

白云母对氰化浸金的吸附效应研究

陈瑜¹, 代淑娟^{1*}, 韩佳宏², 李鹏程¹, 李洪祥¹

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 朝阳师范高等专科学校, 辽宁 朝阳 122000)

摘要: 采用多种手段研究了金矿石中白云母对氰化浸出液中的金吸附效应。吸附试验考察了不同粒级白云母对溶液中金吸附率的影响, 结果表明, 白云母粒度越细, 溶液中金的吸附率越高, 吸附率由 1.29% 提高至 5.35%; 电化学溶解实验表明, 白云母粒度越小, 金的溶解速率越大; 对浸金产物的扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)分析表明, 金的氰化络合物易吸附在白云母端点处; 红外光谱分析显示, 金氰化物与白云母存在化学吸附。密度泛函理论(DFT)模拟计算结果显示, 金氰化物与白云母(001)表面的吸附强度为 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^- > \text{AuCN}$ 。

关键词: 氰化浸金; 吸附; 白云母; 粒度; 密度泛函理论(DFT)

中图分类号: TD953; TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)03-0056-06

Study on the adsorption effect of muscovite on cyanide leaching gold

CHEN Yu¹, DAI Shu-juan^{1*}, HAN Jia-hong², LI Peng-cheng¹, LI Hong-xiang¹

(1. School of Mining Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, Liaoning, China;

2. Chaoyang Teachers College, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

Abstract: The adsorption effect of muscovite in gold ore on gold in cyanide leaching solution was studied by various methods. The effect of muscovite with various particle sizes on the adsorption rate of gold in solution was investigated. The results showed that the finer the muscovite size, the higher the adsorption rate of gold in solution, which increased from 1.29% to 5.35%. The electrochemical dissolution experiments show that the smaller the muscovite particle size, the faster the gold dissolves. Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis of the leached products reveals that the cyanide complex of gold is easily adsorbed at the end of muscovite. According to infrared spectroscopy, there is chemical adsorption between gold cyanide and muscovite. Density functional theory (DFT) simulation results show that the adsorption strength of gold cyanide on the surface of white mica (001) is $[\text{Au}(\text{CN})_2]^- > \text{AuCN}$.

Key words: cyanide leaching of gold; adsorption; muscovite; particle size; DFT

氰化提金法是目前最主要、最普遍、最有效的处理工艺, 受到学者们的高度关注^[1-2]。金矿石中的白云母在细磨活化后, 会与浸出液中的金进行吸附而产生“劫金”现象。含硅矿物经过细磨高温活化作用后, 活性的增强可能对浸出液中的金产生一定的吸附作用, 影响浸出效果, 从而影响金的回收效果。

国内外学者对含硅矿物与金的相互作用开展了研究工作。刁淑琴^[3]在黔西南金矿中发现以水云母为主的黏土矿物含有 93.71% 的金, 表明硅酸盐矿物和黏土矿物可能吸附胶体金; 澳大利亚学者 Hough 等^[4]在金矿床风化过程中发现了金和硅两者间的相互作用, 证实了金迁移的活跃机制; Singh 等^[5]研究

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51574146)

