

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2024.03.008

某难处理金矿生物预氧化

谭巧义^{1,2}, 高立强³, 贾先兵^{1,2}, 贾炎^{1,2}, 孙和云^{1,2}, 牛晓鹏^{1,2}, 赵海平^{3,4}, 阮仁满^{1,2}

- (1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190;
2. 战略金属资源绿色循环利用国家工程研究中心, 北京 100190;
3. 北方矿业有限责任公司, 北京 100053;
4. 中关村科技园区西城园管理委员会, 博士后科研工作站, 北方矿业有限责任公司分站, 北京 100053)

摘要: 某金矿石中黄铁矿含量 5.31%、氧化率 6.02%, 直接氰化金浸出率仅 27.78%, 属典型的低品位硫化物包裹型难处理金矿。为评估生物堆浸预氧化工艺对该矿石的工业化应用前景, 开展了直接氰化试验、生物搅拌预氧化-氰化试验和生物柱浸预氧化-氰化试验, 考察了黄铁矿氧化率和金浸出率的关系以及温度对黄铁矿氧化率和金浸出率的影响。生物柱浸试验获得良好指标: 原生矿破碎至 $D_{80}=5.5$ mm, 在室温条件下 (8~30 °C) 预氧化 221 d 后, 黄铁矿氧化率 52.30%, 金的浸出率为 62.70%, 氰化渣金品位为 0.47 g/t, 较直接氰化浸出金浸出率 (27.78%) 提高 34.92 个百分点。

关键词: 难处理金矿; 生物预氧化; 黄铁矿; 柱浸

中图分类号: TF803.21; TF831

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2024)03-0063-07

Biological Preoxidation of a Refractory Gold Ore

TAN Qiaoyi¹, GAO Liqiang³, JIA Xianbing^{1,2}, JIA Yan^{1,2}, SUN Heyun^{1,2}, NIU Xiaopeng^{1,2},
ZHAO Haiping^{3,4}, RUAN Renman^{1,2}

- (1. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. National Engineering Research Center of Green Recycling for Strategic Metal Resources, Beijing 100190, China;
3. Norin Mining Limited, Beijing 100053, China;
4. Management Committee of Zhongguancun Science Park's Xicheng Park, Postdoctoral Programme, Norin Mining Limited Branch, Beijing 100053, China)

Abstract: A gold ore with high pyrite content (5.31%) and low oxidation rate (6.02%) belongs to a typical low-grade refractory sulfidic gold-bearing ore, the gold leaching rate by a direct cyanide-leaching was only 27.78%. In order to evaluate the industrial application prospect of bio-preoxidation heap leaching process, direct cyanide leaching test, bio-stirring pre-oxidation test and bio-column leaching test were carried out to investigate the relationship between pyrite oxidation rate and gold leaching rate and the effect of temperature on pyrite oxidation rate and gold leaching rate. The results of bio-column leaching test showed that under the conditions of $D_{80}=5.5$ mm and at room temperature (8–30 °C), about 52.30% of the pyrite was oxidized after 221 days, the leaching rate of gold came to 62.70%, which was 34.92 percentage points higher than that of direct cyanide leaching (27.78%), and the gold grade of leaching residue can be decreased to 0.47 g/t.

Key words: refractory gold ores; biological preoxidation; pyrite; column leaching tests

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51674231)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51674231)

作者简介: 谭巧义 (1986—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事生物冶金理论及工程技术研究。

通信作者: 阮仁满 (1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事有色金属矿物生物冶金与矿物加工技术研究。

赵海平 (1994—), 男, 博士, 工程师, 主要从事有色金属矿物加工与湿法冶金技术研究。

引用格式: 谭巧义, 高立强, 贾先兵, 等. 某难处理金矿生物预氧化[J]. 有色金属工程, 2024, 14(3): 63-69.

TAN Qiaoyi, GAO Liqiang, JIA Xianbing, et al. Biological Preoxidation of a Refractory Gold Ore[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(3): 63-69.

