

# 大型堆浸循环液深度除钙试验研究

白 杨

(内蒙古太平矿业有限公司)

**摘要:**针对某黄金矿山在长期堆浸生产过程中存在钙、镁等贱金属阳离子积累而影响生产效率和质量的问题,提出了贫液二氧化碳初步除钙与贵液阻垢剂深度除钙联合技术方案。通过试验确定了最佳工艺参数:贫液pH值调整至11.5~12.0,二氧化碳充气压力控制在0.25 MPa,反应时间设定为1.5 h,贫液二氧化碳初步除钙效率可稳定达到90%以上;向贵液中添加优选的DN3阻垢剂,在添加量900 mg/L条件下,载金炭钙吸附量减少了1.76个百分点,金吸附率提高了13.38个百分点,酸洗再生成本显著降低。连续试验结果表明,采用该联合技术可降低钙、镁离子的影响,提高金的吸附效果,对改善生产工艺具有重要意义。

**关键词:**堆浸循环液;二氧化碳除钙;阻垢剂;吸附增强;黄金选冶;活性炭

中图分类号:TD926.5

文章编号:1001-1277(2025)06-0042-04

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250609

## 引 言

在采用堆浸工艺回收黄金的生产过程中,堆浸液循环利用存在离子浓度累积难题。随着生产持续推进,堆浸循环液中的钙、镁、钠,以及铜、铁、镍等含量持续攀升。堆浸循环液中钙、镁等杂质离子会与碳酸根离子、碳酸氢根离子发生化学反应,生成碳酸钙和碳酸镁等难溶性物质,并在矿堆表面、浸出液管道、设备内壁,以及炭吸附系统和解吸系统等多个关键部位逐渐形成钙垢<sup>[1-4]</sup>。钙垢会堵塞矿石的孔隙和通道,严重阻碍浸出液在矿堆中的渗透与流动,使得浸出液难以充分与矿石中的金接触,直接造成金浸出速度变缓,浸出率降低<sup>[5]</sup>。在氰化堆浸环节,钙、镁等杂质离子还会与氰化物发生化学反应,降低氰化物的有效浓度。为保证浸出效果,必须额外添加浸出剂,增加生产成本<sup>[6]</sup>。从设备运行视角分析,钙垢附着在管道和设备内壁,会使管道的流通截面积减小,流体阻力增大。这不仅导致泵、阀门等设备的负荷急剧增加,严重时可能引发管道堵塞,从而影响设备的正常运行,维护成本大幅提高<sup>[7]</sup>,甚至缩短设备的使用寿命。在炭吸附过程中,钙、镁持续积累还会对金的选择性吸附和吸附效果产生不利影响,降低活性炭对金的吸附能力,进而影响整个金回收率<sup>[8]</sup>。

钙、镁去除方法主要为化学沉淀法、离子交换法、膜分离法。化学沉淀法通常加入碳酸钠、氢氧化钠等沉淀剂,使钙、镁等杂质离子形成沉淀除去。但是,该

方法存在一定的局限性,沉淀剂的加入量难以精确控制,加入过多会导致溶液pH升高,影响金浸出;加入过少则沉淀不完全<sup>[9]</sup>。离子交换法利用离子交换树脂有效去除钙、镁等杂质离子,但交换容量有限,需要定期再生或更换树脂,且再生过程操作复杂,产生大量废水,处理不当会造成二次污染<sup>[10]</sup>。膜分离法采用纳滤膜、反渗透膜等,钙、镁等杂质离子的去除效果较好。然而,膜价格昂贵,投资成本高,且膜容易受到污染和堵塞,需要定期清洗和更换,维护成本高<sup>[11-12]</sup>。

某黄金矿山采用堆浸工艺,历经多年生产运行后,循环浸出液中钙、镁等杂质离子的浓度已累积至较高水平。针对这一问题,采用贫液二氧化碳初步除钙与贵液阻垢剂深度除钙联合方式,有效解决了循环液杂质含量过高的难题,从而实现矿山的安全高效生产。

## 1 试验部分

### 1.1 试验样品

该金矿循环浸出液、载金炭及再生贫炭的主要元素分析结果见表1。从表1可以看出:循环浸出液中钠、钙、镁等的质量浓度处于较高水平,分别为2 888.00 mg/L、514.40 mg/L、5.60 mg/L,钙、镁质量浓度合计为520 mg/L,易导致活性炭浅层孔道出现结垢现象。而铜、铁、镍等质量浓度合计为890 mg/L,同样易与金氰络合阴离子发生竞争性吸附。值得注意的是,一定的离子浓度对提高活性炭对离子(包括目标

