

粉碎粒度对金矿堆浸的影响研究

郭文军¹, 杨洪英², 侯英^{3*}, 李晨³, 邹存存³, 陈鹏³

(1. 内蒙古西金矿业有限公司; 2. 东北大学冶金学院; 3. 辽宁科技大学矿业工程学院)

摘要:堆浸提金技术由于具有显著的经济性和高效性,在低品位金矿资源利用领域具有不可替代的地位。粉碎粒度是金矿堆浸过程中的一个关键参数,直接影响金矿的浸出效果和生产成本。粉碎粒度过粗会降低浸出效果,粉碎粒度过细则会增加能耗并影响经济性,同时也会恶化渗透效果,从而进一步降低浸出效果。综合考虑粉碎粒度对金矿浸出效果、渗透效果及堆浸成本的影响,介绍了近年来关于堆浸粉碎粒度的研究进展,并探讨了矿石性质、浸出剂种类和浸出条件等因素对粉碎粒度选择的影响。优化粉碎粒度的大小和分布,控制堆浸成本,以及协同优化其他浸出影响因素是未来的研究方向,旨在为低品位金矿堆浸工艺中粉碎粒度的优化提供参考。

关键词:粉碎粒度;操作参数;浸出效率;金矿堆浸;渗透效果;生产成本

中图分类号:TD923

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)06-0001-06

doi:10.11792/hj20250601

引言

金矿在全国各省均有分布,但具工业规模的金矿主要分布在中国东部、中部、西部和北部地区。随着金矿资源逐渐减少,低品位金矿已成为主要金矿资源,并逐渐成为研究热点^[1]。

堆浸技术在处理低品位金矿资源中应用广泛,堆浸工艺具有流程简单、操作容易、成本低、投资少、处理量大、效益好等优点^[2]。金矿堆浸流程见图1。金矿堆浸过程中粉碎环节的粒度控制至关重要,粉碎粒度直接影响浸出效率及效果^[3]。矿石粒度越细,表面积越大,越有利于浸出剂与矿石中的金属元素发生反应,从而提高浸出率。但是,粒度过细也可能导致渗透性变差,影响浸出液的流动和均匀分布。合理的粒度分布既能保证浸出剂与矿石充分接触,又能保证浸出液的渗透和流动。因此,在实际操作中,需要对破碎设备进行选择和优化,并结合矿石性质进行粒度调整和控制;对浸出过程中的浸出剂用量、喷淋方式、堆体高度等参数进行合理优化,以提高浸出率 and 经济效益。

1 粉碎粒度对金矿堆浸浸出效果的影响

1.1 粉碎粒度对浸出率的影响

金矿堆浸的浸出率是衡量浸出效果的重要指标,而粉碎粒度对其有显著影响。研究表明,适中的粒度

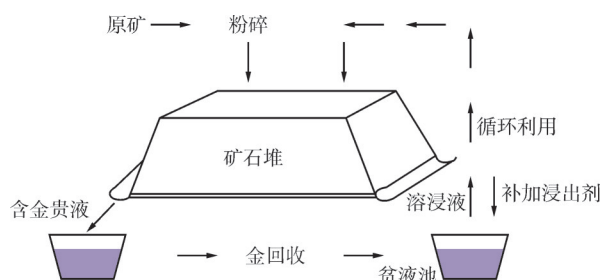


图1 金矿堆浸流程

Fig. 1 Flowchart of heap leaching of gold ores

能使金矿颗粒在堆浸过程中充分暴露,从而提高浸出率^[4]。当粉碎粒度过大时,其内部金矿物难与浸出剂充分接触,导致浸出率降低。大颗粒矿石在堆浸过程中容易形成孔隙,使得浸出剂无法均匀渗透,进一步降低了浸出效果。细颗粒金矿还易发生团聚现象,形成大的颗粒团,影响浸出剂的渗透和扩散。通过对比分析不同粒度下的浸出率数据,能够获得最佳粉碎粒度,此时,金矿颗粒能充分暴露于浸出剂中,并保持适当的渗透速度,以提高浸出率。

