

## 某难处理金精矿热压预氧化-氰化浸金实验

谭希发, 陈炳如

(紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200)

**摘要:** 对某难处理金精矿进行了热压预氧化-氰化浸金实验, 探讨热压预氧化温度、时间、氧化分压和矿浆浓度对金浸出率和氰化钠耗量的影响。结果表明, 在粒度-44  $\mu\text{m}$  占 90.74%、温度 220 $^{\circ}\text{C}$ 、矿浆浓度 25%、氧分压 0.8 MPa 和转速 750 r/min 条件下预氧化 2.5 h, 砷主要以稳定的结晶状砷酸铁或者臭葱石形式被固定在氧化渣中; 预氧化渣在矿浆浓度 33%、pH=10~11、初始氰化钠浓度 0.3% 和活性炭浓度 25 g/L 条件下氰化浸出 24 h, 与金精矿直接氰化相比, 浸出率由 11.21% 提高至 95.75%, 氰化钠耗量从 46.99 kg/t 降低至 1.36 kg/t。

**关键词:** 有色金属冶金; 难处理金精矿; 热压预氧化; 氰化; 高效回收

**中图分类号:** TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)03-0005-05

## Study on Extracting Gold from a Refractory Gold Concentrate by Hot Pressing Preoxidation and Cyanidation Leaching

TAN Xifa, CHEN Bingru

(Zijin Mining Group Co. Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China)

**Abstract:** A process involving hot pressing preoxidation and cyanidation leaching has been studied to extract gold from a refractory gold concentrate. The effects of temperature, time, partial pressure of oxidation and concentration of pulp on gold leaching rate and consumption of sodium cyanide were investigated. The results showed that arsenic would mainly be fixed in the oxidized slag in the form of stable crystalline arsenate iron or scorodite, after the refractory gold concentrate with a particle size of -44  $\mu\text{m}$  accounting for 90.74% and at a pulp concentration of 25% was preoxidized at 220 $^{\circ}\text{C}$  for 2 hours. Then the preoxidized slag was leached for 24 hours at a pH value of 10~11 by using 0.3% sodium cyanide under the condition of 33% pulp concentration and 25 g/L activated carbon concentration. The leaching rate of gold was increased to 95.75% from 11.21% obtained by direct cyanidation of gold concentrate without the preoxidation and the consumption of cyanide was reduced to 1.36 kg/t ore from 46.99 kg/t ore.

**Key words:** nonferrous metallurgy; refractory gold concentrate; hot pressing preoxidation; cyanidation; high efficiency recovery

随着黄金工业的快速发展, 易处理金矿资源日渐枯竭, 难处理金矿资源已成为行业的主要原料来源之一<sup>[1]</sup>。我国难处理金矿资源从勘探发现至今没有进行过较为精确的统计, 但业内专家比较认可的数量是总金属量在 1000 t 左右<sup>[2-3]</sup>。尽管每年都有部分难处理金矿被开发利用, 但深部或新的资源又不

断被探明, 所以我国难处理金矿资源在探明的保有储量中所占的比例也被公认为在 1/3 左右<sup>[2, 4]</sup>。此类矿石难处理原因有<sup>[3, 5-9]</sup>: 1) 金以细粒金或次显微金呈包裹或浸染状存在于黄铁矿型、砷黄铁矿型或脉石矿物矿石中, 用常规磨矿方法无法使其解离出来, 导致氰化物无法与金接触; 2) 含有铜、铋、铁、锰、

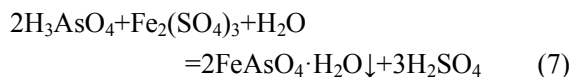
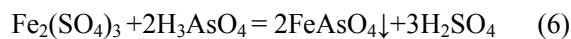
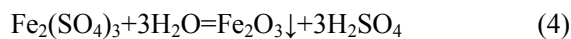
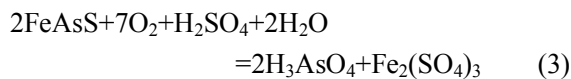
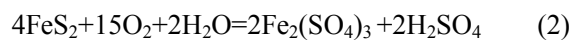
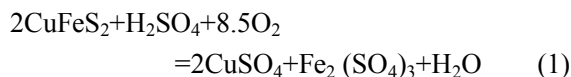
钴、镍等的金属硫化物和氧化物的金矿石，它们在氰化浸出中与金竞争氰化钠和氧，造成金浸出率低、氰化钠耗量大；3) 矿石含有有机炭、黏土等，导致已溶解的金吸附在这些矿物上，形成“劫金”作用；4) 金与碲、铋、锑等导电矿物发生反应生成金表面钝化物，严重阻碍金在阴极溶解反应的进行。

