高岭石对氰化浸金的影响及助浸研究

余 鑫[1]，代淑娟[1*]，韩佳宏[2]，苑林松[1]，陈 瑜[1]，李鹏程[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：采用电化学实验研究了在氰化浸金过程中常见矿物高岭石对金溶解速率及对溶液中金的吸附效果的影响。结果表明，高岭石的存在会使金的溶解速率加快，随着高岭石粒度逐渐降低金的溶解速率提高，且高岭石对溶液中金的吸附率增加。氰化浸出实验结果表明，高岭石存在时金的浸出率由 93.21%降低到 91.76%，采用柠檬酸三钠、过氧化镁和十二烷基硫酸钠助浸时，金浸出率升高至 94.42%。能谱分析(EDS)发现浸出物中高岭石表面有金元素存在，表明高岭石会吸附溶液中的金。红外光谱分析和密度泛函理论计算表明，高岭石与金发生化学吸附作用，氢原子为高岭石的活性位点，$C_6H_5O_7^{3-}$会优先吸附于高岭石(001)表面，加入助浸剂可降低高岭石与金的吸附强度，提高金的浸出率。

关键词：氰化浸金；高岭石；助浸剂；密度泛函理论；量子模拟；电化学
中图分类号：TD953；TF831 **文献标识码：**A **文章编号：**1004-0676(2023)01-0026-08

Study on the effect of kaolinite on cyanide leaching of gold and its aid

YU Xin[1], DAI Shujuan[1*], HAN Jiahong[2], YUAN Linsong[1], CHEN Yu[1], LI Pengcheng[1]
(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 effect of kaolinite on gold dissolution rate and adsorption of gold in cyanide leaching was studied by electrochemical experiments. The results show that the presence of kaolinite accelerates the dissolution rate of gold, and with the decrease of kaolinite particle size, the dissolution rate of gold increases, and the adsorption rate of gold on kaolinite increases. In the cyanide leaching experiments, gold leached rate decreased from 93.21% to 91.76% in the presence of kaolinite but increased to 94.42% with the aid of trisodium citrate, magnesium peroxide and sodium dodecyl sulfate. EDS reveals kaolinite is present on the surface of the extract, which indicats that kaolinite can adsorb gold in the solution. Infrared spectrum analysis and density functional theory calculation demonstrate that the chemical adsorption of gold on kaolinite takes place and hydrogen is the active site of kaolinite. $C_6H_5O_7^{3-}$ is preferentially adsorbed on the surface of kaolinite (001). The leaching aid can reduce the adsorption intensity of gold on kaolinite, improving the gold leached rate.

Key words: cyanide leaching gold; kaolinite; leaching aid; density functional theory; quantum simulation; electro-chemistry

黄金的选冶技术是矿冶领域的重要研究方向，我国 30%已探明的金矿资源为难处理金矿，占比世界难处理金矿储量的三分之一，因此从难处理金矿资源中提取金已成为研究热门[1-2]。

收稿日期：2022-04-28
基金项目：国家自然科学基金项目(No. 51574146)
第一作者：余 鑫，男，硕士研究生；研究方向：难处理金选冶；E-mail：2954033691@qq.com
*通信作者：代淑娟，女，博士，教授；研究方向：难处理金矿选冶及菱镁矿选矿；E-mail：shujuandai@163.com