广南老寨湾金矿试验结果显示,随着入选矿石粒度减小,金浸出率逐渐增加;当矿石粒度为-10 mm时,金浸出率达到最高,为21.85%。然而,当矿石粒度为-1 mm时,浸出率反而下降,粒度过小导致喷淋液在试验柱内局部不易渗透、偏流,进而影响浸出效果^[5]。贺日应等^[6]针对紫金山金矿开展了入堆矿石粒

收稿日期:2025-01-10; 修回日期:2025-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52274348); 辽宁省自然科学基金项目(20180550198); 辽宁省教育厅项目(LJKFZ20220195, 2019LNQN09, 2016TSPY12)

作者简介:郭文军(1967—),男,工程师,研究方向为金矿资源勘查开发;E-mail:zhulagongsi@163.com

*通信作者:侯英(1986—),男,副教授,博士,从事难选矿物高效碎磨分选技术研究工作;E-mail:huying@ustl.edu.cn

度对金浸出率的影响研究,当矿石粒度小于80 mm时,各级别矿石浸出率均较高,且相差不大;而当矿石粒度大于80 mm时,各级别矿石浸出率均较低,且粒度越大,浸出率下降越快。王振银等^[7]针对苏丹某金矿研究了矿石粒级在 P_{80} 为6 mm、10 mm条件下的浸出效果,表层矿石的浸出率分别为55 %和65 %,深层矿石的浸出率分别不足40 %和30 %,不同粒度条件下不同矿石类型的浸出效果也不尽相同。

1.2 粉碎粒度对渗透速度的影响

粉碎粒度是影响金矿堆浸过程中渗透速度的关键因素之一^[8]。研究表明,粒度越小,矿石的比表面积越大,理论上越有利于提高浸出速度。然而,实际浸出过程中,粒度过小会导致矿石堆的孔隙率降低,反而降低了浸出速度。曾宪辉^[9]研究结果显示,当矿石粒度从-0.074 mm降至-0.038 mm时,渗透速度从55 mm/h下降至45 mm/h;这表明,虽然细粒度矿石有助于提高浸出效率,但过细的粒度会限制浸出剂渗透,从而降低浸出速度。进一步分析显示,当矿石粒度继续降至-0.023 mm时,渗透速度下降至40 mm/h。这主要是过细的粒度导致矿石堆渗透性较差,浸出剂在矿石堆中的流动受到阻碍,影响了整体渗透速度。此外,过细的粒度还可能导致浸出剂在矿石堆中分布不均匀,进一步影响浸出效果。粗粒度矿石虽然具有较好的渗透性,但浸出速度并不理想。当矿石粒度大于2 mm时,渗透速度仅为50 mm/h,与-0.074 mm矿石粒度的渗透速度相当。这是因为粗粒度矿石的比表面积较小,与浸出剂的接触面积有限,导致渗透速度提升不明显。

在实际生产中,应根据矿石性质和堆浸工艺要求,合理选择粉碎粒度,以实现最佳渗透速度。粉碎粒度对浸出速度影响见表1。由表1可知:-0.074 mm至-0.038 mm的粉碎粒度能够在保证渗透性的同时实现较高的渗透速度,从而提高金矿堆浸的整体经济效益。随着粉碎粒度降低,渗透速度逐渐降低,这是因为细粒矿石的孔隙率较低,影响了浸出剂的渗透。尽管渗透速度有所下降,但金浸出率却随着粉碎粒度的细化而提高,说明细粒度矿石有利于金溶解。浸出剂消耗量随着粒度的降低而减少,可能是由于细粒度矿石与浸出剂接触更充分,提高了渗透速度。

表1 粉碎粒度对渗透速度影响

Table 1 Effect of comminution particle size on the permeance rate

粉碎粒度/ mm	渗透速度/ (mm·h ⁻¹)	浸出剂消耗量/ (L·t ⁻¹)	浸出周 期/d	金浸出 率/%
-0.15	60.5	450	45	72.3
-0.074	55.2	410	40	78.6
-0.048	50.8	380	38	81.2
-0.038	46.3	360	36	83.5
-0.030	42.9	340	34	85.1