收稿日期:2025-01-20; 修回日期:2025-02-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907803)

作者简介:白 杨(1992—),男,工程师,从事黄金选矿及科研管理工作;E-mail:byang@chinagoldintl.com

离子)的吸附作用是有帮助的,相关研究成果<sup>[13]</sup>已证实这一点。然而,当非目标离子浓度过高时,会加速活性炭的污染进程,导致活性炭失去活性,进而影响整个工艺的运行效果。

表 1 循环浸出液、载金炭及再生贫炭主要元素分析结果  
Table 1 Analysis results of major elements in circulating leaching solution, gold-loaded carbon and regenerated barren carbon

| 指标                             | Au                   | Na       | Ca     | Mg    | Cu     | Fe     | Ni    |
|--------------------------------|----------------------|----------|--------|-------|--------|--------|-------|
| w(载金炭)/%                       | 489.70 <sup>1)</sup> | —        | 3.20   | 0.069 | 0.10   | 0.27   | 0.83  |
| w(再生贫炭)/%                      | 48.22 <sup>1)</sup>  | —        | 2.05   | 0.064 | 0.032  | 0.18   | 0.62  |
| ρ(循环浸出液)/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 0.16                 | 2 888.00 | 514.40 | 5.60  | 112.60 | 752.00 | 25.40 |

注:1)单位为 g/t。

贵液采集自堆浸贵液管道,pH 值为 8.18,含氰根离子(CN<sup>-</sup>)为 0.30×10<sup>-4</sup>,金质量浓度为 0.16 mg/L。

1.2 阻垢剂

理想的阻垢剂需要具备螯合溶液中易形成垢体钙、镁等杂质的能力,同时不能与重金属发生反应,尤其要避免与 CN<sup>-</sup>竞争络合金<sup>[14-15]</sup>。试验选用 3 种螯合阻垢剂,代号分别为 AS、DN3 和 LN6。其中,AS 阻垢剂是一种有机阴离子共聚物型阻垢剂,有效成分为聚天冬氨酸钠(PASP)。在钙、镁与碳酸根离子或氢氧根离子发生反应过程中,AS 阻垢剂能够阻碍碳酸钙、碳酸镁等这类垢体晶格的正常形成,从而破坏垢体的生成与积累。值得注意的是,其不会与重金属发生配位或络合反应。同时,AS 阻垢剂的分子量大小合理,能够避免被活性炭吸附,确保其在实际应用中发挥稳定的阻垢作用<sup>[16-17]</sup>。DN3 阻垢剂属于含磷类聚合物阻垢剂,含磷官能团可以与钙、镁等金属离子形成稳定的可溶性络合物。此外,聚合物阻垢剂通常具备螯合能力,其基本原理是凭借对产垢离子的“螯合增溶”作用,通过引发“晶格畸变”来提高产垢离子的平衡浓度<sup>[18]</sup>,从而达到良好的阻垢效果。LN6 阻垢剂为一种链状磷酸盐类阻垢剂,与磷酸聚合物有所不同,它不具备螯合作用<sup>[19]</sup>,但在特定的应用场景中,依然能发挥出独特的阻垢性能。

1.3 试验方法

1.3.1 贫液二氧化碳除钙

试验样品为现场采集的贫液,以 Ca 质量浓度作为筛选最佳条件的关键指标。二氧化碳除钙试验条件:取 2 L 贫液,环境温度为 15 ℃,利用氢氧化钠调节 pH 值至 11.5~12.0,搅拌转速为 348 r/min,压力维持在 5 MPa,试验装置见图 1。该装置主要由二氧化碳储气钢瓶、减压阀、高压管、气体流量计、一拖四分流阀,以及位于搅拌槽内充气末端的雾化器构成。二氧化碳按照设定的流量和压力,通过雾化器均匀地分散

到搅拌槽中,从而实现对钙、镁的去除。



图 1 二氧化碳除钙试验装置

Fig. 1 Test equipment for calcium removal with carbon dioxide

1.3.2 贵液阻垢剂除钙

按照一定比例将阻垢剂加入 500 mL 贵液中,以中等强度搅拌使其充分混合,之后加入活性炭,进行充分的吸附反应;吸附完成后,对载金炭中的金及其他金属进行测定,以评估阻垢剂对活性炭吸附金的促进效果。