第一作者: 陈瑜, 女, 硕士研究生。研究方向: 难处理金选冶。E-mail: 6460556@qq.com

*通信作者: 代淑娟, 女, 博士, 教授。研究方向: 难处理金选冶及菱镁矿选矿研究。E-mail: shujuandai@163.com

了 3-巯基丙基三甲氧基硅烷(MPS)在超高压下分步沉积金的过程,用 XPS 证明了硫氰酸金键的形成,并用原子力显微镜发现了金与 MPS 层的相互作用。

传统提金工艺中,超细粒磨矿、高温冶炼以及机械活化等方法也会引起硅酸盐矿物和金的反应。如方嫻等^[6]在矿石细度、氰化钠用量和浸出时间方面对金矿浸出率的试验表明,磨矿细度为-38 μm 时金的最大氰化浸出率 42%。刘淑杰等^[7]改变焙烧温度和焙烧时间所得的石英矿渣对氰化金的吸附能力随焙烧温度和时间的升高而增强。马芳源等^[8]通过搅拌活化发现金的络合物和硅酸盐存在的吸附现象导致了金的流失。也有文献对硅和金的络合物吸附机理进行研究, Mohammadnejad 等^[9]研究发现,吸附作用会导致金在浸出过程的流失。樊文苓等^[10]以实验标定方式探明低温条件下的 Au-HCl-SiO₂ 体系中存在硅和金的络合现象。但是金矿石中绝大部分为硅酸盐矿物,作为一种含硅矿物的白云母可能影响氰化浸金过程。刘红召等^[11]通过对比不同焙烧条件的云母矿物相转化和浸出规律发现,高温或氯化焙烧下的云母会发生转换。安士杰^[12]对含有非金属矿物云母且泥化严重的乌拉嘎金矿石采用电化学处理工艺,发现这种方法提高了氰化的浸出指标。谷晋川等^[13]对脉石中含有白云母矿物的山东招远罗山金矿和甘肃岷县鹿尔坝金矿采用柠檬酸助浸剂,发现柠檬酸的加入使得氰化浸出速率和氰化时间都有提高。

国内外学者针对金和硅的相互作用研究深入,然而关于白云母的粒度、与金的络合物吸附计算方面研究较少。因此本文运用吸附实验比较级不同的白云母对溶液中金的吸附率的变化,采用电化学溶解实验探究白云母对氰化浸金速率的影响规律。同时利用扫描电镜(SEM)及能谱(EDS)、红外光谱(IR)等方法对反应后产物成分变化进行检测。采用密度泛函理论模型计算,分析吸附物在白云母表面作用的吸附机理,研究白云母对氰化浸金过程吸附效应的影响,为含硅矿物在氰化浸金过程中产生的“劫金”现象提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验用的微细粒金粉为纳米级或微米级,来自上海瀚思化工有限公司,纯度大于 99.9%。白云母来自河北省灵寿县天将矿业有限公司,具有完善的

解理,可以剥分,解理面呈珍珠光泽。其 X 射线荧光光谱(XRF)测定结果列于表 1。

表 1 白云母 X 射线荧光光谱分析(质量分数)/%

Tab.1 XRF analysis result of muscovite (mass fraction)/%

成分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO
含量/%	0.453	1.47	30.90	48.57	0.05	10.90	0.348
成分	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	ZrO ₂	BaO	PbO
含量/%	0.862	0.014	5.905	0.0198	0.030	0.14	0.018

由表 1 可知,白云母矿物样品中含有 O、Si、Al、K、Fe、Mg、Na 等元素,其纯度较高,可以满足试验对单矿物的纯度要求。首先对白云母进行破碎,手动拣选 2 mm 的颗粒在 ZXM-1 振动磨机进行研磨,用 60 ~400 目的筛网过筛分选不同粒度的样品,并将其他粒级的样品再次研磨用于实验中。

1.2 吸附实验

在常温(20°C)、磁力搅拌、碱性(pH≈11)溶液中,以 0.02 mol/L KCN 为浸出剂、0.1 mol/L KNO₃ 为电解质。在上述相同条件下,分别进行不存在白云母及存在白云母的平行试验,研究其对金溶解的影响。用原子吸收光谱仪测定上清液中金的浓度,计算不同体系下溶液中金的吸附率。吸附率计算方法为:

$$\eta = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_1 \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中,η 为吸附率;ρ₁ 为常规氰化浸金的金浓度,ρ₂ 为加入白云母吸附后的金浓度,单位均为 mg/L。

1.3 电化学溶解及表征

使用荷兰 IVIUM 公司生产的 Vertex.One.EIS 电化学工作站及 ATA-1B 型旋转盘电极进行电化学实验。以恒定的速度变化调节金电极电位,对金溶解电流进行线性扫描伏安曲线分析,得到白云母的浸金反应速率。扫描速率实验从 20 mV/s 开始,依次降低 1 mV/s。阳极极化时,通过外加气体并对工作电极施以电压,调节电解质。先在电解池中加 0.1 mol/L KNO₃ 的支持电解质,再用 NaOH 调至溶液所需 pH 值,并加入 0.02 mol/L KCN 溶液,通过观察金电极,确定白云母的粒度对金溶解的电化学影响。

1.4 SEM 及 EDS 表征

用 ZEISS SIGMA HD 场发射扫描电子显微镜进行 SEM 观察,该扫描电子显微镜具有观察样品的表面结构、微观形貌和颗粒尺寸等功能,与 EDS 结合分析样品中元素的种类组成与质量百分比^[14]。实验时将粉末样品置于在干净的样品台上,而后粘