难处理金矿石的主要类型为矿石中的金被脉石矿物包裹或金以难溶化合物形式存在，高岭石是金矿石脉石矿物中的硅酸盐矿物之一，因为在分选过程中的加工处理会影响氰化浸金的效果。氰化浸金因具有浸金效果好，成本低，流程简单等优点而被广泛用于金的湿法提取[3]。对金矿石进行氰化浸金处理，一般需要对矿石进行碎磨，磨矿会使高岭石的表面活性增加，进而使其与金或金的氰化物发生作用，影响金的浸出效果[4]；在常规氰化浸金过程中，分布在金矿石中的硅酸盐脉石矿物是影响金浸出效果的主要因素[5-9]。金的性质稳定，但高岭石作为硅酸盐矿物在氰化浸金过程中可与金及金的络合物发生吸附作用，影响金的浸出效果[10-12]，洪汉烈等[13]通过对高岭石晶体和金的络合物吸附机理进行量子力学计算，结果显示金的络合物会在高岭石的晶体侧面发生吸附行为；刘淑杰等[14]先将高岭石和氯化金溶液进行充分搅拌混合后，对混合后的产物进行研磨，并建立金的络合物与高岭石的吸附模型，探究高岭石与金的络合物的吸附机理，结果表明，高岭石会与金的络合物发生吸附作用，高岭石表面固有电荷会通过氢键或范德华力与金的络合物中的氧原子发生吸附作用。目前国内外学者针对高岭石与金及金的氰化物的作用机理及影响效果和如何在金的提取过程中合理利用金的伴生矿物以及加入助浸剂使金有效提取的相关研究相对较少。

本文通过电化学实验对不同粒级的高岭石在氰化浸金过程中对金的溶解速率的影响及对金的吸附效果进行探究，在氰化浸出及助浸实验中对高岭石在氰化浸金过程中的影响行为进一步进行分析，考察混合助浸剂在氰化浸出过程中的作用效果；同时使用扫描电子显微镜、红外光谱分析及密度泛函理论计算等方法对高岭石与金及其氰化络合物的吸附过程分析，构建高岭石与吸附物的表面作用模型，确定金及其络合物、助浸剂在高岭石表面的吸附行为，为实验研究提供理论基础。

1　实验

1.1　实验材料

实验过程中使用的高岭石单矿物取自江苏省徐州市徐州高岭化工科技有限公司，高岭石矿物表面呈现浅灰色，土状光泽，致密块状构造，对高岭石进行 X 射线荧光光谱(XRF)分析及 X 射线衍射(XRD)分析，结果见表 1 和图 1。

表 1　高岭石 X 射线荧光光谱分析

Tab.1 The XRF analysis of kaolinite　　/%

成分	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O
含量	0.18	0.404	39.40	53.89	0.13	0.1	0.128	0.306
成分	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	MnO	Fe_2O_3	SrO	ZrO_2	WO_3
含量	0.994	1.81	0.014	0.013	2.016	0.012	0.036	0.01

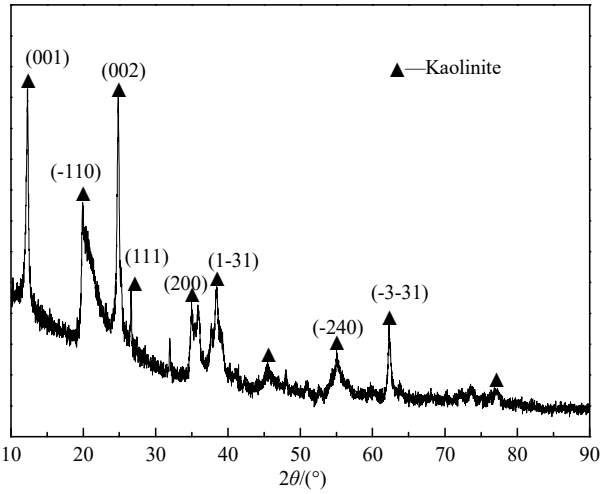

图 1　高岭石 X 射线衍射图

Fig.1 XRD pattern of kaolinite

由表 1 可知，高岭石样品中 SiO_2、Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量最多，分别为 53.89%、39.40%和 2.016%，Ti、Ca、Mg 等元素含量次之。由图 1 可以看出，高岭石的特征峰明显，未检测出其他种类矿物，所以实验中使用的高岭石纯度较高，满足实验过程中对矿物的纯度需求。

实验中使用的金粉购买于上海瀚思化工有限公司，粒度为微米级，纯度大于 99.9%。

1.2　电化学溶解

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，以金电极为旋转工作电极，甘汞电极作为参比电极，铂电极为对电极，利用线性伏安法测定金阳极溶解电流密度与电极电位关系曲线，考察不同粒级高岭石矿物在氰化浸金过程中对金溶解电位及电流密度的影响[15-16]。在实验前使用蒸馏水、稀硝酸、无水乙醇以及超声等方法对金电极依次进行清洗，随后在室温为 20 ℃，氰化钾溶液浓度为 0.02 mol/L，高岭石用量为 0.009 g，pH 值约为 11.0，金电极的转速为 500 r/min 的条件下，以扫描速率 1.0 mV/s 对金溶解的线性伏安曲线进行扫描。