难处理金矿石一般指直接氰化浸出时金浸出率小于80%的金矿石^[1-2]。目前难处理金矿石的储量在世界黄金总储量中的占比超过了60%。我国难处理金矿占比也不低,已经探明的黄金储量中约有1/3属于难处理金矿石^[3-4]。在世界黄金的产量中,30%以上来自于难处理金矿石,随着矿产资源的不断减少,难处理金矿的占比还将不断升高^[2,5-6]。随着高品位易处理的黄金资源的不断开采,低品位难处理的金矿石必然成为未来金矿资源的主体^[7],所以难处理金矿石的预处理技术的开发对金矿石资源未来的利用十分重要。

难处理金矿一般分为硫化矿型、碳质矿型和碲化矿型难处理金矿,其中硫化矿型难处理金矿石是最主要的类型,占70%以上^[8]。硫化矿型难处理金矿中的金常被以黄铁矿、毒砂等为主的硫化矿物包裹,并且呈微细粒浸染状存在,因此在氰化过程中金很难接触到浸出液,从而导致金的浸出率低^[9]。为了提高难处理金矿石的金浸出率,必须采取预处理措施,使得被包裹的金暴露出来。

目前难处理金矿石采取的预处理技术主要包括焙烧法、热压氧化法和生物氧化法,这三种预处理工艺均能氧化硫化矿物,使被包裹的金充分暴露,从而提高金的浸出率,工艺成熟且获得了大规模的工业应用^[10]。焙烧氧化预处理技术,反应速度快,适应性强,可以综合回收砷、硫等伴生元素。但燃烧过程产生大量的SO₂和As₂O₃等有害气体,生态问题突出。热压氧化预处理技术,金的回收率较高、原料适应性强,可有效解决砷害问题、没有烟气污染问题。但该投资成本高,设备要求高、中和费用较高^[11]。生物氧化预处理是通过微生物的氧化作用将包裹金矿物的硫化物氧化,使被包裹的金能够充分暴露出来,矿石中的金能有效接触到浸出液,实现高效的回收^[12]。生物法具有环境友好,投资少、运行成本低,能耗低,工艺简单等特点,获得了人们的关注并得以快速发展^[13-14]。

生物预处理技术包括难处理金矿生物搅拌预处理和生物堆浸预处理。难处理金矿生物搅拌预处理适用于高品位金精矿,成本较高,应用较广,国内外数十个厂家采用该技术进行生产^[15]。难处理金矿

生物堆浸预处理适用于低品位原矿石,成本低,国内尚处于研究阶段,全球未见成功的工业案例。生物堆浸在操作以及成本方面具有优势,但是由于矿石颗粒大、反应慢、反应周期长,以及通风条件不好、温度易变化等因素导致堆浸处理效率低^[16]。随着矿产资源日益开采,高品位易处理矿石日趋匮乏,而低品位难处理矿石的开采越来越受到人们的重视。生物堆浸预氧化具有成本低、流程短、投资低、条件温和易操作、能耗少和对环境友好等优点。在用其他方法不能经济有效提取金时,生物堆浸预氧化法对于低品位难处理金矿石是优选方案。

美国Newmont黄金公司,经过耗资数千万美元、历时十余年的研究开发后,于1999年建成世界上第一家生物堆浸预氧化工厂,处理卡林型低品位金矿,共计处理原矿880万t,累计产金12.2t。6年平均生产指标为:预氧化160d,氧化率22%,金浸出率53%;而设计指标为:预氧化150d,氧化率30%,金回收率71%,实际生产未能达到设计指标,生产连年亏损,导致该系统于2005年关闭。该技术在Quarry金矿的商业应用过程中,由于矿石性质变化,劫金碳含量升高,后续氰化无奈采用搅拌浸出,成本大幅升高,导致该技术的大规模商业应用夭折。可见合适的矿石性质,对该技术的应用也至关重要。

矿物学研究结果表明,某原生矿中金大多以微细粒包裹或浸染于硫化物与石英中,硫化物包裹金是影响金浸出主要原因之一,为典型的低品位硫化物包裹型难处理金矿,未发现劫金有机碳,且碱性脉石含量低,其矿石性质非常适合生物堆浸预氧化技术,可望采用堆浸预氧化-堆浸氰化工艺,成本低,竞争力强。

1 试验材料与方法

1.1 原矿化学组成

某原生矿(JX)样品经细磨后(<74 μm)进行化学多元素分析,其中金的测试方法为火法测试,其结果见表1,该矿石金含量为1.26 g/t,铁含量为3.27%,硫含量为3.15%,碳含量为0.18%,砷含量为0.17%。

表1 原矿化学多元素分析

Table 1 Chemical analysis result of the run-of-mine ore

Composition	Au*	Fe	S	C	TOC	As	S ₂ ⁻	Pyrite
Contents	1.26	3.27	3.15	0.18	0.11	0.17	2.83	5.31

Note: The unit of * is g/t.