附在导电胶带上, 吹走未粘贴的样品, 抽真空并保持一定时间的真空度后, 在样品表面喷镀上 Pt, 喷镀时间为 220 s, 扫描电压 15 kV, 然后放进仪器内观察产物的吸附结构变化和含量变化等。

1.5 IR 表征

用 Nicolet 380 FT-IR 红外光谱仪对白云母与氰化浸金后的产物进行红外光谱分析, 扫描范围为 400~4000 cm^{-1} 。测量过程中, 首先进行 KBr 测试背景采集, 随后分别取 1.0 mg 矿物样品和 100 mg KBr, 使用玛瑙研钵混匀并研细, 最后使用压片模具压片进行测试。

2 实验结果与讨论

2.1 白云母粒级对金吸附率的影响

溶液采用离心方式进行液固分离后, 分析其中金离子浓度变化, 并根据式(1)计算出白云母对溶液中金的吸附率的数值, 进而判定白云母在不同粒级下的表面活性。图 1 为白云母在不同粒级下对溶液中金的吸附率。

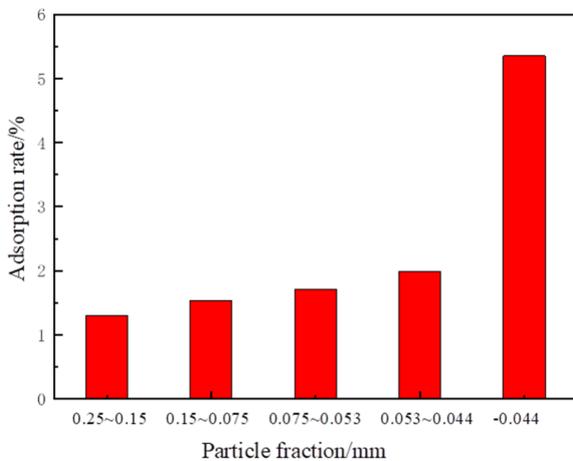


图 1 白云母粒级对金吸附率的影响

Fig.1 Effect of Muscovite particle size on gold adsorption rate

由图 1 可知, 在 0.25 mm 粒度范围内, 溶液中金的吸附率随着加入白云母粒级减小而升高。白云母粒级在 0.25~0.044 mm 范围内时, 溶液中金的吸附率在 1.29%~1.99% 之间, 吸附变化不明显。当白云母为 -0.044 mm 粒级时, 溶液中金的吸附率明显提高, 为 5.35%。白云母与溶液中金进行的吸附作用越强, 则溶液中金的吸附率会越高。原因在于细粒级的白云母中存在晶体结构不完整现象, 粒级越细不完整性越多, 导致其晶体表面产生双层电性。

白云母晶体表面带有负电, 而晶体凹陷部分带有正电, 并与胶体进行吸附作用^[8], 因此白云母的加入降低了金的浸出率。

2.2 白云母粒级对反应速率的影响

在溶液 pH \approx 11、氰化钾浓度为 0.02 mol/L、白云母用量 0.013 g、金电极转速为 500 r/min 及温度 20 $^{\circ}$ C 的条件下, 对不同粒级的白云母进行电化学溶解实验。图 2 为金阳极溶解电化学实验结果。

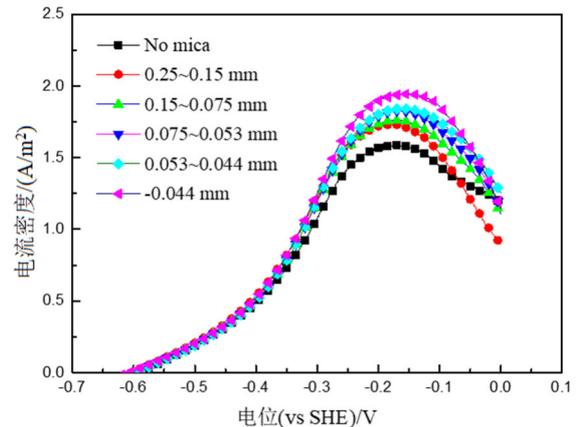


图 2 金电极在不同粒级白云母体系下的线性扫描伏安曲线

Fig.2 linear sweep voltammetry curve of gold electrode in Muscovite system with different particle size