目前，难处理金矿应用及研究最普遍的预处理方法主要有焙烧氧化法<sup>[1, 10]</sup>、细菌氧化法<sup>[11-13]</sup>和热压预氧化法<sup>[6, 8, 14]</sup>。焙烧氧化法具有环境不友好、生产成本高和金浸出率不够理想等不足；细菌氧化法具有处理周期长、对矿石适应性差和金回收率较低等缺点；热压预氧化法是一种与焙烧氧化法和细菌氧化法相匹敌的预处理方法，具有反应速度快、金回收率高、环境友好和生产成本低等优点，且适应面也较细菌氧化法和焙烧氧化法广。本文采用热压氧化对某难处理金精矿进行预处理，研究氧化条件对浸出率和氰化钠耗量的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 热压预氧化原理

难处理金矿热压氧化预处理介质分为酸性热压氧化法和碱性热压氧化法。酸性或碱性热压氧化预处理的工业生产条件是在 180~225℃、1.1~3.2 MPa、且存在氧气的情况下，黄铁矿、毒砂或含金贱金属硫化物被氧化分解，硫氧化为硫酸盐，砷经过亚砷酸盐氧化为砷酸盐，使被包裹的金暴露出来<sup>[3]</sup>。难处理金矿在硫酸介质中发生下列反应<sup>[5, 8, 15-16]</sup>。



在上述温度和压力条件下，黄铁矿、毒砂被分解生成 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ 等沉淀物，绝大部分砷以较稳定的结晶状砷酸铁或者臭葱石( $\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )沉淀形式存在，不会污染环境。

### 1.2 实验原料

某难处理金精矿金属矿物和脉石矿物的含量相

当，金属矿物主要以黄铁矿和毒砂为主，非金属矿物以硅酸盐和碳酸盐矿物为主，其次是木炭碎屑。仅有极少量脉石矿物与黄铁矿简单连晶，其余均单体解离。金以超显微金矿物形式存在。金主要分布在黄铁矿、毒砂等金属硫化物中，碳酸盐、硅酸盐矿物和木炭碎屑中也含有金，还可能存在少量游离的金。矿样化学成分、矿物种类及含量、金的物相分析结果分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1 某难处理金精矿多元素分析结果

Tab.1 Mass fraction of multi-elemental analysis of the refractory gold concentrate

成分	Au/(g/t)	As	TS	Fe	TC	有机炭
$\omega/\%$	32.86	1.48	24.48	23.14	13.78	10.24
成分	$\text{SiO}_2$	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	—
$\omega/\%$	16.03	2.82	1.17	4.47	0.64	—

表 2 矿样主要矿物种类及含量

Tab.2 The main mineral species and content analysis of the mineral samples

金属矿物(52.0%)		脉石矿物(48.0%)	
矿物名称	$\omega/\%$	矿物名称	$\omega/\%$
黄铁矿	48.0	石英	15.0
毒砂	3.0	碳酸盐矿物	18.0
黄铜矿	偶见	水云母	5.0
黝铜矿	偶见	木炭碎片	10.0
褐铁矿	1.0	—	—

表 3 金的化学物相分析

Tab.3 Chemical phase analysis of gold

化学物相	自然金	连生金	硫化物包裹金	碳酸盐包裹金	其它金	合计
$\omega/(\text{g/t})$	0.46	0.96	24.58	4.35	1.76	32.11
比例/%	1.43	2.99	76.55	13.55	5.48	100