对矿石样品 JX 进行铁的物相分析,结果见表 2。根据分析结果可知,原生矿 JX 中黄铁矿占矿

物相对含量的 4.18%,赤褐铁矿占矿物相对含量的 0.27%,矿石氧化率为 6.02%。

表 2 原生矿 JX 铁物相分析

Table 2 Iron department of the primary ore

/%

Ore type	Iron department	Iron carbonate	Hematite-limonite ore	Pyrite	Magnetite	Silicate iron	Total
Primary JX	Content	0.22	0.20	1.95	0.17	0.35	2.89
	Relative content	7.61	6.92	67.47	5.88	12.11	100.0

1.2 试验方法

1.2.1 直接氰化浸出

原生矿 JX 不经预氧化,在粒度 $D_{80}=5.5$ mm 和 $D_{80}=0.074$ mm 两种粒度下,考察其直接氰化金浸出率。液固比 2:1,通过氧化钙调节矿浆 pH 值为 11,然后按照 3 kg/t 矿石的量加入氰化钠,氰化时间 41 h,氰化结束后将矿浆过滤,滤饼烘干后称重并化验金含量。

1.2.2 生物搅拌预氧化

9K 基础培养基(铁浓度为 6 g/L,pH 值为 1.5)中接入浸矿微生物,放入摇床中恒温(35℃)培养 2~3 d,等微生物进入对数生长期后,加入原生矿 JX,矿石粒度为 $D_{80}=5.5$ mm,进行生物预氧化,预氧化过程中定期取样,检测溶液的 pH 值、ORP、TFe 以及细菌数量等。预氧化结束后,分别使用稀硫酸和蒸馏水对预氧化渣进行洗涤后再进行后续氰化试验,氰化试验方法同 1.2.1。

1.2.3 生物柱浸预氧化

1)黄铁矿氧化率与金浸出率的关系

为比较不同黄铁矿氧化程度下金的氰化浸出率,采用柱浸试验在不同预氧化时间下获得不同的黄铁矿氧化率以及其预氧化后金的氰化浸出率。柱浸试验温度设置为 35℃,将粒度为 $D_{80}=5.5$ mm 的原生矿 JX 装入浸矿柱中,利用清水作为喷淋液,同时溶液进行循环浸出。预氧化过程中定期检测浸出溶液的 ORP 和 pH 值,当溶液 pH 值降低至小于 3.5 时,接入实验室分离驯化的浸矿微生物。定期

检测溶液的 pH 值、ORP、TFe 以及细菌数量等。分别在浸出第 146、188 和 223 天,停止喷淋,使用 5 g/L 的稀硫酸淋洗柱子后,每次缩分出 1/3 矿量的预氧化渣分别进行氰化试验,检验黄铁矿氧化率及金的可浸性。

2)温度对黄铁矿氧化率及金浸出率的影响

黄铁矿氧化动力学与温度强相关,温度升高有利于黄铁矿氧化,但温度太高又不利于微生物的生长,微生物活性差亚铁无法及时氧化,反过来又影响黄铁矿的氧化。试验设置室温、35℃、45℃,此温度为细菌相对较适应的温度,考察不同温度下黄铁矿的氧化速率及预氧化后金的可浸性,以期获得原生矿高效预氧化的关键工艺参数与技术指标,为推荐适合现场工业条件的堆浸预氧化工艺流程与操作参数提供依据。

柱浸试验采用控温不锈钢浸出试验装置。原生矿 JX($D_{80}=5.5$ mm)装入浸矿柱中,喷淋液为含菌溶液,溶液进行循环浸出,预氧化过程中定期检测溶液的 pH 值、ORP、TFe 和细菌数量等,预氧化 221 d 后,分别使用稀硫酸和蒸馏水对预氧化渣进行洗涤后再进行后续氰化试验,检验黄铁矿氧化率及金的可浸性。

2 结果与分析

2.1 直接氰化

原生矿 JX 不经预氧化,考察其直接氰化金浸出率,试验结果见表 3。

表 3 原生矿直接氰化金浸出率

Table 3 Direct cyanidation of the primary ore

Crush size	Cyanidation method	Cyanidation time/h	Residue Au/(g·t ⁻¹)	Gold recovery/%
$D_{80}=5.5$ mm	Rolling	41	0.91	27.78
$D_{80}=74$ μm	Stirring	41	0.83	34.92

原生矿 JX 破碎至 $D_{80}=5.5$ mm,金浸出率为 27.78%,原生矿全泥氰化浸出($D_{80}=74$ μm),金浸出率也只有 34.92%。全泥氰化金浸出率相对 $D_{80}=5.5$ mm 氰化金浸出率提高约七个百分点,但金的浸出率仍然很低,属于难处理金矿石,采用常规

的氰化浸出是不合适的。

2.2 生物搅拌预氧化-氰化

原生矿($D_{80}=5.5$ mm)生物搅拌浸出过程中 pH 值、ORP 及细菌浓度变化见图 1~图 3。原生矿 JX 在粒度 $D_{80}=5.5$ mm 条件下的生物搅拌浸出过