由图 2 可知, 无白云母时(曲线 No mica), 线性扫描伏安曲线中电流密度峰为 1.6 A/m^2 ; 当不同粒级的白云母参与氰化浸金反应时, 明显看出电流密度及峰值都明显增高。随着白云母粒度逐渐减小, 金开始发生溶解时的电位值稍有降低; 在粒度为 0.25 mm 时, 电位值由无白云母时的 -0.60 V 降低至 -0.61 V。相同电位值下白云母粒级所对应的电流密度逐渐增大, 密度峰从 0.25~0.15 mm 粒级的 1.72 A/m^2 增加至 -0.044 mm 粒级的 1.94 A/m^2 。曲线的上行区和下降钝化区峰形有明显的差异变化: 上行区的差异变化较小, 而下降钝化区的差异变化较大; 同时, 峰电流对应的电位值也在增大。加入白云母之后峰电流对应的电位值增加, 延缓了钝化现象的发生, 这不仅使金的溶解速率有所提升, 同时金也更加易溶解。白云母粒度越小, 对溶解速率的提升、促进金溶解的效应越明显。

2.3 浸金产物的形貌和元素特征

对添加白云母后氰化浸金反应得到的固体产物进行 SEM 观察, 结果如图 3 所示。对选定区域进行 EDS 面扫测定, 结果列于表 2。

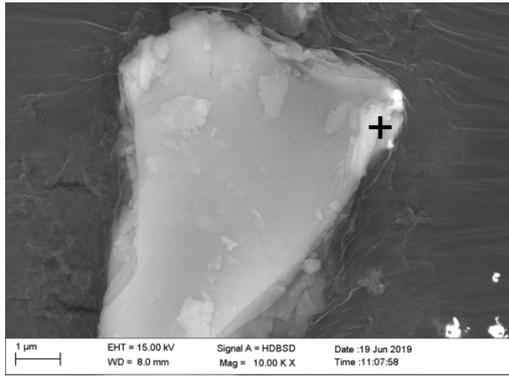


图3 氰化浸金后白云母固体 SEM 图像

Fig.3 SEM image of muscovite after gold cyanide leaching

表2 金粉+白云母氧化浸出作用产物能谱测定结果

Tab.2 EDS results in cyanidation leaching products of gold powder and muscovite

元素	C	N	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Au
$\omega/\%$	54.31	2.17	30.45	0.12	2.67	3.94	3.23	0.65	2.46

从图3可以看出,在白云母颗粒的表面,尤其是端点有附着物。由表2可见,产物表面主要包括C、N、Si、O、Mg、Al、K、Fe和Au等元素。分析表2元素来源,其中C、N和Au并非来自于白云母原料。C元素主要来自测定用导电胶不可避免的碳污染,以及少量来自金氰化物的碳;Au和N元素的出现表明金氰化物(AuCN_{ads})存在于测定区域。金与氰根相互作用吸附在白云母的端点处,白云母与金及其络合物均产生吸附,降低了金的浸出率。