将电化学实验后的产品进行离心固液分离，采

用原子吸收法对液相中金的浓度进行测定，根据加入高岭石前后溶液中金的浓度变化计算高岭石对溶液中金的吸附率。

1.3 氰化浸出及助浸实验

取金粉 0.025 g 和高岭石 1 g，在搅拌转速为 300 r/min，温度为 25 ℃，溶液 pH 值约为 10.5 的条件下进行氰化浸出，考察高岭石对氰化浸出效果的影响；取金粉 0.025 g 和高岭石 1 g，在搅拌转速为 300 r/min，温度为 25 ℃，溶液 pH 值约为 10.5 的条件下，加入浓度为 0.1 g/L 的助浸剂 (柠檬酸三钠 50%~70%，过氧化镁 20%~40%，十二烷基硫酸钠 10%~30%)进行助浸实验。助浸剂能够缩短金矿的氰化时间，提高浸出率，同时减少碱和氰化物用量[17]，因此选用此种助浸剂考察金粉与高岭石在其作用下的氰化浸出效果。

1.4 红外光谱分析

采用 Nicolet 380 FT-IR 红外光谱仪进行红外光谱测试，分析高岭石对溶液中金的吸附行为，测量时，先采集 KBr 背景，随后取 1.0 mg 样品和 100 mg KBr 进行混合研磨，研细后进行压片测量。

1.5 扫描电镜分析

使用蔡司 ZEISS ΣIGMA HD 场发射扫描电子显微镜(SEM)及能谱(EDS)扫描测试。首先将样品粉末黏附在导电胶带上，对未粘贴的样品进行清理，随后抽真空，并保持一定真空时间，对样品表面喷镀铂后在 15 kV 的扫描电压下进行分析[18]。

1.6 密度泛函理论计算

采用 Materials Studio 进行密度泛函理论模型计算。对高岭石晶格结构优化后计算高岭石的最佳交换关联泛函、平面波截断能、布里渊区 K 点的收敛性等参数，分析高岭石的能带结构、电子态密度和 Milliken 布局，解离表面进行弛豫，构建高岭石与吸附物的表面作用模型，考察了氰化浸出过程中助浸剂、金及其络合物在高岭石表面的吸附行为[19]。