程中,由于黄铁矿不断氧化放酸,使得溶液 pH 值保持一直呈现下降的趋势。在预氧化 50 d 时溶液电位上升至 600 mV 以上。

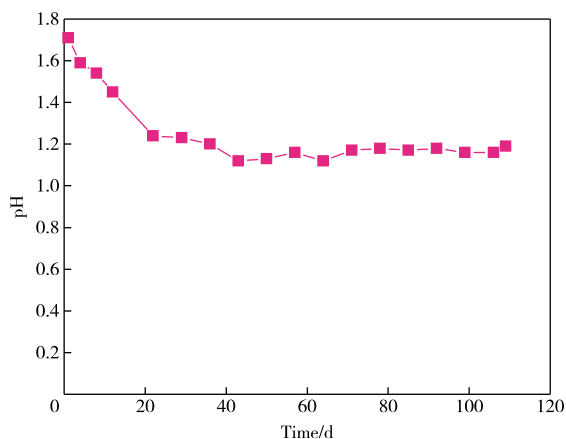


图1 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)生物搅拌浸出过程中 pH 值变化
Fig. 1 Profiles of pH value variation as time during biological agitate leaching of the primary ores at $D_{80}=5.5$ mm

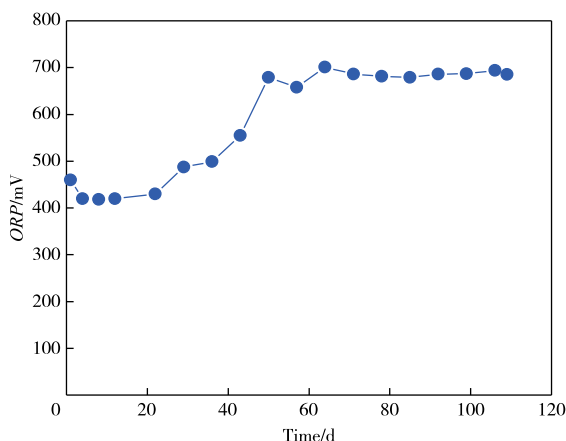


图2 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)生物搅拌浸出过程中 ORP 变化
Fig. 2 Profiles of ORP variation as time during biological agitate leaching of the primary ores at $D_{80}=5.5$ mm

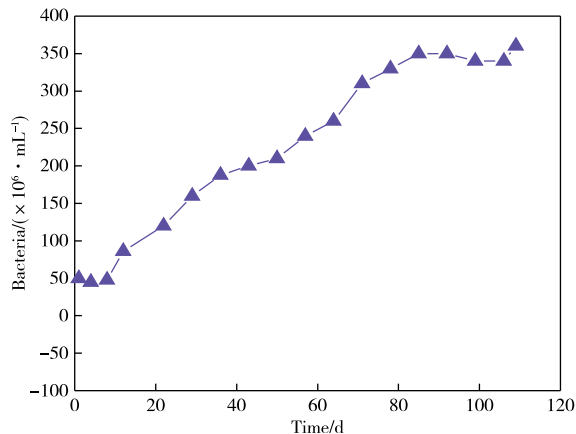


图3 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)生物搅拌浸出过程中细菌浓度变化
Fig. 3 Profiles of bacterial concentration variation as time during biological agitate leaching of the primary ores at $D_{80}=5.5$ mm

生物搅拌预氧化 106 d 后,黄铁矿氧化率为 90.11%,对预氧化渣进行滚瓶氰化浸出,浸渣金品位可降低至 0.28 g/t,金的浸出率为 77.78%,相对不经预氧化金的浸出率提高了约 50 个百分点,预氧化效果明显,矿石展现了生物预氧化工艺的良好应用前景。

2.3 生物柱浸预氧化-氰化

2.3.1 黄铁矿氧化率对金浸出率的影响

原生矿生物柱浸过程中,pH 值持续降低(图 4)。预氧化的初始溶液为未添加酸和铁清水,随着预氧化的进行,黄铁矿不断氧化产酸,所以溶液 pH 值持续降低。预氧化第 30 天时,溶液 pH 值降低至 3.5 以下,此时接入高效浸矿微生物,接种后黄铁矿快速氧化释放酸和铁,浸出液 pH 值继续降低,同时溶液中总铁浓度也升高。原生矿($D_{80}=5.5$ mm)清水启动浸出过程中 ORP 和细菌浓度变化分别见图 5 和图 6。预氧化第 40 天后,pH 值降低至 1.5 以内,同时溶液电位上升至 650 mV 以上,因为浸矿细菌的