2 结果与讨论

2.1 贫液二氧化碳除钙试验

2.1.1 二氧化碳充气压力试验

二氧化碳充气压力与饱和溶解时间规律试验结果见表 2。试验发现:当二氧化碳溶解于体系后,随着充气压力的增加,体系 pH 逐渐降低,并最终稳定在 6.5 左右。沉淀反应发生的 pH 值为 10~12;而当 pH 值低于 9.5 时,碳酸钙开始发生溶解现象。进一步研究发现,碳酸钙沉淀速度随着充气压力的增大及二氧化碳溶解度的提高而加快。然而,充气压力过高,不仅会造成二氧化碳浪费,还可能引发碳酸钙返溶,影响整个反应进程和试验效果。综合考虑沉淀效率及 pH 的有效控制,二氧化碳适宜充气压力设定为 0.25 MPa。

表 2 二氧化碳充气压力与饱和溶解时间规律试验结果

Table 2 Test results of the rules of carbon dioxide aeration pressure and saturated dissolution time

| 充气压力/<br>MPa | 流量/<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 充气系数/<br>[m <sup>3</sup> ·(m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )] | 饱和溶解<br>气量/L | 饱和溶解<br>时间/min |
|--------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| 0.15         | 0.10                                      | 5.00                                                           | 19.49        | 11.67          |
| 0.20         | 0.16                                      | 8.00                                                           | 24.51        | 9.50           |
| 0.25         | 0.21                                      | 10.50                                                          | 19.25        | 5.50           |
| 0.30         | 0.35                                      | 17.50                                                          | 12.80        | 2.17           |

2.1.2 反应 pH 试验

二氧化碳沉淀钙效果受 pH 影响显著。为了能够稳定地去除钙离子,需要精准调控二氧化碳的浓度、

流量及作用时间,使其契合碳酸钙沉淀所要求的pH范围。试验结果见表3。

表3 反应pH试验结果

| Table 3 Test results of reaction pH |          |                                                     |
|-------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------|
| 反应pH值                               | 充气压力/MPa | 反应现象                                                |
| 10.3                                | 0.25     | pH快速下降,未发生沉淀反应                                      |
| 11.0                                | 0.25     | pH快速下降,充气40 s后pH值降至10.4,发生沉淀反应;pH值降至8.8溶解完全,反应不稳定   |
| 12.0                                | 0.25     | pH快速下降,充气40 s后pH值降至11.2,发生沉淀反应;pH降至8.8溶解完全,反应较充分、稳定 |

从表3可以看出:pH值为12.0时,反应较充分、稳定。在实际生产过程中,建议将反应pH值调整至11.5~12.0。综合考量,推荐采用石灰+CO<sub>2</sub>沉淀法,这与文献[14]报道内容高度相符。

2.1.3 反应时间试验

反应时间试验结果见表4。从表4可以看出:反应时间为1.5 h时,钙去除率达96.54%;再延长反应时间,钙去除率增幅减缓。因此,试验确定反应时间为1.5 h。

表4 反应时间试验结果

| Table 4 Test results of reaction time |         |                              |         |
|---------------------------------------|---------|------------------------------|---------|
| 反应时间/h                                | 累积液体积/L | Ca质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | Ca去除率/% |
| 1                                     | 10.88   | 63.27                        | 88.07   |
| 1.5                                   | 15.08   | 18.35                        | 96.54   |
| 2                                     | 19.28   | 17.71                        | 96.66   |
| 2.5                                   | 23.48   | 15.88                        | 97.00   |

综合系列试验结果,贫液二氧化碳除钙的最佳工艺参数为:反应pH值调节至11.5~12.0,且在整个反应过程中,体系pH值稳定在10.5~11.0,充气压力0.25 MPa,反应时间1.5 h。在此工艺条件下,钙去除率稳定在90%以上。

2.2 贵液阻垢剂除钙试验

实际生产流程中,在贫液泵送上堆及浸出过程中还会有钙、镁离子持续溶解。鉴于此,为保障后续工艺的顺利进行,当贵液进入活性炭吸附环节时,必须添加适量的阻垢剂。这不仅能够实现深度除钙,有效降低溶液中钙含量,还能借助阻垢剂的特性助力吸附过程,提升吸附效率,进而保障整个工艺的高效、稳定运行,实现预期生产目标。

2.2.1 有无阻垢剂对比试验

为探究阻垢剂对活性炭吸附金氰络合阴离子的作用效果,试验选用DN3阻垢剂,进行无阻垢剂及阻垢剂用量分别为400 mg/L、800 mg/L对比试验。试验流程见图2,结果见表5、表6。