2.4 白云母与氰化浸金作用的红外光谱分析

采用红外光谱对白云母与氰化浸金作用前后的产物进行表征,结果如图4所示。

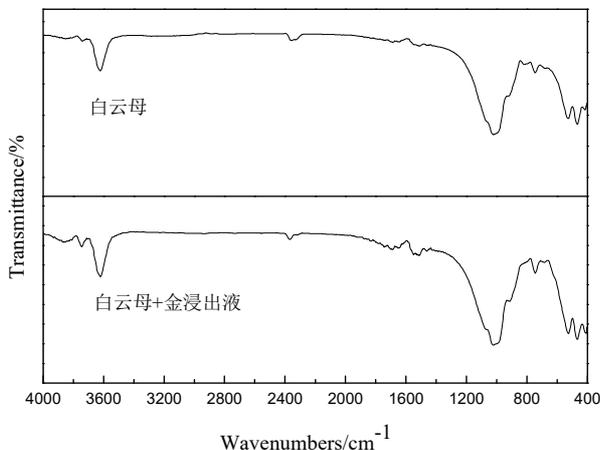


图4 白云母与氰化浸金产物红外光谱

Fig.4 Infrared spectra of muscovite and gold cyanide leaching product

对图4进行解析, 3620.56 cm^{-1} 处吸收峰为白云母中Al-OH伸缩振动所引起的; 1514.23 cm^{-1} 处吸收峰为水分子的弯曲振动吸收峰; 1022.79 cm^{-1} 处的吸收峰为强带,且吸收带较宽,是Si-O伸缩振动峰; 745.95 cm^{-1} 处吸收带为Si(Al)-O、Si-O-Si(Al)伸缩振动吸收峰,此处谱带稍强是因为Al的四次配位数目多; 526.89 cm^{-1} 、 468.09 cm^{-1} 处两个吸收强带为Si-O弯曲振动峰,产生较为锋锐的峰形; 417.08 cm^{-1} 处弱吸收带可能由羟基摆动引起的。在 2370.51 cm^{-1} 处,出现C≡N伸缩振动谱带,说明白云母与氰化浸金过程中形成的中间体AuCN及 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 存在化学吸附作用。当白云母与AuCN吸附时,有利于钝化膜的快速脱落,加快氰化浸金反应速率;当白云母与 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 吸附时,则降低了金的浸出率。

3 量子力学模拟分析

3.1 密度泛函理论模型

密度泛函理论是对多电子体系的电子结构进行研究的一种量子力学方法,着重应用于多领域电子结构计算中^[15]。为了进一步分析白云母与吸附物之间的作用机理,利用Materials Studio (MS)软件中CASTEP模块建立白云母与金的络合物的吸附模型,并采用密度泛函理论(DFT)进行量子力学模拟计算。采用密度泛函理论(DFT)计算金的络合物与白云母表面的吸附能,并对电子结构和键的布居进行Mulliken分析。吸附系统的稳定性由吸附物与吸附体作用的吸附能表示^[16],吸附能公式由式(2)计算获得^[17-19]:

$$\Delta E_{\text{adsorbate}} = E_{\text{mixture}} - (E_{\text{adsorbate}} + E_{\text{mineral}}) \quad (2)$$

式(2)中, $\Delta E_{\text{adsorbate}}$ 为吸附能, E_{mixture} 为金及其络合物和含硅矿物结构的总能量, $E_{\text{adsorbate}}$ 为吸附物的总能量, E_{mineral} 为吸附体的总能量,单位均为eV。

用CASTEP模拟计算白云母晶体结构参数^[20],采用GGA-PBESOL密度泛函确定了最佳参数条件为平面波截断能360 eV,布里渊区K点 $6 \times 3 \times 1$,体系总能量为-26278.3783 eV,晶格参数最佳误差为0.48%。通过对白云母(001)表面能计算可知,当原子层厚度高于3.8188 nm,白云母表面能的变化小于 0.003 J/m^2 ,远低于 0.05 J/m^2 ,表明此时白云母表面已是稳定状态。考察吸附物AuCN和 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 在白云母(001)表面N-Si吸附点的吸附机理。

3.2 白云母(001)表面与吸附物的作用计算

将AuCN和 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 作为吸附物,白云母

(001)表面作为吸附体。通过计算吸附物与吸附体形成的键长及吸附能,分析吸附物在白云母(001)表面的吸附机理。 AuCN 和 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 在白云母表面的几何吸附结构见图 5, 计算的相关吸附能列于表 3。

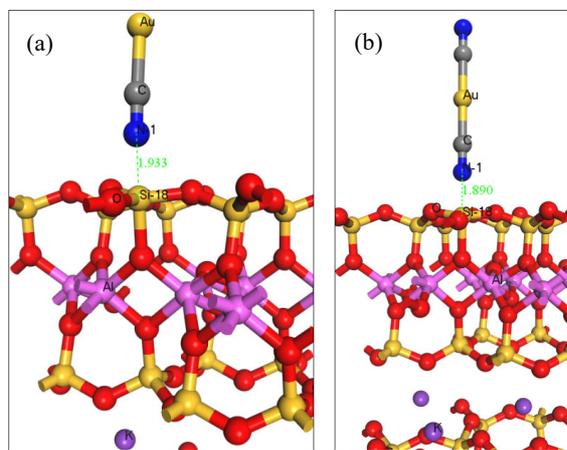


图 5 AuCN (a)和 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ (b)在白云母(001)表面的吸附构型

Fig.5 Adsorption configuration of AuCN (a) and $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ (b) on Muscovite (001) surface