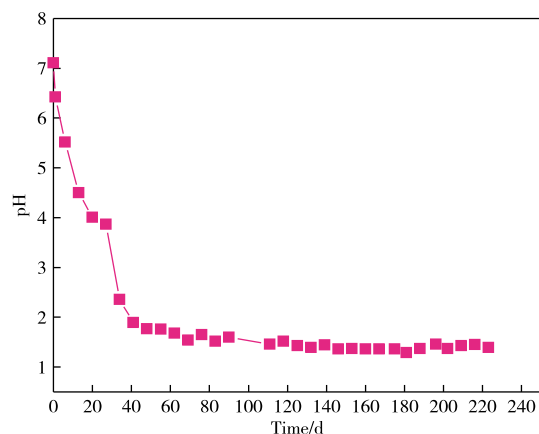


图4 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)柱浸出过程中 pH 值变化
Fig. 4 Profiles of pH value variation as time during biological column leaching of the primary ores at $D_{80}=5.5$ mm

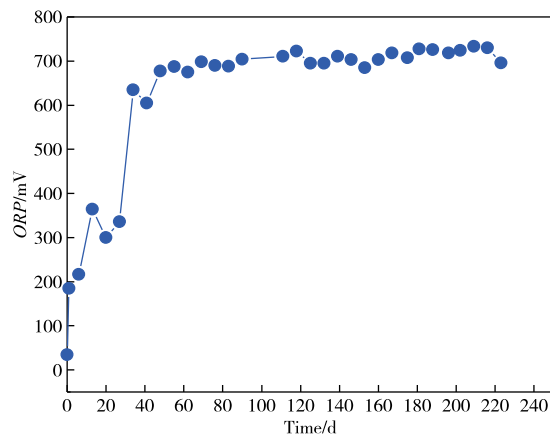


图5 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)清水启动浸出过程中 ORP 变化
Fig. 5 Profiles of ORP variation as time during biological column leaching of the primary ores at $D_{80}=5.5$ mm

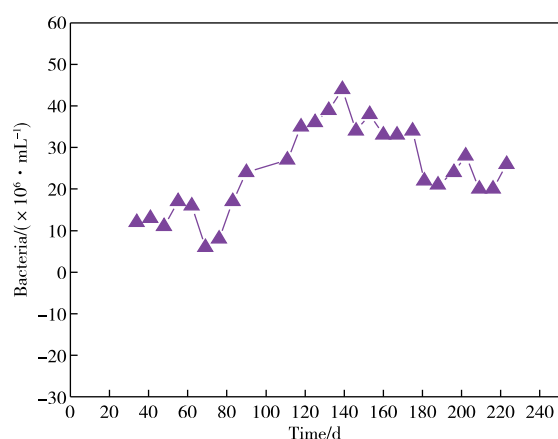


图6 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)清水启动浸出过程中细菌浓度变化

Fig. 6 Profiles of bacterial concentration variation as time during biological column leaching of the primary ores at $D_{80}=5.5$ mm

作用使得溶液中的亚铁及时氧化为高铁,而高电位将更有利于黄铁矿的氧化。

表4 原生矿($D_{80}=5.5$ mm)生物柱浸预氧化及氰化浸出结果

Table 4 Column bio-oxidation and cyanidation of the primary ore($D_{80}=5.5$ mm)

Pre-oxidation method	Pre-oxidation time/d	S_2^{2-} of residue/%	Pyrite oxidation rate/%	Au of residue/($g \cdot t^{-1}$)	Gold recovery/%	Recovery development/%
Column bio-oxidation	146	0.75	73.50	0.50	60.32	+32.54
	188	0.65	77.03	0.44	65.08	+37.30
	223	0.50	82.33	0.40	68.25	+40.47
Cyanide directly	/	2.83	/	0.91	27.78	/

2.3.2 温度对黄铁矿氧化率及金浸出率的影响

温度是黄铁矿氧化的关键影响因素,升温可以促进黄铁矿氧化^[17]。同时微生物的生长也与温度密切相关,不同微生物的最适温度不同,当温度大于在60℃时铁氧化菌将完全丧失铁氧化的能力^[18]。研究还表明,嗜热菌氧化亚铁的能力要远低于中等嗜热菌^[19],因此在难处理金矿的生物搅拌预氧化过程中,为了维持微生物的活性,作业温度一般低于45℃。另外,黄铁矿的氧化是放热反应,其放热可促使矿堆温度升高,但是温度太高将抑制铁氧化微生物的氧化能力和活性,降低体系的氧化还原电位,不利于黄铁矿的氧化。