由表 3 金的化学物相分析可知，该金精矿中的金主要以硫化物包裹的形式存在，其次以碳酸盐包裹形式存在，自然金、连生金及其他形式存在的金不到 10%。

### 1.3 试剂及设备

实验所用试剂浓硫酸、氰化钠和石灰均等为生产现场工业级原料。

仪器设备：搅拌器(上海翼控机电有限公司 YK160)；GSHA-2L 实验室高压釜(威海嘉毅化工机

械有限公司)；循环水式多用真空泵(郑州长城科技公司)和PHS-3C酸度计(上海仪电科学仪器公司)。

1.4 实验方法

热压预氧化：入釜物料预先用硫酸脱除碳酸盐，记录酸用量，根据反应矿浆浓度补加清水后加入高压釜，升温至 180℃开始充氧，在不同条件下预氧化一定时间，反应结束后冷却卸压，矿浆过滤，氧化渣烘干。

氰化实验方法：用石灰调接氧化渣pH=10~11，矿浆浓度 33%，初始氰化钠浓度 0.3%，活性炭浓度 25 g/L，滚瓶氰化浸出 24 h。反应结束后固液分离。

1.5 测定及计算

金采用泡沫吸附-原子吸收分光光度计测定，游离氰根采用硝酸银滴定法测定，pH值采用PHS-3C酸度计测定。用下式计算金浸出率和氰化钠耗量：

$$R_L = \frac{\omega(\text{Au, 原样}) - \omega(\text{Au, 氰化渣})}{\omega(\text{Au, 原样})} \quad (8)$$

$$D_{\text{NaCN}} = \frac{(\rho(\text{NaCN, 初始}) - \rho(\text{NaCN, 反应后})) \times V}{\text{原矿用量}} \quad (9)$$

2 结果及讨论

2.1 直接氰化

实验条件：矿石粒度-44 mm 占 90.74%，矿浆浓度 33%、pH=10~11，初始氰化钠浓度 0.3%，活性炭浓度 25 g/L，滚瓶氰化浸出 24 h。实验结果列于表 4。

表 4 直接氰化实验结果

Tab.4 Direct cyanidation test results

氰渣产率/%	$\omega(\text{Au, 氰化渣})/(\text{g/t})$	$R_L/\%$	$D_{\text{NaCN}}/(\text{kg/t})$
99.41	29.35	11.21	46.99

从表 4 结果可看出，该难处理金精矿采用炭浸法氰化 24 h 后，氰渣中金品位为 29.35 g/t，金浸出率为 11.21%，氰化钠的耗量为 46.99 kg/t 矿，该金矿属于典型的难处理金矿<sup>[14]</sup>。

2.2 热压预氧化-氰化

2.2.1 氧化温度的影响

预氧化条件：矿石粒度-44 μm 占 90.74%，氧分压 0.9 MPa，时间 2.5 h，矿浆浓度 20%，转速 750 r/min。考察不同预氧化温度对金浸出率及氰化钠耗量的影响，结果如图 1 所示。

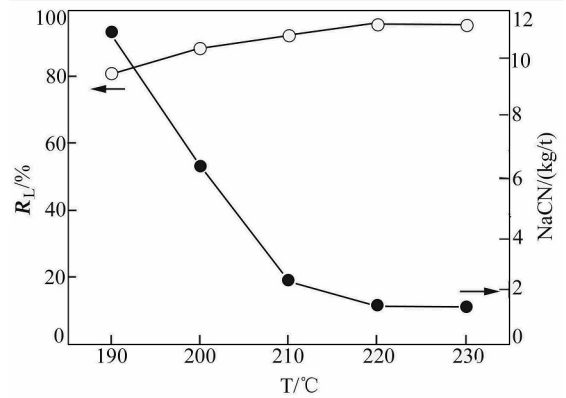


图 1 温度对金浸出率及氰化钠耗量影响

Fig.1 Effect of temperature on the gold leaching rate and sodium cyanide consumption

从图 1 可知，金的浸出率随预氧化温度的升高而增加，氰化钠耗量随预氧化温度的升高而降低。本研究当预氧化温度为 220℃时，金的氰化浸出率为 95.61%，氰化钠耗量为 1.38 kg/t，预氧化温度高于 220℃后，预氧化温度对金浸出率及氰化钠耗量影响较小。因此，预氧化温度选取 220℃为宜。

2.2.2 氧化时间的影响

预氧化条件：矿石粒度-44 μm 占 90.74%，温度 220℃，氧分压 0.9 MPa，矿浆浓度 20%，转速 750 r/min。考察不同预氧化时间对金浸出率及氰化钠耗量的影响，结果如图 2 所示。