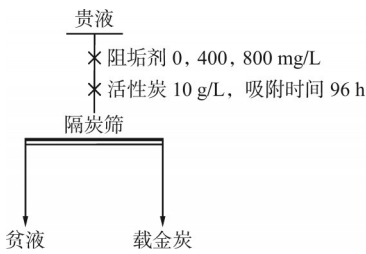


图2 贵液阻垢剂除钙试验流程

Fig. 2 Test flowchart of calcium removal with scale inhibitor for pregnant solutions

表5 有无阻垢剂对比试验结果

Table 5 Comparative test results with and without scale inhibitor

| 阻垢剂用量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 指标                          | Au                  | Ca     | Mg    | Cu    | Fe     | Ni   |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------|-------|-------|--------|------|
| 0                           | w(载金炭)/%                    | 51.70 <sup>1)</sup> | 4.15   | 0.081 | 1.32  | 0.68   | 0.65 |
| 400                         |                             | 59.70 <sup>1)</sup> | 3.72   | 0.081 | 1.25  | 0.46   | 0.62 |
| 800                         |                             | 64.09 <sup>1)</sup> | 2.91   | 0.080 | 1.21  | 0.26   | 0.60 |
| 0                           | ρ(贫液)/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 0.125               | 304.20 | 2.35  | 13.11 | 530.56 | 0.96 |
| 400                         |                             | 0.045               | 347.60 | 2.80  | 13.44 | 529.00 | 1.28 |
| 800                         |                             | 0.001               | 426.45 | 3.94  | 13.89 | 540.50 | 2.25 |

注:1)单位为g/t。

表6 阻垢剂对金吸附率的影响

Table 6 Effect of scale inhibitor on gold adsorption rate

| 阻垢剂用量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 金吸附率/% |
|-----------------------------|--------|
| 0                           | 21.88  |
| 400                         | 71.88  |
| 800                         | 99.38  |

从表5、表6可以看出:随着阻垢剂的添加及其用量的逐步增加,载金炭中杂质的含量呈逐渐降低趋势。其中,钙含量下降幅度尤为显著。同时,金吸附速度明显加快,金吸附率大幅增长。

2.2.2 阻垢剂优选试验

试验选择AS、DN3和LN6等3种阻垢剂,在活性炭用量8 g/L,吸附时间10 h条件下,进行阻垢剂优选试验,结果见表7。

表7 阻垢剂优选试验结果

Table 7 Test results of optimal selection of scale inhibitor

| 阻垢剂 | 阻垢剂用量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | ρ(贫液金)/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 金吸附率/% |
|-----|-----------------------------|------------------------------|--------|
|     | 0                           | 0.073                        | 53.50  |
| AS  | 40                          | 0.041                        | 73.89  |
| DN3 | 800                         | 0.048                        | 69.43  |
| LN6 | 800                         | 0.061                        | 61.15  |

从表7可以看出:不同类型阻垢剂均能够提升金吸附率。其中,AS阻垢剂为有机阻垢剂,在提高金吸附率方面表现尤为显著,DN3阻垢剂次之。综合考量阻垢剂性能与成本后,最终选定DN3阻垢剂。

2.2.3 阻垢剂用量试验

DN3阻垢剂用量试验结果见表8。从表8可以看出:随着DN3阻垢剂用量的增加,金吸附率呈先上升后降低趋势。当DN3阻垢剂用量为900 mg/L时,金吸附率达到最大,为70.70%;继续增加DN3阻垢剂用量,金吸附率缓慢降低。因此,试验确定DN3阻垢剂最佳用量为900 mg/L。

表 8 DN3 阻垢剂用量试验结果

Table 8 Test results of DN3 scale inhibitor dosages

| DN3阻垢剂用量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | $\rho$ (贫液金)/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 金吸附率/% |
|--------------------------------|------------------------------------|--------|
| 300                            | 0.064                              | 59.24  |
| 500                            | 0.060                              | 61.78  |
| 800                            | 0.052                              | 66.88  |
| 900                            | 0.046                              | 70.70  |
| 1 000                          | 0.048                              | 69.43  |
| 1 100                          | 0.050                              | 68.15  |
| 1 200                          | 0.048                              | 69.43  |