综上所述,黄铁矿氧化动力学与温度强相关,温度升高有利于黄铁矿氧化,但温度太高又不利于微生物的生长,微生物活性差亚铁无法及时氧化,反过来又影响黄铁矿的氧化。所以在生物预氧化工艺中温度是一个关键影响因素,不能过高亦不能过低,为推荐适宜的堆浸预氧化工艺参数,本试验考察了温

度对黄铁矿氧化和金浸出的影响。分别在预氧化第146、188和223天时停止喷淋,分别使用稀硫酸和蒸馏水对预氧化渣进行洗涤后再进行后续氰化试验,试验结果见表4。由结果可知:黄铁矿氧化率与金浸出率正相关。随着预氧化时间的增加,黄铁矿氧化率提高。原生矿($D_{80}=5.5$ mm)未经预氧化金浸出率仅为27.78%。预氧化146 d,黄铁矿氧化率为73.50%时,金浸出率达到60.32%;预氧化188 d,黄铁矿氧化率为77.03%,金浸出率为65.08%;预氧化223 d,黄铁矿氧化率为82.33%时,金浸出率为68.25%,相对不预氧化,金浸出率提高了40.47个百分点。

随着预氧化的进行,黄铁矿氧化速率变得缓慢,同时金浸出率的提高幅度也变小,在实际的工业应用中需合理控制预氧化时间,综合考虑预氧化成本和黄铁矿氧化率、金浸出率之间的关系,从而选择合适的黄铁矿氧化程度,而不能片面的追求金的浸出率。

度对黄铁矿氧化和金浸出的影响。

从图7可知,不同温度条件下溶液的ORP都能保持在650 mV以上,表明预氧化过程中微生物活性强,亚铁氧化能力高,能将黄铁矿氧化释放的亚铁

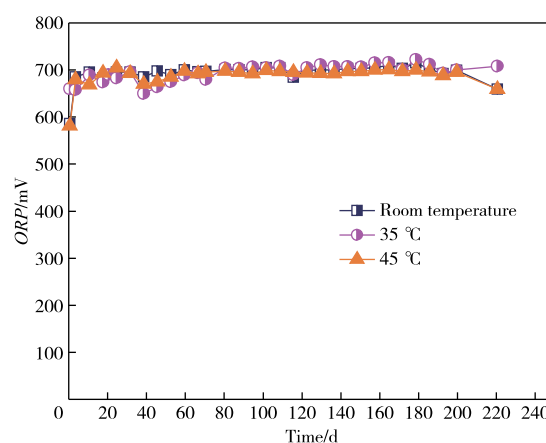


图7 原生矿不同温度条件下溶液电位监测

Fig. 7 Time profiles of the leachate potential at room temperature, 35 °C and 45 °C in column leaching

及时氧化为高铁,为矿石中黄铁矿的持续氧化源源不断地提供氧化剂。

由图 8 原生矿($D_{80}=5.5\text{ mm}$)在不同温度条件下 pH 值的变化可知,由于黄铁矿氧化放酸,所以溶液 pH 值均呈现下降趋势,35 ℃ 条件下溶液 pH 值最低,其次为 45 ℃ 条件,室温条件下溶液 pH 值最高。

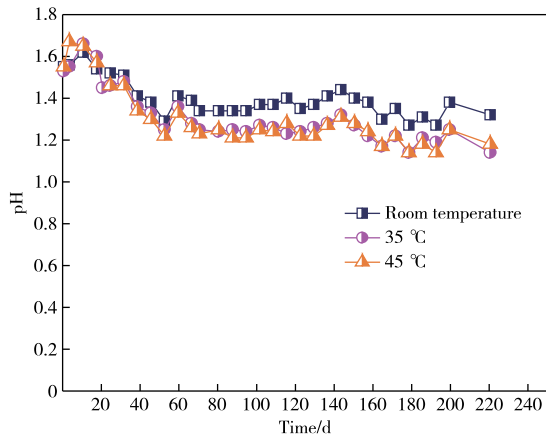


图 8 原生矿($D_{80}=5.5\text{ mm}$)不同温度条件下 pH 值监测

Fig. 8 Time profiles of the leachate pH value at room temperature, 35 °C and 45 °C in column leaching

柱浸过程中溶液中的细菌数量虽有逐渐减小的趋势(图 9),根据溶液电位变化可知,随着预氧化的进行溶液电位不断升高,代表溶液中的亚铁浓度不断降低,溶液中缺乏细菌生长所需能力,所以数量成降低趋势。另外,浸矿细菌倾向于吸附在矿石表面,矿石表面可为微生物提供吸附位点和能量,同时有利于形成生物膜而抵抗外界苛刻环境。从溶液电位