从图 2 可知，金浸出率随预氧化时间的增加而增大，氰化钠耗量随预氧化时间的增加而降低。当预氧化时间 2.5 h 时，金浸出率为 95.66%，氰化钠耗量为 1.35 kg/t，此后增加热压预氧化时间对金浸出率和氰化钠耗量影响趋于平缓。其原因在于，经过 2.5 h 的热压预处理后，矿样中的载金硫化物已基

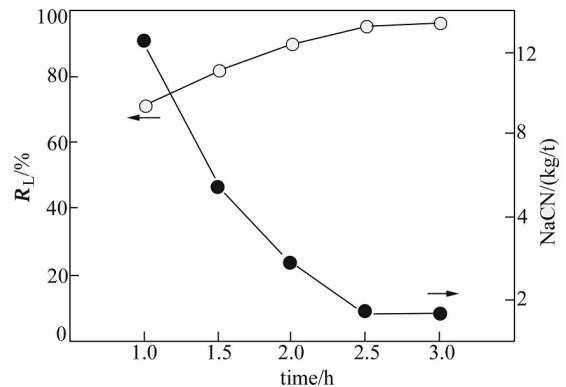


图 2 预氧化时间对金浸出率及氰化钠耗量影响

Fig.2 Effect of preoxidation time on the gold leaching rate and sodium cyanide consumption

本彻底氧化。预氧化时间过长将减小系统处理能力和增大系统能耗,因此,综合考虑取热压预氧化浸出时间为 2.5 h。

### 2.2.3 氧分压的影响

预氧化条件:矿石粒度-44  $\mu\text{m}$  占 90.74%,温度 220 $^{\circ}\text{C}$ ,预氧化时间 2.5 h,矿浆浓度 20%,转速 750 r/min。考察不同氧分压对金浸出率及氰化钠耗量的影响,结果见图 3。

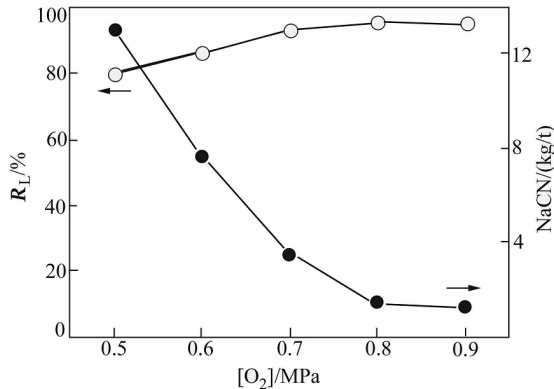


图 3 氧分压对金浸出率及氰化钠耗量影响

Fig.3 Effect of oxygen partial pressure on the gold leaching rate and sodium cyanide consumption

热压预氧化过程中,氧分压对金的浸出率和氰化钠耗量影响较大:当预氧化温度一定时,氧气在溶液中的溶解度随氧分压的增加而加大;溶液中氧浓度增加有利于黄铁矿和毒砂等硫化矿物的氧化分解<sup>[17]</sup>,从而提高金浸出率、减少氰化钠的消耗量。从图 3 可知,当氧分压达到 0.8 MPa 时,金浸出率为 95.58%,氰化钠耗量为 1.42 kg/t 矿,而后氧分压增加对金浸出率和氰化钠耗量影响趋于较小。因此,氧分压选择 0.8 MPa 为宜。

### 2.2.4 矿浆浓度的影响

预氧化条件:矿石粒度-44  $\mu\text{m}$  占 90.74%,温度 220 $^{\circ}\text{C}$ ,预氧化时间 2.5 h,氧分压 0.8 MPa,转速 750 r/min。考察不同矿浆浓度对金浸出率及氰化钠耗量的影响,结果见图 4。

难处理金矿热压预氧化的矿浆浓度主要与给料的硫含量有关,其次是黏土含量<sup>[11]</sup>。对于含硫不超过 6%且黏土含量不高的金精矿来说,矿浆浓度以 45%~55%为宜。矿浆浓度较高时,单质硫能够有效地悬浮和弥散,在足够反应时间内,能够有效地被彻底氧化。但随着矿浆浓度的增加,粘度增大,氧气分散变得困难,氧化速度减慢。含硫量超过 6%的金精矿则根据原料的发热值,由热平衡关系确定