2 实验结果与讨论

2.1 电化学溶解性能分析

不同粒级高岭石体系下金溶解的电化学实验及不同粒级的高岭石对溶液中金的吸附实验，结果见图 2。

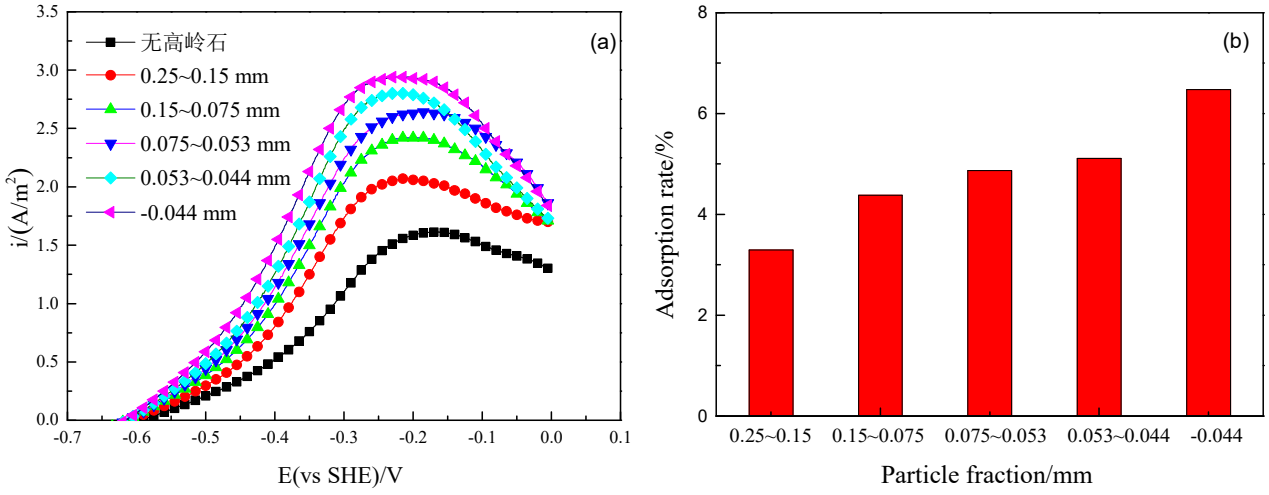

图 2 金电极在不同粒级高岭石体系下的线性扫描伏安曲线(a)和高岭石对金的吸附率(b)

Fig.2 Linear sweep voltammetry of the gold electrodes in kaolinite of different particle fractions (a) and the adsorption rate of gold by kaolinite of different particle fractions (b)

由图 2(a)可知，当金电极的电位逐渐升高时，金阳极表面会发生活性溶解，金阳极的溶解电流密度也随之升高，达到峰值后会逐渐降低。这是因为金阳极发生溶解形成表面吸附物覆盖于金阳极表面，形成钝化膜，阻止溶解反应的进行[20]。金电极在不同粒级高岭石体系下均有明显的溶解电流密度峰，且溶解电流密度峰值差异明显。当高岭石矿物粒度小于 0.25 mm 时，金表面膜层的溶解电位低于无高岭石时的表面膜层电位，膜层电位由-0.60 V 降为-0.62 V，此时金溶解性显然变高；当高岭石粒度逐渐减小时，金阳极的溶解电流密度峰值从 2.07 上升至 2.95 A/m^2。因此高岭石的存在会使金阳极的金溶解电极电位变低，溶解电流密度峰变高，使得金阳极的溶解阻力变小，活性溶解区间变宽，对金阳

极钝化膜的形成有抑制作用，所以金的溶解速率比无高岭石时的溶解速率更快；同时溶液中未溶解的高岭石会与金阳极产生摩擦作用，破坏金电极表面的钝化膜，进而强化了溶液中 CN^-、O_2、AuCN 和 $[Au(CN)_2]^-$离子的扩散，促使金发生溶解。

图 2(b)可知，当高岭石粒度小于 0.25 mm 时，高岭石对溶液中金的吸附率随着粒度的减小而逐渐增大，吸附率最小的高岭石粒度范围为 0.25~0.15 mm，其吸附率为 3.29%，当高岭石粒度小于 0.044 mm 时对溶液中金的吸附率最大，为 6.47%。