1.3 粒度分布对浸出的影响

粒度分布是不同粒度矿石颗粒在矿石总体中所占的比例。粒度分布对浸出均匀性具有显著影响。矿石粒度分布均匀,浸出剂在矿堆中的渗透速度较为一致,浸出会更加均匀^[10]。这有助于减少浸出过程中的“死角”和“盲区”,提高浸出速度。相反,粒度分布不均匀,大颗粒和小颗粒混杂在一起,浸出剂的渗透速度和浸出效果会存在显著差异。大颗粒矿石浸出速度较慢,而小颗粒矿石则可能过早地被浸出剂穿透,导致浸出不均匀。在破碎和筛分过程中,需要严格控制矿石的粒度分布,确保各粒级比例适中。

粒度分布对金矿堆浸过程的影响显著,尤其在浸出指标上表现出明显差异。以某金矿企业的实际生产为例,对比了粒度分布均匀与不均匀条件下的浸出效果。当矿石粒度分布均匀,-0.074 mm占比为60 %时,浸出率为85 %;而粒度分布不均匀,-0.074 mm占比为40 %~80 %,浸出率仅为75 %^[11]。粒度分布的均匀性还直接影响浸出液的渗透速度和均匀性。在粒度分布均匀的条件下,浸出液的渗透速度为45 mm/h;而在粒度分布不均匀的条件下,渗透速度下降至35 mm/h。这表明,粒度分布不均匀会导致矿石堆孔隙率降低,从而影响浸出液的流动性和渗透性。粒度分布均匀的矿石在浸出过程中,金属浓度波动范围较小,浸出液的金属浓度相对稳定,有利于后续金属回收。而在粒度分布不均匀的条件下,浸出液中的金属浓度波动较大,最大波动可达20 %,增加了金属回收的难度和成本。郭金溢等^[12]对比研究了国外某低品位金矿石的高压辊磨工艺和常规颚式破碎工艺的粒度分布和浸出效果,结果表明,高压辊磨工艺获得产品的细粒级占比较高,可磨性优于常规颚式破碎产品,且有助于降低磨矿成本,同时提高金浸出率,在相同浸出条件下,高压辊磨产品金浸出率比常规颚式破碎产品提高了11~15百分点。

1.4 粉碎粒度对浸出物成分的影响

除浸出率外,粉碎粒度还影响浸出物的成分。不同粒度的金矿颗粒在浸出过程中释放的金和其他伴生元素含量和比例会有所不同。

对于大颗粒矿石,其内部金难以被充分浸出,因此,浸出物中金含量相对较低。相反,对于小颗粒金矿石,具有较大的表面积和高反应活性,金和伴生元素的释放速度较快。然而,过小的颗粒可能导致浸出液中含有较多细颗粒悬浮物,这些可能是未完全溶解的金矿物颗粒或脉石矿物,为后续处理带来挑战。

在堆浸过程中,粉碎粒度显著影响浸出液的物质组成。在进行堆浸作业时,比较了不同粉碎粒度条件下的浸出液成分。田雨川等^[13]认为,当矿石粉碎粒度

为 -0.074 mm 时,浸出液中除含金离子外,还含较高质量浓度的铜离子和铁离子,分别为 30 mg/L 和 40 mg/L 。这表明,在较粗的粉碎粒度下,其他金属离子的溶解度较高,可能影响后续金属回收过程。当粉碎粒度降至 -0.038 mm 时,浸出液中金离子质量浓度提高 15% ,达到 1.5 g/m^3 ,而铜离子和铁离子质量浓度分别降至 20 mg/L 和 30 mg/L 。这表明,细粒矿石在提高金浸出率的同时,有助于减少其他杂质溶解,从而简化后续浸出液的处理流程。当粉碎粒度继续降至 -0.023 mm 时,尽管金离子质量浓度进一步提高至 1.8 g/m^3 ,但浸出液中的硅酸盐和铝离子浓度也随之增加,这可能是因为过细的粒度使得矿石中的脉石矿物更易于浸出。这种情况可能增大浸出液的处理难度,影响最终的金回收率。

1.5 粉碎粒度对浸出液中金属浓度的影响

粉碎粒度与浸出液中金属浓度之间存在密切关系。一般来说,粉碎粒度越小,浸出液中金属浓度越高。这是因为较小粒度矿石具有较大的比表面积,能够提供更广泛的反应界面,从而使浸出剂与矿石中的有用组分更充分反应。较小粒度矿石具备较好的渗透性,允许浸出剂更快速地渗透到矿石内部,将有用组分溶解出来^[14]。