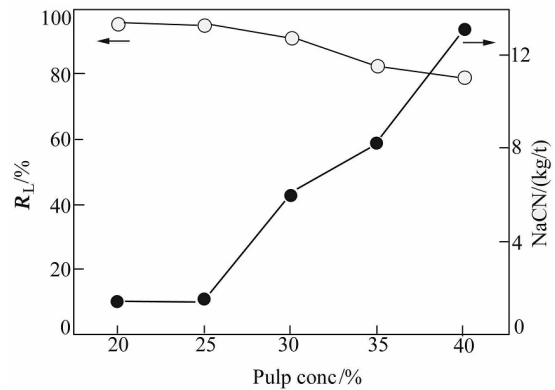


图 4 矿浆浓度对金浸出率及氰化钠耗量影响

Fig.4 Effect of pulp concentration on the gold leaching rate and sodium cyanide consumption

浓度应降低到何种程度<sup>[15]</sup>。本研究使用的金精矿硫含量为 24.48%,由图 4 可知,矿浆浓度为 25%时,金的浸出率为 95.56%,氰化钠耗量为 1.44 kg/t 矿;此后随矿浆浓度的增加,金的浸出率降低、氰化钠耗量增大。矿浆浓度过大时,会使压力釜和搅拌器磨损增加,搅拌阻力增大。综合考虑,选择矿浆浓度为 25%。

### 2.2.5 综合条件实验

根据前述实验,确定热压预氧化综合条件为:粒度-44  $\mu\text{m}$  占 90.74%、矿浆浓度 25%、氧分压 0.8 MPa、转速 750 r/min、220 $^{\circ}\text{C}$  预氧化处理 2.5 h。结果表明,热压预氧化过程中,大部分砷以稳定的结晶状砷酸铁或者臭葱石( $\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )形式被固定在氧化渣中<sup>[3, 18]</sup>。

将该预氧化渣按直接氰化条件进行浸出,金的浸出率为 95.75%,氰化钠耗量为 1.36 kg/t。

## 3 结论

采用热压预氧化处理某含砷含炭难处理金精矿,在矿石粒度-44  $\mu\text{m}$  占 90.74%、温度 220 $^{\circ}\text{C}$ 、矿浆浓度 25%、氧分压 0.8 MPa 和转速 750 r/min 条件下预氧化 2.5 h 后,砷主要以稳定的结晶状砷酸铁或者臭葱石( $\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )形式被固定在氧化渣中,减少了可溶性砷化物的含量,热氧化预处理工艺环境友好,还可提高金浸出率、降低氰化钠用量。

预氧化渣在矿浆浓度 33%、pH=10~11、初始氰化钠浓度 0.3%和活性炭浓度 25 g/L 条件下进行滚瓶氰化浸出 24 h,金的浸出率由常规氰化浸出率的 11.21%增加至 95.75%,氰化钠耗量由常规氰化浸出