2.2　高岭石对金氰化浸出的影响

对金粉、金粉+高岭石进行氰化浸出实验，金粉+高岭石进行氰化助浸实验，考察浸出时间对浸出效果的影响，结果见图 3。

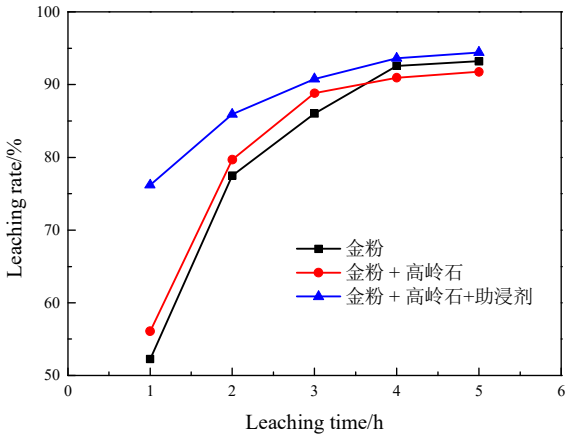

图 3　氰化浸出及助浸实验结果

Fig.3 The results of cyanide leaching and aid leaching

由图 3 可知，当浸出时间为 1~5 h，金的浸出率随浸出时间增加而增加。其中浸出时间 1~4 h 时，金浸出率增加幅度较大；浸出时间为 4~5 h 时，金浸出率增加幅度较小。当高岭石存在且浸出时间小于 3 h 时，金的浸出率高于无高岭石存在时金的浸出率，这是因为金表面的钝化物 AuCN 与高岭石发生了吸附作用，抑制了金表面钝化膜的持续增加；浸出时间大于 3 h 后，溶解后的金的络合物浓度增加，与高岭石的吸附作用增强，所以金的浸出率逐渐低于无高岭石存在时的浸出率。对金粉+高岭石浸出时金的最高浸出率为 91.76%，比对金粉浸出的最高浸出率低 1.45%。对金粉+高岭石氰化助浸时金的最高浸出率为 94.42%，这是由于高岭石矿物为黏土型矿物，在氰化浸金过程中加入高岭石后，高岭石不仅可以吸附溶解后的金及金的络合物，同时也会导致矿浆黏度增加，使氰化浸出的矿浆环境恶化，抑制氰化物和金的作用，进而使浸出时间变长，金的浸出率变低。加入助浸剂后，助浸剂不仅会参与金的溶解过程，同时助浸剂能够在高岭石表面发生吸附作用，减少了高岭石与金及其络合物的相互作用，缩短浸出时间，提高金的浸出率。

2.3　浸出产物的红外光谱特征

在有、无助浸剂条件下，对金粉+高岭石氰化浸出的固相产物进行红外光谱分析，结果如图 4 所示。

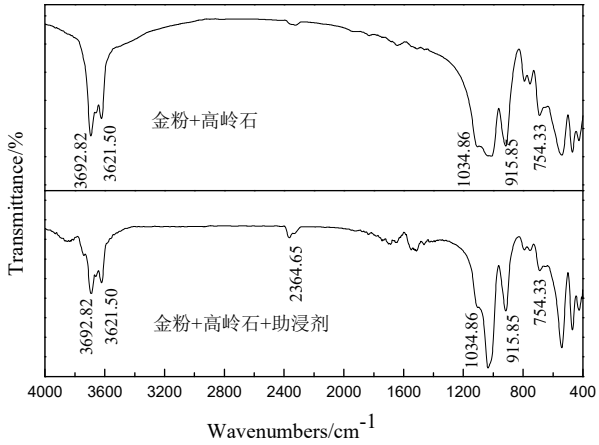

图 4 红外光谱分析

Fig.4 Infrared spectrum analysis

由图 4 可知，在 3692.82 cm^{-1}、3621.50 cm^{-1} 处比较尖锐的吸收带分别是高岭石外羟基、内羟基伸缩振动吸收峰；高岭石的水分子弯曲振动吸收峰在 1688.40 cm^{-1} 处；在 1034.86 cm^{-1} 处是 Si-O 伸缩振动峰的强吸收带；在 915.85 cm^{-1}、754.33 cm^{-1} 和 541.69 cm^{-1} 处分别为外羟基摆动吸收峰、Si-O-Si 对称伸缩振动峰以及 Si-O-Al 伸缩振动峰，在 470.27 cm^{-1}、425.50 cm^{-1} 处主要是 Si-O 弯曲振动峰；C≡N 伸缩振动吸收峰在 2364.65 cm^{-1} 处，说明了在氰化浸金过程中高岭石会与溶液中的金及金的络合物发生化学吸附作用。当高岭石与 AuCN 发生吸附作用时，能够使金表面的钝化膜快速溶解，加快金的浸出速率；而当高岭石与$[Au(CN)_2]^-$发生吸附作用，会在金表面形成钝化膜，抑制金的浸出。

2.4　SEM 和 EDS 分析

使用扫描电镜对金粉+高岭石氰化浸出固相产物进行观测及元素面扫描分析，结果如图 5 和表 2。从图 5 可以看出，金粉+高岭石氰化浸出固相产物的表面有金片状的金存在，能谱面扫描结果(表 2)显示扫描主要存在 C、N、Si、O、Al、K 以及 Au 共 7 种元素。C 元素的含量最高，摩尔分数为 74.08%，