然而,值得注意的是,粒度过小并不一定意味着浸出液中金属浓度更高。这是因为过度细小的矿石颗粒容易发生团聚现象,降低矿石的渗透性,可能增加浸出剂的用量和成本,同时降低浸出率。因此,在实际操作中,需要根据矿石性质、浸出剂种类和浸出条件等因素,选择合适的粒度,以获得最佳的浸出效果和经济效益。

粉碎粒度对金矿堆浸效率具有重要影响。在实际操作中,需要综合考量粒度大小、粒度分布,以及粒度与浸出液中金属浓度的关系等因素,选择合适的破碎和筛分工艺,确保矿石粒度满足堆浸要求,从而提高金矿堆浸效率。粒度是影响金矿堆浸浸出液中金属浓度的关键因素之一。张映群^[5]认为,矿石粒度越细,其比表面积越大,与浸出剂的接触面积也越大,越有助于提高金浸出率。当矿石粒度从 -0.074 mm 提升至 -0.038 mm 时,浸出液中金离子浓度质量从 1.2 g/m^3 显著增加到 1.8 g/m^3 ,增长了 50% 。这一变化表明,细粒矿石在堆浸过程中能够更有效地释放金离子,从而提高浸出液的金离子浓度。粒度对浸出液中金属浓度的影响并非线性。当矿石粒度继续降至 -0.023 mm 时,尽管浸出液中金质量浓度有所增加,但增长幅度不如从 -0.038 mm 至 -0.074 mm 的变化显著,仅从 1.8 g/m^3 增至 2.0 g/m^3 。这可能是因为过于细小的粒度会导致矿石渗透性下降,影响浸出剂的均匀分布,

限制了金离子浓度的进一步提升。此外,不同粒度的矿石在浸出过程中呈现出不同的浸出动力学特性。粗粒度矿石虽然初始浸出速度快,但浸出液中金属浓度较低;而细粒度矿石虽然初始浸出速度慢,但最终可以达到更高的金属浓度。因此,在实际生产中,应根据矿石性质和堆浸工艺要求合理选择粉碎粒度,以达到最佳浸出效果。

随着粉碎粒度细化,浸出液中金离子浓度呈上升趋势。这是因为细粒度矿石具有更大的比表面积,与浸出剂接触更充分,从而提高了金浸出率。当矿石粒度从 -0.15 mm 降至 -0.030 mm 时,浸出液中金离子质量浓度从 1.25 mg/m^3 增加至 2.85 mg/m^3 ,说明粉碎粒度对浸出液中金离子浓度有显著影响。虽然细粒度有助于提高浸出率,但过细的粒度可能会导致渗透性下降,影响整体浸出效果,因此需要综合考虑粒度分布对浸出过程的影响。

2 粉碎粒度对金矿堆浸渗透效果的影响

2.1 对渗透均匀性的影响

金矿堆浸过程中,粉碎粒度对渗透均匀性具有显著影响。研究表明,粉碎粒度较细时,其比表面积较大,导致矿石堆的孔隙率降低,从而影响渗透速度。吴志国等^[15]针对贵州某微细粒浸染型含泥氧化金矿堆浸过程的研究发现,矿石堆渗透性较差是金浸出速率慢和金浸出率低的主要原因。杨维忠等^[16]认为,当矿石粒度 -0.074 mm 占比从 40% 增加至 60% 时,渗透速度从 50 mm/h 下降至 30 mm/h 。这表明,随着细粒级矿石占比的增加,渗透速度显著降低,这可能会造成浸出剂在矿石堆中流动不均匀,进而影响浸出效果。此外,通过对比不同粒度分布的矿石堆浸结果,粒度分布不均匀的矿石堆,其渗透速度和均匀性均较差。在粒度分布均匀的矿石堆中,浸出剂能够较为均匀地渗透至整个矿石堆;而在粒度分布不均匀的矿石堆中,浸出剂更多地集中在粗粒级区域,导致细粒级区域浸出不足。具体来说,当矿石堆中 -0.074 mm 粒级占比均匀分布时,浸出剂渗透的均匀性指数为 0.85 ;而当 -0.074 mm 粒级占比分布不均匀时,该指数降至 0.65 。王勇海等^[17]认为,粒度分布直接影响矿石堆的孔隙率和渗透性。当矿石中 -0.074 mm 粒级占比从 50% 提升至 65% 时,矿堆的渗透率提高了 20% ,浸出周期相应缩短了 5 d 。过细的粒度会导致孔隙堵塞,影响渗透效果。因此,合理的粒度分布确保粗细粒级搭配适当,其中 -0.038 mm 粒级占比控制在 30% 以内,可以保持良好的渗透性,同时避免药剂过量消耗。在实际操作中,为了提高渗透速度和均匀性,需要对矿石进行适当的破碎和筛分,以获得适宜