2.2.4 连续试验

使用氢氧化钠将贵液pH值从初始的8.18调节至10.26。取1 000 mL贵液,按照现场4 g/L的标准加入贫炭,DN3阻垢剂用量900 mg/L,以2 r/min低速搅拌的方式进行吸附。每吸附24 h后,进行炭液分离,等量更换贵液,再次进行24 h吸附,重复进行10次,累积吸附贵液量达10 L,总吸附时间为240 h。吸附后尾液混合均匀,取样分析,并与无阻垢剂吸附试验进行对比,结果见表9。

表 9 连续吸附试验结果

Table 9 Test results of continuous carbon adsorption

| 指标                                 | 无阻垢剂吸附试验 | 阻垢剂连续吸附试验 |
|------------------------------------|----------|-----------|
| $\rho$ (尾液金)/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 0.056    | 0.035     |
| 金吸附率/%                             | 64.33    | 77.71     |
| $w$ (载金炭金)/(g·t <sup>-1</sup> )    | 210.90   | 261.30    |
| $w$ (载金炭钙)/%                       | 4.79     | 3.03      |

从表9可以看出:贵液阻垢剂除钙后,金吸附率从64.33%提升至77.71%,提高了13.38个百分点;载金炭金品位也有明显提升,提高了23.90%。这是因为溶液中的钙、镁与阻垢剂发生螯合反应,形成了稳定的螯合物,活性炭吸附钙大幅减弱,具体表现为载金炭钙质量分数降低了1.76个百分点。阻垢剂的加入,提高了活性炭金吸附量,进而降低了后续酸洗再生成本,在提高金吸附率的同时也提升了经济效益。

3 结 论

1)利用二氧化碳对贫液初步除钙的最佳条件为:贫液pH值调整至11.5~12.0,维持反应pH值10.5~11.0,充气压力0.25 MPa,反应时间1.5 h,钙去除率能

够达到90%以上。

2)在贵液中加入阻垢剂能够有效减少钙在活性炭上的吸附量,有助于提高金吸附率及载金炭金品位。在DN3阻垢剂用量900 mg/L条件下,金吸附率提高至77.71%,载金炭金品位为261.30 g/t。

3)研究表明,采用贫液二氧化碳初步除钙与贵液DN3阻垢剂深度除钙联合方式,可以有效降低整个循环体系中的钙、镁含量,增强活性炭对金的吸附能力,减少钙的沉积,降低酸洗再生成本。未来研究可进一步针对阻垢剂的种类和用量进行优化。

参 考 文 献

[1] MAZUMDER J, MOHAMMAD A. A review of green scale inhibitors: Process, types, mechanism and properties [J]. Coatings, 2020, 10 (10):928.

[2] 李沛, 郗博洋, 白杨, 等. 载金活性炭活化再生技术研究现状与进展[J]. 黄金, 2022, 43(3):61-66.

[3] 李冠华, 降向正, 刘影, 等. 堆浸循环液中氰化络合物去除试验研究[J]. 黄金, 2021, 42(5):82-86.

[4] 孙中建, 孟庆秋, 黄易周. 氰化堆浸循环液中杂质离子去除试验研究[J]. 黄金, 2019, 40(10):68-71.

[5] 李海燕. 氰化堆浸提金法贫液除杂及其回用工艺研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.

[6] 崔崇龙, 孙青波, 迟崇哲, 等. 某黄金冶炼企业高盐工艺水处理试验研究[J]. 黄金, 2024, 45(2):93-98.

[7] 严佳龙, 吴爱祥, 王洪江, 等. 酸法堆浸中矿石结垢及防垢机理研究[J]. 金属矿山, 2010(10):68-71, 150.

[8] 陈流通, 谢洪勇, 奥利陶维恩, 等. CO<sub>2</sub>注入对矿业废水中钙离子的去除[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5):259-263.

[9] 康敏, 吴天骄, 赵笑益, 等. 锂云母矿浸出液除钙、镁工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):135-138.

[10] 高馨柠. 典型废水处理单元结垢过程解析与防垢技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024.

[11] 谭广明. 膜蒸馏浓缩高盐废水过程中膜界面调控及阻垢性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.

[12] 张坚. 膜分离法对废水中易结垢物质的处理效果分析[J]. 当代化工研究, 2021(11):111-112.

[13] 杨杰, 白杨, 苗腾飞, 等. 碱性低氧环境中pH对活性炭金吸附的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(1):68-72.

[14] 樊利华, 吴东霞, 徐旭, 等. 阻垢剂螯合分散性能评价方法对比及优化[J]. 盐科学与化工, 2020, 49(7):1-6.

[15] 李火银, 员佳琦, 李攀, 等. 电化学水处理技术降低循环水硬度的实验研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(3):37-41, 47.