的 46.99 kg/t 矿下降至 1.36 kg/t 矿, 可实现金的高效回收。

### 参考文献:

- [1] 刘汉钊. 国内外难处理金矿焙烧氧化现状和前景[J]. 国外金属矿选矿, 2005, 42(7): 5-10.  
LIU H Z. The present situation and prospect of the calcination oxidation of refractory gold ore at home and abroad[J]. *Metallic ore dressing abroad*, 2005, 42(7): 5-10.
- [2] 宋鑫. 中国难处理金矿资源及其开发利用技术[J]. 黄金, 2009, 30(7): 46-49.  
SONG X. Refractory gold resources and relevant development and utilization technology in China[J]. *Gold*, 2009, 30(7): 46-49.
- [3] 罗星, 李尽善, 周卫宁, 等. 某金矿热压氧化后氰化浸金氰化钠消耗实验研究[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 51-55.  
LUO X, LI J S, ZHOU W N, et al. Research on the dosage of sodium cyanide used for leaching refractory gold ore after pressure oxidation procedure[J]. *Precious metals*, 2015, 36(4): 51-55.
- [4] 许晓阳. 碳质难处理金矿浸出工艺研究进展[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(1): 82-87.  
XU X Y. Review of research on leaching process of carbonaceous refractory gold ore[J]. *Gold science and technology*, 2013, 21(1): 82-87.
- [5] 赵捷, 乔繁盛. 黄金冶金[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.  
ZHAO J, QIAO F S. *Gold metallurgy*[M]. Atomic Energy Press, 1988.
- [6] 谭希发. 难处理金矿的热压氧化预处理技术[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(9): 38-43.  
TAN X F. Pressure oxidation pretreatment technology on refractory gold ore[J]. *Nonferrous metals (Extractive metallurgy)*, 2012(9): 38-43.
- [7] 李绍英. 含铜难处理金矿碘化浸出工艺及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2014.  
LI S Y. Process and mechanism research of iodide-iodide leaching for refractory gold ore bearing copper[D]. Beijing: University of Science Technology Beijing, 2014.
- [8] 刘汉钊. 国内外难处理金矿压力氧化现状和前景(第一部分)[J]. 国外金属矿选矿, 2006(8): 4-9.  
LIU H Z. The present situation and prospect of the oxidation of the pressure oxidation of refractory gold ore at home and abroad (part I)[J]. *Metallic ore dressing abroad*, 2006 (8): 4-9.
- [9] 马方通, 高利坤, 董方, 等. 难处理金矿预处理及强化氰化技术研究现状及进展[J]. 黄金, 2016, 37(4): 51-55.  
MA F T, GAO L K, DONG F, et al. Pretreatment of refractory gold ores and current research status and progress of intensified cyanidation process[J]. *Gold*, 2016, 37(4): 51-55.
- [10] 王帅, 李超, 李宏煦. 难浸金矿预处理技术及其研究进展[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(4): 129-133.  
WANG S, LI C, LI H X. Research progress of pretreatment technologies of refractory gold ores[J]. *Gold science and technology*, 2014, 22(4): 129-133.
- [11] 姚国成, 阮仁满, 温建康. 难处理金矿的生物预氧化技术及工业应用[J]. 矿产综合利用, 2003(1): 33.  
YAO G C, RUAN R M, WEN J K. Biooxidation pretreatment technology for refractory gold ores and its commercial application[J]. *Multipurpose utilization of mineral resources*, 2003(1): 33.
- [12] CLIMO M, WATLING H R, VAN BRONSWIJK W. Biooxidation as pre-treatment for a telluride-rich refractory gold concentrate[J]. *Minerals engineering*, 2000, 13(12): 1219.
- [13] IGLESIAS N, CARRANZA F. Refractory gold-bearing ores: A review of treatment methods and recent advances in biotechnological techniques[J]. *Hydrometallurgy*, 1994, 34(3): 383.
- [14] 王力军, 刘春谦. 难处理金矿石预处理技术综述[J]. 黄金, 2000, 21(1): 38-45.  
WANG L J, LIU C Q. Overview of pretreatment technique of refractory gold ores[J]. *Gold*, 2000, 21(1): 38-45.
- [15] 林燕, Mike Collins, Rein Raudsepp. 难处理金矿的热压氧化预处理[J]. 世界有色金属, 2009(7): 26-29.  
LIN Y, COLLINS M, RAUDSEPP R. Pressure oxidation pretreatment on refractory gold ore[J]. *World nonferrous metal*, 2009(7): 26-29.
- [16] 张文波. 加压氧化浸出工艺的机理研究[J]. 黄金科学技术, 2011(5): 40-44.  
ZHANG W B. Research on the mechanism of pressure oxidation leaching process[J]. *Gold science and technology*, 2011, 19(5): 40-44.
- [17] 黄怀国, 江城, 孙鹏, 等. 碱性(石灰)热压氧化预处理难浸金矿工艺的机理研究[J]. 稀有金属, 2003, 27(2): 249-253.  
HUANG H G, JIANG C, SUN P, et al. A mechanism study on technology of pretreatment of refractory gold ores by alkaline (lime) hot-press oxidation[J]. *Chinese journal of rare metals*, 2003, 27(2): 249-253.
- [18] 谭希发. 含铜金精矿热压预氧化-氰化综合回收金铜试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016 (11): 45-48.  
TAN X F. Comprehensive recovery of gold and copper from copper-bearing gold concentrate by hot-pressure oxidation-cyanidation[J]. *Nonferrous metals (Extractive metallurgy)*, 2016(11): 45-48.