的粒度分布。通过优化粒度分布,不仅可以提高浸出率,还能缩短浸出周期,降低生产成本。

2.2 对渗透深度的影响

粉碎粒度还会影响溶液在堆浸过程中的渗透深度。大颗粒矿石的堆浸场,由于内部空隙较大,溶液能够较容易地渗透到深层矿石中。然而,随着渗透深度的增加,溶液的浓度和活性可能会逐渐降低,从而影响浸出效果。对于小颗粒矿石的堆浸场,虽然渗透速度可能较慢,但溶液能更均匀地渗透到矿石中,并在较浅深度实现较高的浸出率。追求高浸出率需要综合考虑渗透速度和渗透深度之间的关系,牟凯^[18]认为,矿石堆深度对金矿堆浸过程中不同粒级的浸出结果有显著影响。随着矿石堆深度的增加,细粒级矿石的浸出率普遍高于粗粒级。在矿石堆表层(0~1 m),-0.074 mm粒级的浸出率为85%,而-2 mm粒级的浸出率仅为70%。当深度达到3~4 m时,-0.074 mm粒级的浸出率提升至90%,-2 mm粒级的浸出率也有所提高,达到75%。这表明,在深层矿石中,细粒级矿石具有更大的比表面积,与浸出药剂接触更充分,从而浸出率更高。矿石堆深度对粗粒级矿石的浸出影响更为复杂。在浅层(1~2 m),-2 mm粒级的浸出率提升不明显,但随着深度增加,由于渗透性降低,药剂在矿石堆中的停留时间延长,粗粒级矿石的浸出率逐渐提高。在5 m深处,-2 mm粒级的浸出率达到80%,接近细粒级的浸出效果。

矿石堆深度对不同粒级矿石的浸出效果具有不同影响。在实际生产中,应根据矿石的粒度分布和矿石堆深度调整浸出剂的使用策略和喷淋制度,以优化整体堆浸过程的浸出效果。

3 粉碎粒度对金矿堆浸成本的影响

3.1 对浸出剂用量的影响

浸出剂用量与金矿堆浸成本直接相关。一般来说,随着粉碎粒度减小,浸出剂用量会逐渐增加。这是因为较小的粉碎粒度有助于提高矿石与浸出剂的接触面积,从而提高浸出效果。然而,过度减小粉碎粒度也可能导致浸出剂用量过多,造成资源浪费和成本增加。为了控制浸出剂用量,需要在保证浸出效果的前提下,合理控制粉碎粒度。通过优化浸出工艺参数,如浸出时间、温度等,来降低浸出剂用量。引入新型浸出剂或改进浸出剂配方也可以提高浸出率,减少浸出剂用量。

粒度分布对浸出剂用量的影响不容忽视。当粉碎粒度分布较宽时,浸出剂用量可能难以控制,容易造成资源浪费。因此,在实际操作过程中,应尽可能控制粉碎粒度分布范围,使其更加均匀,以提高浸出

率并降低成本。在金矿堆浸过程中,粉碎粒度对浸出剂用量具有显著影响:粒度越小,比表面积越大,有利于提高浸出效率,但同时也需增加浸出剂用量以维持有效的浸出反应。当粉碎粒度从-0.074 mm降低至-0.045 mm时,适宜的氰化钠用量从800 g/t增加至1 000 g/t。曹飞等^[19]指出,在不同粉碎粒度条件下,药剂用量的优化对于成本控制至关重要。在-0.038 mm的细粒矿石浸出过程中,通过调整药剂配比,将氰化钠用量控制在1 200 g/t,可以平衡浸出效果与成本。黄合发^[20]认为,对于-0.030 mm的超细粒矿石,采用高效助浸剂与氰化钠联合使用,可以将氰化钠用量减少至1 100 g/t,同时保持较高的浸出率。