[16] 郝玉, 陈证旭. 阻垢剂作用机理介绍及应用前景[J]. 化学工程师, 2020, 34(11):58-61.

[17] KHORMALI A, DMITRY G, PETRAKOV D G. Laboratory investigation of a new scale inhibitor for preventing calcium carbonate precipitation in oil reservoirs and production equipment [J]. Petroleum Science, 2016, 13(2):320-327.

[18] 方曦, 杨文. 膦基 PTA-AA 共聚物防垢剂的合成及其性能评价研究[J]. 合成化学研究, 2015, 3(1):7-12.

[19] 赵洪贵, 陈朋伟, 陆山青. 二氧化碳除硬度工艺实践[J]. 硫酸工业, 2023(1):44-46.

(下转第51页)

- [17] 谢洪珍,陈淑萍,蔡创开,等.贵州某难浸金矿原矿焙烧—氰化提金工艺试验研究[J].矿产综合利用,2006(4):10-12.
- [18] 雷军.原矿焙烧—焙砂氰化工艺处理鹿峰金矿矿石研究与实践[J].黄金,2003,24(2):38-42.
- [19] 王静,赵国惠,赵俊蔚,等.含砷碳金精矿焙烧预氧化—氰化提金工艺试验研究[J].黄金,2013,34(4):49-53.
- [20] 王云燕,柴立元.硫脲在碱性介质中的电化学行为[J].中国有色金属学报,2008,18(4):733-737.

## Experimental study on curing roasting of a carbonaceous fine-grained gold ore

Guo Mei<sup>1,2</sup>, Kang Min<sup>1,2</sup>, Guo Shuanquan<sup>1,2</sup>, Wang Yonghai<sup>1,2</sup>, Yan Na<sup>1,2</sup>, Wang Xiang<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Northwest Geological Nonferrous Metals Institute Co., Ltd.;

2. Engineering & Technology Center for Comprehensive Utilization of Mineral Resources of Shaanxi Province)

**Abstract:** This study focuses on a carbonaceous fine-grained gold ore from Shaanxi Province, with a gold grade of 5.55 g/t, where native gold is extensively encapsulated by carbonaceous and siliceous minerals, hindering efficient enrichment. To address the challenges in gold extraction caused by the complex mineral structure and achieve deep carbon removal and gold recovery, a "curing roasting—cyanidation leaching" process was employed to investigate gold enrichment during progressive oxidation. Key findings include: raw ore (particle size of  $-2$  mm) cures into bricks under 15 MPa pressure; roasting the bricks at 550 °C for 16 h achieved a carbon removal rate of 87.06 %; under optimized conditions (grinding fineness of  $-0.074$  mm accounting for 75 %, eco-friendly gold leaching agent dosage of 2 000 g/t, pulp density of 40 %, pH > 11, and 24 h cyanidation at room temperature), the maximum gold leaching rate reached 91.68 %. This research provides technical guidance for the industrial utilization of carbonaceous fine-grained gold ores.

**Keywords:** fine-grained gold; gold extraction; curing; roasting; carbon removal; cyanidation; leaching rate

(上接第 45 页)

## Experimental study on deep calcium removal from large-scale heap leaching circulating solution

Bai Yang

(Inner Mongolia Pacific Mining Co., Ltd.)

**Abstract:** In response to the accumulation of base metal cations such as calcium and magnesium during long-term heap leaching operations at a gold mine, which negatively affects production efficiency and quality, a combined technical scheme was proposed involving preliminary calcium removal from barren solution using carbon dioxide and deep calcium removal from pregnant solution using a scale inhibitor. Experimental results determined the optimal process parameters: adjusting the pH of the barren solution to 11.5–12.0, maintaining the carbon dioxide injection pressure at 0.25 MPa, and setting the reaction time to 1.5 h. Under these conditions, the preliminary calcium removal efficiency from the barren solution can stably exceed 90 %. By adding the optimized DN3 scale inhibitor to the pregnant solution at a dosage of 900 mg/L, the calcium adsorption on gold-loaded carbon was reduced by 1.76 percentage points, while the gold adsorption rate increased by 13.38 percentage points, and the cost of acid washing regeneration was significantly reduced. Continuous testing demonstrated that this combined technique effectively reduces the impact of calcium and magnesium ions, enhances gold adsorption, and plays a significant role in improving the production process.

**Keywords:** heap leaching circulating solution; calcium removal by carbon dioxide; scale inhibitor; adsorption enhancement; gold metallurgy; activated carbon