始终维持在 650 mV 以上可知微生物活性足够将溶液中的二价铁及时氧化为高铁。

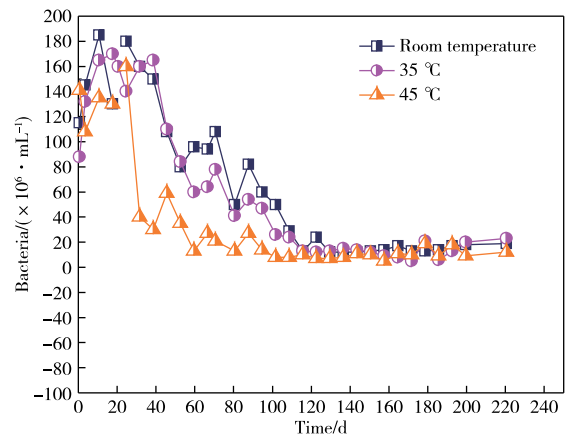


图 9 原生矿($D_{80}=5.5\text{ mm}$)不同温度条件下细菌数量

Fig. 9 Time profiles of the leachate cell numbers at room temperature, 35 °C and 45 °C in column leaching

原生矿($D_{80}=5.5\text{ mm}$)不同温度条件下生物柱浸预氧化后氰化金的浸出率见表 5。原生矿 $D_{80}=5.5\text{ mm}$ 不经预氧化直接氰化金浸出率为 27.78%,生物柱浸预氧化 221 d 后,室温预氧化后黄铁矿氧化率为 52.30%,金的浸出率为 62.70%,预氧化提高金浸出率 34.92 个百分点;35 ℃ 预氧化后黄铁矿氧化率为 74.91%,金的浸出率为 68.25%,预氧化提高金浸出率 40.47 个百分点;45 ℃ 预氧化后黄铁矿氧化率为 77.74%,金的浸出率为 63.49%,预氧化提高金浸出率 35.71 个百分点;预氧化后金浸出率得到明显提高,金浸出率均在 60% 以上。

表 5 原生矿($D_{80}=5.5\text{ mm}$)不同温度条件下生物柱浸预氧化后氰化金的浸出率

Table 5 Column bio-oxidation and cyanidation of the primary ore

Pre-oxidation method	Pyrite oxidation rate/%	Augrade of residue/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	Gold recovery/%	Recovery development/%
Cyanide directly	/	0.91	27.78	/
Column bio-oxidation(Room temperature; 8—31 ℃)	52.30	0.47	62.70	+34.92
Column bio-oxidation(35 ℃)	74.91	0.40	68.25	+40.47
Column bio-oxidation(45 ℃)	77.74	0.46	63.49	+35.71

三种不同温度下,金的浸出率差别并不十分显著。综合考虑成本及矿区所在地的气候条件,室温条件下的浸出过程具有操作简单,成本更低的优势。

3 结论

1)原生矿 JX 破碎至 $D_{80}=5.5\text{ mm}$ 金浸出率为 27.78%,原生矿全泥氰化浸出($D_{80}=74\text{ }\mu\text{m}$),金浸出率也只有 34.92%,属于典型的低品位难处理金矿石。

2)黄铁矿氧化率与金浸出率正相关,但随着预氧化的进行,黄铁矿氧化速率变得缓慢,同时金浸出率的提高幅度也变小,在工业操作过程中需综合考虑生产成本与金浸出率的关系,选择合适的氧化率。

3)根据柱浸试验结果,该难处理金矿原生矿 JX 生物堆浸预氧化在室温(8~31 ℃)条件下,预氧化 21 d 后黄铁矿氧化至 52.30%,金浸出率可达 62.70%,提高浸出率约 35 个百分点。

参考文献:

- [1] 刘志楼,杨天足. 难处理金矿的处理现状[J]. 贵金属, 2014,35(1):79-83,89.
LIU Zhilou, YANG Tianzu. Treatment status for refractory gold ores[J]. Precious Metals, 2014, 35(1): 79-83, 89.
- [2] 刘汉钊. 难处理金矿石堆浸的预处理技术[J]. 四川地质学报, 1997, 17(3): 231-233.
LIU Hanzhao. Pretreatment technique for heap leaching of refractory gold ore[J]. Acta Geologica Sichuan, 1997, 17(3): 231-233.
- [3] 臧宏. 难处理金矿的生物预氧化技术及工业应用[J]. 世界有色金属, 2018(20): 160-161.
ZANG Hong. Biological pre oxidation technology and industrial application of refractory gold ores[J]. World Nonferrous Metals, 2018(20): 160-161.
- [4] 杨振兴. 难处理金矿石选冶技术现状及发展方向[J]. 黄金, 2002, 23(7): 31-35.
YANG Zhenxing. The status quo of treating refractory gold ores[J]. Gold, 2002, 23(7): 31-35.
- [5] 苏大雄,张秋利,周军,等. 难处理金矿的预处理[J]有色金属, 2002, 54(增刊 1): 137-141.
SU Daxiong, ZHANG Qiuli, ZHOU Jun, et al. Review of refractory gold ore pre-treatments[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(Suppl. 1): 137-141.
- [6] 张磊,郭学益,田庆华,等. 难处理金矿预处理方法研究进展及工业应用[J]. 黄金, 2021, 42(6): 60-68.
ZHANG Lei, GUO Xueyi, TIAN Qinghua, et al. Research progress and industrial application of pretreatment methods for refractory gold ores [J]. Gold, 2021, 42(6): 60-68.
- [7] 马芳源,代淑娟,刘淑杰. 中国难处理金矿石研究现状[J]. 黄金, 2017, 38(1): 64-67.
MA Fangyuan, DAI Shujuan, LIU Shujie. Current research status of refractory gold ores in China[J]. Gold, 2017, 38(1): 64-67.
- [8] 田庆华,王浩,辛云涛,等. 难处理金矿预处理方法研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(2): 83-89.
TIAN Qinghua, WANG Hao, XIN Yuntao, et al. Research status of pretreatment of refractory gold ore [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(2): 83-89.
- [9] 雷占昌,虞洁,马红蕊. 难处理金矿预处理技术现状及进展[J]. 现代矿业, 2014, 30(5): 23-24, 33.
LEI Zhanchang, YU Jie, MA Hongrui. Statue and development of pretreatment technology for the refractory gold ore[J]. Modern Mining, 2014, 30(5): 23-24, 33.
- [10] 舒荣波,陶秀祥,刘亚川,等. 难处理金矿热压氧化工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2016(4): 65-69.
SHU Rongbo, TAO Xiuxiang, LIU Yachuan, et al. Research on pressure oxidation for refractory gold concentrate [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016(4): 65-69.
- [11] 王国彬,蓝卓越,赵清平,等. 浅谈卡林型金矿微生物预氧化技术研究现状[J]. 有色金属工程, 2021, 11(2): 63-72.
WANG Guobin, LAN Zhuoyue, ZHAO Qingping, et al. Discussion on the present situation and progress of bacterial pre-oxidation in carlin-type gold ore [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(2): 63-72.
- [12] 吉强. 复杂难处理金矿石的生物氧化预处理技术及发展现状[J]. 世界有色金属, 2021(9): 173-174.
JI Qiang. Biological oxidation pretreatment technology and development status of complex refractory gold ore[J]. World Nonferrous Metals, 2021(9): 173-174.
- [13] 董博文. 含砷含碳难处理金矿原矿的生物预处理-氰化提金试验 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(7): 47-49, 54.
DONG Bowen. Bio-oxidation-cyanidation of arsenic/carbon-bearing refractory gold ores [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2015(7): 47-49, 54.
- [14] 任传裕,武彪,尚鹤,等. 张其东生物预氧化-酸性硫脲浸金联合工艺[J]. 矿冶, 2020, 29(4): 62-67.
REN Chuanyu, WU Biao, SHANG He, et al. Combined process of biological pre-oxidation and gold leaching with acid thiourea [J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(4): 62-67.
- [15] 黄海辉. 难处理金矿细菌氧化的工业应用及发展方向[J]. 矿冶, 2008 17(2): 63-68.
HUANG Haihui. Industrial applications of refractory gold ores pretreated by bacterial oxidation and its future developments[J]. Mining and Metallurgy, 2008, 17(2): 63-68.
- [16] 范艳利,张晓雪,李红玉. 生物-化学两级循环反应器预处理坪定难处理金矿石[J]. 黄金, 2009, 30(7): 41-45.
FAN Yanli, ZHANG Xiaoxue, LI Hongyu. Pretreatment of Pingding refractory gold ore by continuous two-stage bio-chemical reactor in Gansu [J]. Gold, 2009, 30(7): 41-45.
- [17] LONG H, DIXON D G. Pressure oxidation of pyrite in sulfuric acid media; a kinetic study [J]. Hydrometallurgy, 2004, 73(3): 335-349.
- [18] FRANZMANN P D, HADDAD C M, HAWKES R B, et al. Effects of temperature on the rates of iron and sulfur oxidation by selected bioleaching bacteria and archaea: application of the ratkowsky equation [J]. Minerals Engineering, 2005, 18(13): 1304-1314.
- [19] PINA P S, OLIVEIRA V A, CRUZ F L S, et al. Kinetics of ferrous iron oxidation by sulfobacillus thermosulfidooxidans [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 51(3): 194-197.