粉碎粒度与浸出药剂用量存在密切关系。在实际生产中,应根据粉碎粒度合理调整药剂用量,以实现最优的浸出效果。通过精细化管理和技术创新,可以有效降低药剂消耗,提高金矿堆浸的整体经济效益。

3.2 综合成本分析与优化建议

综合考虑破碎设备能耗和浸出剂用量对金矿堆浸成本的影响,可以得出以下优化建议:

1)加强破碎设备的技术升级和选型优化。通过引入高效能的破碎机、自动化控制系统等先进设备,提高破碎设备的破碎效率,降低能耗水平,从而降低破碎成本。根据矿石的性质和粒度要求,合理选择破碎设备的类型和参数设置,以确保破碎效果和经济性。

2)优化浸出工艺参数和浸出剂配方。通过试验研究找到最佳的浸出时间、温度及浸出剂配比,以减少浸出剂用量和提高浸出效率。关注新型浸出剂的研发和应用,为降低成本提供更多选择。

3)注重控制粉碎粒度分布。通过优化破碎流程和筛分设备,使粉碎粒度分布更加均匀,这有利于提高浸出效率和降低浸出剂用量。加强现场管理和操作人员培训,确保破碎和浸出过程严格按照操作规程进行,减少人为因素对成本的影响。通过综合考虑破碎设备能耗、浸出剂用量和粒度分布等因素,制订更加合理的金矿堆浸成本优化方案,为金矿堆浸生产提供有力支持。

4)关注新型浸出剂的研发和应用。针对药剂消耗方面,研究发现,氰化钠成本占总成本的30%。通过优化药剂配比和添加方式,可以使氰化钠消耗降低10%。谢李泉^[21]指出,采用新型高效浸出剂可进一步提高浸出率,降低药剂成本。在能源消耗方面,电力成本占堆浸总成本的20%。通过引入节能型设备和优化供电方案,预计可以降低电力消耗15%。

4 金矿堆浸过程中粉碎粒度的监测与控制

4.1 粒度在线监测系统的构建与运行

粒度在线监测系统是金矿堆浸过程中实现粒度实时监测与控制的关键环节。利用先进的传感器技术、图像识别技术和数据处理技术,对金矿堆浸过程中的粒度进行实时采集、分析和显示。在金矿堆浸场的关键位置安装粒度传感器和摄像头,以实时获取粒度数据和图像信息。粒度传感器能够准确测量矿石颗粒的大小和分布,而摄像头则能够捕捉堆浸场的整体情况和矿石颗粒的流动状态。通过数据传输网络,将采集到的数据实时传输至中央控制系统,中央控制系统具备强大的数据处理和分析能力,能够对接收到的粒度数据和图像信息进行实时处理和分析,得出当前的粒度情况。通过界面显示系统,将处理后的粒度信息实时展示给操作人员。操作人员可以根据显示的信息对金矿堆浸过程进行实时调整和控制,确保矿石粒度满足工艺要求。粒度在线监测系统的运行需要保证稳定性和可靠性。因此,在构建该系统时需要考虑传感器的类型、安装位置、数据传输网络的稳定性和安全性等因素,以确保稳定运行。

4.2 粒度反馈控制策略的制订与实施

粒度反馈控制策略是实现金矿堆浸过程中粒度有效控制的关键手段。根据在线粒度监测系统提供的数据,制订合适的粒度控制策略,并通过自动化控制系统对堆浸过程进行实时调整。根据金矿堆浸的工艺要求和矿石性质,确定适宜的粒度范围和分布。依据在线粒度监测系统提供的数据,判断当前粒度是否符合要求。若不符合,则须制订相应调整措施,可通过调整破碎设备的运行参数、改变矿石输送速度等方式来调节粒度,还可以通过优化堆浸场布局和矿石堆放方式,改善颗粒流动性,从而提高浸出效果。在实施粒度反馈控制策略时,需注意策略的合理性和有效性,充分考虑矿石颗粒特性及堆浸场实际情况,制订符合实际的控制策略,并不断调整和优化以适应不同条件下的需求。