表 3 吸附物在白云母(001)表面所成键长及吸附能

Tab.3 Bond length and adsorption energy of adsorbate on muscovite (001) surface

吸附物	AuCN	$[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$
键长/nm	0.1933	0.1890
吸附能/(kJ/mol)	-125.78	-134.63

由图 5 和表 3 可知, AuCN 在白云母(001)表面的吸附能为-125.78 kJ/mol, AuCN 中的氮原子与白云母中的硅原子距离为 0.1933 nm, 表明 AuCN 在白云母表面能够吸附, 原子之间的相互吸引使钝化膜快速脱落, 从而说明了白云母能够强化氰化浸金反应速率。 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 中的氮原子与白云母中的硅原子距离为 0.1890 nm, $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 与白云母表面的吸附能为-134.63 kJ/mol, 这表明 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 在白云母表面能够吸附, 结合不同粒级白云母与溶液中金吸附率试验, 说明氰化浸金的过程中有部分的金及其络合物被白云母所吸附。

3.3 白云母(001)表面与吸附物作用的电子结构

在白云母(001)表面与 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 的 Mulliken 布居分析结果见表 4。根据表 4, $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 在白云母(001)表面吸附后, Si-18 原子 3s 轨道电子从 0.59 e 增加到 0.64 e, 3p 轨道电子从 1.15 e 增加到 1.19 e,

表 4 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 在白云母(001)表面布居分析

Tab.4 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ population analysis on muscovite(001) surface

吸附物	原子	状态	s/e	p/e	合计/e	电荷/e	布居
$[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$	N-1	吸附前	1.67	3.77	5.44	-0.44	0.41
		吸附后	1.56	4.01	5.57	-0.57	
Si-18	Si-18	吸附前	0.59	1.15	1.74	2.26	
		吸附后	0.64	1.19	1.83	2.17	

N-1 原子 2s 轨道电子从 1.67 e 减少到 1.56 e, 2p 轨道电子由 3.77 e 增加到 4.01 e, 说明 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 中 N-1 原子的电子转移到白云母(001)表面的 Si-18 原子上, 成键布居值为 0.41。

通过对吸附能、Mulliken 电荷总数和键长分析表明, 金及其络合物吸附到白云母(001)表面, 吸附物与白云母(001)表面的吸附强度大小顺序为: $[\text{Au}(\text{CN})_2]^- > \text{AuCN}$ 。

4 结论

1) 吸附试验表明, 矿石中的白云母存在“劫金”效应。白云母粒度越小, 吸附能力越强, 对溶液中金吸附率越高, 导致金氰化浸出率降低。矿石磨矿粒度越细, 可能会带来更强的“劫金”效应。

2) 氰化浸金溶解电化学实验表明, 添加白云母后, 常规氰化浸金电位低于起始溶解电位, 白云母粒级越细, 金越容易溶解, 氰化浸金溶解速率越快。形貌表征显示, 在金表面生成 AuCN 的逐渐积累, 会使金出现表面钝化现象, 白云母氰化浸金反应后产物中存在吸附现象。红外光谱分析中 $\text{C}\equiv\text{N}$ 伸缩振动谱带和峰漂移的出现, 说明白云母在氰化浸金过程中存在化学吸附作用。

3) 量子力学模拟分析结果表明, AuCN 中的 N 与白云母中的 Si 原子距离为 0.1933 nm; $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 中 N 原子和白云母中的 Si 原子距离为 0.1890 nm。这表明 AuCN 和 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 都能吸附在白云母的表面。Mulliken 布居分析表明, $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 中 N-1 原子和 Si-18 原子在白云母(001)表面上发生了电荷转移, $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 中 N 原子和白云母表面 Si 原子成键, 说明氰化浸金的过程中有部分金及其络合物被白云母所吸附。

参考文献:

[1] ACAR S. Process development metallurgical studies for

- gold cyanidation process[J]. *Minerals & Metallurgical Processing*, 2016, 33(4): 161-171.
- [2] 韩佳宏. 含硅矿物对氰化浸金的影响及助浸研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
- HAN J H. Study on the influence of silicon containing minerals on cyanide leaching of gold and its aid leaching [D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2020.
- [3] 刁淑琴. 黔西南微细粒金的赋存状态及可选性回收评述[J]. *贵州地质*, 1987(3): 370-380.
- DIAO S Q. The mineralogy and technological characteristics of gold in the qianxinan gold deposit[J]. *Geology of Guizhou*, 1987(3): 370-380.
- [4] HOUGH R M, NOBLE R R P, HITCHEN G J, et al. Naturally occurring goldnanoparticles andnanoplates[J]. *Geology*, 2008, 36(7): 571-574.
- [5] SINGH J, WHITTEN J E. Adsorption of 3-mercaptopropyl-trimethoxysilane on silicon oxide surfaces and adsorbate interaction with thermally deposited gold[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2008, 112(48): 19088-19096.
- [6] 方娴, 吕兵超, 廖银英. 含金硫精矿氰化提金试验研究[J]. *矿冶*, 2017, 26(1): 62-64.
- FANG X, LV B C, LIAO Y Y. Experimental study on cyanide-leaching of gold-bearing sulfur concentrate[J]. *Mining & Metallurgy*, 2017, 26(1): 62-64.
- [7] 刘淑杰, 代淑娟, 李鹏程. 焙烧对石英与氰化金相互作用的影响[J]. *非金属矿*, 2020, 43(1): 68-72.
- LIU S J, DAI S J, LI P C. Effect of calcination on the interaction between quartz and gold cyanide[J]. *Non-metallic Mines*, 2020, 43(1): 68-72.
- [8] 马芳源, 代淑娟, 刘淑杰. 搅拌作用下石英吸附金的对比试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(9): 115-117.
- MA F Y, DAI S J, LIU S J. Comparative experimental study on gold adsorption by quartz under stirring[J]. *Mining R&D*, 2019, 39(9): 115-117.
- [9] MOHAMMADNEJAD S, PROVIS J L, VAN DEVENTER J S J. Reduction of gold(III) chloride to gold(0) on silicate surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 389(1): 252-259.
- [10] 樊文苓, 王声远, 吴建军. 低温热液中金-硅络合作用的实验标定[J]. *科学通报*, 1993, 38(10): 933-935.
- FAN W L, WANG S Y, WU J J. Experimental calibration of gold silicon complex in low temperature hydrothermal solution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(10): 933-935.
- [11] 刘红召, 柳林, 王威, 等. 焙烧对云母中不同元素酸浸出性能的影响[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(6): 83-87.
- LIU H Z, LIU L, WANG W, et al. Effect of roasting treatment on leaching properties of different element in mica[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(6): 83-87.
- [12] 安士杰. 电化学控制浮选在乌拉嘎金矿生产中的应用[J]. *黄金*, 2001, 22(11): 36-39.
- AN S J. Application of electrochemically controlled flotation in Wulaga gold mine[J]. *Gold*, 2001, 22(11): 36-39.
- [13] 谷晋川, 刘亚川. 金矿氰化浸出助浸剂的研究[J]. *金属矿山*, 2001(9): 28-30.
- GU J C, LIU Y C. Study on the leaching aids of gold ore cyanidation-leaching[J]. *Mental Mine*, 2001(9): 28-30.
- [14] 李伟. 扫描电子显微镜及其分析技术简介[J]. *山东电力技术*, 1996(2): 53-58.
- LI W. Introduction of scanning electron microscopy and its analysis technology [J]. *Shandong Electric Power Technology*, 1996(2): 53-58.
- [15] 王友娟. 运用密度泛函活性理论研究分子间弱相互作用体系[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- WANG Y J. The study of intermolecular weak interaction system using density functional activity theory[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014.
- [16] 周公度. 晶体结构测定[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [17] ROTH A. 真空技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [18] RADHAS, NAVROTSKY A. Energetics of CO₂ adsorption on Mg-Al layered double hydroxides and related mixed metal oxides[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(51): 29836-29844.
- [19] RAI B, SATHISH P, TANWAR J, et al. A molecular dynamics study of the interaction of oleate and dodecyl-ammonium chloride surfactants with complex aluminosilicate minerals[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 362(2): 510-516.
- [20] 刘淑杰, 代淑娟, 李鹏程. 高温下金与石英的相互作用及其对浸金过程的影响[J]. *贵金属*, 2020, 41(3): 8-13.
- LIU S J, DAI S J, LI P C. Interaction between gold and quartz at high temperature and its effect on the gold leaching process[J]. *Precious Metals*, 2020, 41(3): 8-13.