和成本条件下的NSR值,确定矿山分期境界,企业可以评估市场波动对开采经济性的影响,制定相应的风险应对策略。此外,NSR值还可用于确定不同矿体的开采优先级,为投资决策提供依据,有助于矿山企业在复杂多变的 market 环境中做出科学决策,提高整体经济效益。

(3)相较于当量金境界优化方法,NSR境界优化采出的矿石量更低、品位更高、收入更大。通过分析不同品位矿石的NSR值,可以确定经济可行的开采品位范围,从而优化资源利用,减少低品位矿石的开采。该特别适用于处理复杂矿体或低品位矿床,能够显著提高资源利用率。

[参考文献]

- [1] 胥孝川,顾晓薇,王青,等. 多因素对露天矿最终境界设计的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(4):570-574.
- [2] 胥孝川,顾晓薇,王青,等. 同时考虑经济利润、生态成本和社会效益的露天矿开采境界优化(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2021,31(12):3847-3861.

- [4] 柳晓明,张英军,王前,等. 国产高压辊磨机在有色矿山的应用及分析[J]. 陶瓷,2021(9):45-47.
- [5] 俞宏军,刘兆瑞,于保强. 山达克铜矿碎磨流程设计研究[J]. 中国矿山工程,2020,49(3):56-58.
- [6] 瞿铁,辛亚淘. 高压辊磨工艺在有色选矿厂的应用实践及前景分析[J]. 矿山机械,2019,47(4):35-39.
- [7] 余玮. 高压辊磨对某铜矿浮选指标影响的研究[J]. 现代矿业,2024,40(4):140-143.
- [8] 吴凯,马英强,毕凤琳,等. 高压辊磨机不同辊面比压力破碎对铜矿石浮选的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2022(6):130-134.
- [9] 印万忠,侯英,丁亚卓,等. 破碎方式对邦铺钼铜矿石可磨性及钼浮选的影响[J]. 金属矿山,2013(2):86-89.
- [10] 王中才,陈兴,韦东,等. 高压辊磨对大冶铁矿碎磨能耗及分选的影响[J]. 矿冶工程,2023,43(2):81-85
- [11] 王欣,黄智泉,李军伟,等. ZD系列药芯焊丝在进口辊压机辊面修复中的应用[J]. 水泥技术,2007(6):46-47.

- [3] 胥孝川,顾晓薇,王青,等. 金属露天矿帮坡角变化对最终境界影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(5):716-721.
- [4] 顾晓薇,赵昀奇,王青,等. 露天矿边界品位与最终境界的关系[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(4):575-578.
- [5] 朱学胜. 基于NPV优化程序的米拉多北矿露天开采境界优化[J]. 现代矿业,2025,41(7):171-174+189.
- [6] 赵彬,谢东伟. 基于Datamine软件的某露天矿山开采境界优化应用[J]. 现代矿业,2022,38(9):66-70.
- [7] 张延凯,李克庆,胡乃联,等. 露天矿境界优化LG算法初始有向图生成研究[J]. 煤炭学报,2015,40(S2):367-373.
- [8] 马宁,汪昌亮,丁鹏. 基于NPV Scheduler软件的露天转地下矿山开采境界研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):21-25.
- [9] 孙长坤,戴晓江,陈靖. 当量品位在某多金属矿床的应用[J]. 河南科学,2013,31(9):1481-1484.
- [10] 金文洪,段焕春,张伟民. NSR计算在多金属矿床勘探及经济评价中的应用——以加拿大BC省J金多金属矿为例[J]. 矿产勘查,2011,2(3):298-303.