4.3 监控与控制系统在金矿堆浸中的应用

通过粒度在线监测系统和粒度反馈控制策略的应用,可以实现对金矿堆浸过程中粒度的实时监测与控制,从而提高浸出率,降低成本并优化环境。粒度在线监测系统能够提供实时的粒度数据,使操作人员及时了解矿石颗粒的粒度情况,及时发现并解决粒度问题,避免对浸出效果产生不良影响。粒度反馈控制策略能够根据粒度在线监测系统提供的数据对堆浸过程进行实时调整和控制,有助于优化堆浸过程中的粒度分布和浸出条件,从而提高浸出率。通过监控与

控制系统的应用,还可以实现金矿堆浸过程的自动化和智能化。通过自动化控制系统对破碎设备、输送设备、浸出剂等进行精确控制,可以实现堆浸过程的稳定运行和高效生产。粒度在线监测系统和粒度反馈控制策略在金矿堆浸过程中的应用具有显著效果和优势。通过实时监测与控制粒度,可以提高浸出率,降低成本并优化环境,为金矿堆浸技术的发展和應用提供有力支持。粒度优化和智能化控制技术是提升金矿堆浸效率的关键。李帅^[22]结合东安金矿选矿厂碎磨过程的生产实际,开发了碎磨过程控制软件,采用STEP7软件开发回路控制软件和逻辑控制软件,采用WinCC软件开发过程监控软件。东安金矿生产碎磨过程控制软件应用后,矿石处理量从360 t/d提高到720 t/d,大大提高了机器的运转效率,提升了金回收率及企业效益。随着科技的进步,粒度优化技术将更加精细化、智能化。通过对金矿物理化学性质的深入研究,建立更为准确的粒度分布模型,可实现对金矿粒度分布的精确控制。智能化控制技术的发展也将为粒度优化提供有力支持。

5 结 论

1)粉碎粒度作为金矿堆浸过程的关键因素,显著影响金矿堆浸的浸出率、渗透速度、浸出物成分、浸出液金属浓度、渗透均匀性、浸出剂用量、粉碎能耗等,需要综合考虑以确定最佳粉碎粒度。

2)堆浸矿石粒度减小,金浸出率增加;但矿石粒度过细,浸出率反而下降,这是由于粒度过小,喷淋液在矿石堆内局部不渗透、偏流,进而影响浸出效果。粒度分布的均匀性直接影响浸出液的渗透均匀性。在粒度分布均匀的条件下,浸出液的渗透速度快;而在粒度分布不均匀的条件下,浸出液的渗透速度慢。矿石粒度大小显著影响浸出液中金离子浓度:矿石粒度越小,浸出液中金离子浓度越高。

3)随着粉碎粒度减小,浸出剂用量逐渐增加,粉碎能耗亦逐渐增加。根据不同矿石粒度的浸出效果,合理确定粉碎粒度并调整药剂用量,可实现最优的浸出效果和成本控制。降低成本的措施包括加强破碎设备的技术升级和选型优化,优化浸出工艺参数和浸出剂配方,注重控制粉碎粒度分布,关注新型浸出剂的研发和应用等。

4)粒度在线监测系统是实现金矿堆浸过程中粒度实时监测与控制的关键环节。通过应用粒度在线监测系统和粒度反馈控制策略,可以实现对金矿堆浸过程中粒度的实时监测与控制,从而提高浸出率,降低成本并优化环境。

5)在粉碎粒度优化方面,应更加注重矿石物理化

学性质和浸出剂性质的研究,以便更加精确地确定最佳粉碎粒度。未来研究的重点方向是粉碎粒度与浸出剂种类、浸出剂用量、浸出时间、喷淋强度等参数的协同优化。

[参考文献]

- [1] 秦燕,王成辉,王登红,等.中国金矿床成矿年代学研究进展[J].地球学报,2023,44(4):581-598.
- [2] 邱欣,池汝安,徐盛明,等.堆浸工艺及理论的研究进展[J].金属矿山,2000(11):20-23.
- [3] 张海亮,王建文,马利凤,等.黄金堆浸工艺的工程应用研究进展与实践[J].有色金属(冶炼部分),2023(7):48-56.
- [4] 车贤.氰化浸金的三大机理及强化工艺研究进展[J].中国资源综合利用,2024,42(7):174-180.
- [5] 张映群.广南老寨湾金矿难处理矿石金回收工艺的研究及应用[D].昆明:昆明理工大学,2020.
- [6] 贺日应,张勇.紫金山金矿堆浸工艺参数优化实践[J].黄金,2006,27(12):51-54.
- [7] 王振银,王怀,段帅康,等.苏丹某金矿床矿石工艺矿物学及浸出特性研究[J].黄金,2024,45(1):34-38.
- [8] 唐远,印万忠,马英强,等.高压辊磨对金矿石堆浸效果的影响机理[J].中国有色金属学报,2016,26(7):1 531-1 537.
- [9] 曾宪辉.紫金山低品位金矿资源的开发利用[J].矿产保护与利用,2002(4):5-9.
- [10] 印万忠,唐远,迟晓鹏,等.高压辊磨机在金矿选冶中的应用[J].有色金属(选矿部分),2016(2):69-74.
- [11] 黄志华,杨政国,苏秀珠.低品位金矿石直接堆浸工艺研究[J].有色金属(冶炼部分),2014(5):52-55.
- [12] 郭金溢,谢洪珍,范道焱.碎磨工艺对某金矿氰化浸出的影响[J].黄金,2022,43(11):73-76.
- [13] 田雨川,邢晨.影响金矿堆浸工艺的因素与优化研究[J].世界有色金属,2022(6):205-207.
- [14] 康石长,王高锋,凌博闻,等.离子吸附型稀土矿开采机制研究进展[J].中国稀土学报,2025,43(2):268-283.
- [15] 吴志国,王红星,于鸿宾.某金矿提金工艺改造及生产实践[J].黄金,2024,45(6):41-44.
- [16] 杨维忠,藏梅,邢令,等.新疆某金矿氧化矿可选性实验研究[J].地质论评,2017,63(增刊1):228-230.
- [17] 王勇海,宁新霞,任金菊.甘肃省某地金矿柱浸试验研究[J].矿产保护与利用,2006,26(1):33-36.
- [18] 牟凯.新疆某金矿工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2018(6):95-97.
- [19] 曹飞,吕良,李文军,等.河南某低品位金矿堆浸试验研究[J].矿产保护与利用,2014,34(4):37-40.
- [20] 黄合发.堆浸提金技术及其在塘家冲金矿的应用[J].世界有色金属,2016(21):15-19.
- [21] 谢李泉.紫金山金矿缩短堆浸周期的研究与实践[J].矿产保护与利用,2002,22(5):25-29.
- [22] 李帅.金矿生产碎磨过程控制软件开发[D].沈阳:东北大学,2019.

Effect of comminution particle size on gold ore heap leaching

Guo Wenjun¹, Yang Hongying², Hou Ying³, Li Chen³, Zou Cuncun³, Chen Peng³

(1. Inner Mongolia Xijin Mining Co., Ltd.; 2. School of Metallurgy, Northeastern University;
3. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning)

Abstract: Heap leaching technology for gold extraction holds an irreplaceable role in utilizing low-grade gold resources due to its economic efficiency and high effectiveness. Comminution particle size is a critical operational parameter in gold ore heap leaching, directly influencing leaching efficiency and production costs. Excessively coarse particles reduce leaching effectiveness, while overly fine particles increase energy consumption, compromise economic viability, and degrade permeability, further diminishing leaching performance. This study synthesizes the impact of particle size on leaching efficiency, permeability, and cost, reviews recent advancements in optimizing comminution particle size for heap leaching, and discusses factors affecting particle size selection, including ore properties, leaching agent types, and leaching conditions. Future research directions emphasize optimizing particle size distribution, controlling leaching costs, and synergistically improving other leaching parameters, aiming to provide guidance for enhancing low-grade gold ore heap leaching processes.

Keywords: comminution particle size; operation parameter; leaching efficiency; gold ore heap leaching; permeability; production cost