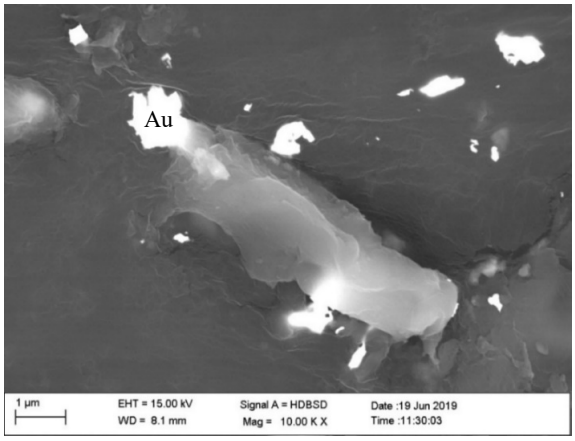

图 5 浸出物的 SEM 图像

Fig.5 SEM image of leaching product

表 2 金粉+高岭石氰化浸出物能谱分析结果

Tab.2 Element contents of energy spectrum analysis after kaolinite and cyanide leaching gold /%

元素	C	N	O	Al	Si	K	Au
摩尔分数	74.08	15.52	9.3	0.05	0.08	0.09	0.89

出现此种情况是由于导电胶的碳污染以及碱性氰化物溶液中的氰根离子存在碳元素；N 元素含量为 15.52%，表明有 AuCN 的存在，说明溶液中的金离子与氰根离子作用后在高岭石表面发生吸附作用，从而导致金的浸出率有所降低；Si、O、Al 和 K 元素均来自于高岭石。

3 密度泛函理论模拟计算

对高岭石进行晶格优化后，通过计算确定高岭石的最佳计算参数为交换关联泛函取 GGA-PBESOL 函、布里渊区 K 点为 3×2×2、平面截断能取 500 eV，在此条件下的高岭石体系总能量为-8656.444 eV，而晶格参数误差仅为 0.752%，高岭石的能带结构和态密度的计算结果表明高岭石为绝缘体，氰化浸金过程中高岭石与金及其络合物发生吸附作用时主要是高岭石的氧原子 p 轨道以及氢原子 s 轨道在发挥主要作用。

3.1 高岭石晶体布局分析及(001)表面计算

在对高岭石原子布局进行优化前，价电子构型分别是 H $1s^1$，O $2s^22p^4$，Si $3s^23p^2$，Al $3s^23p^1$，高岭石原子布局优化后数据见表 3。

根据表 3，优化后高岭石价电子构型分别为，H $1s^{0.57}$，O $2s^{1.85}2p^{5.26}$，Si $3s^{0.62}3p^{1.17}$，Al $3s^{0.47}3p^{0.73}$。

表 3 高岭石晶体的布居分析

Tab. 3 Population analysis of kaolinite

原子	s 轨道/e	p 轨道/e	总电子数/e	得失电子数/e
H	0.57	0	0.57	0.43
O	1.85	5.26	7.11	-1.11
Si	0.62	1.17	1.79	2.21
Al	0.47	0.73	1.20	1.80

高岭石晶体中的电子受体为氧原子，电子供体为氢、硅、铝原子，优化后高岭石的总电子数增加为-1.11 e，呈现最活跃状态的轨道为 p 轨道，高岭石的活性位点为氢、氧原子，所以高岭石与金及其络合物发生吸附作用时，金的氰化络合物中带负电的氮原子容易与高岭石中的氢原子发生吸附作用[21]。

高岭石能量最低的表面是(001)表面[22]，当(001)表面的原子层厚度大于 26.636 nm 时，随着原子层厚度的增加，其表面能的变化低于 0.013 J/m^2，此时高岭石表面已趋于稳定[23]。当(001)表面的真空层增加至 16 nm 时，表面能变化趋近于 0.018 J/m^2，表明在此真空层厚度范围内的高岭石表面已呈现稳定状态[24]，综合考虑，取原子层厚度为 26.636 nm，真空层厚度为 16 nm，对(001)表面进行弛豫，弛豫前后的表面模型如图 6 所示。

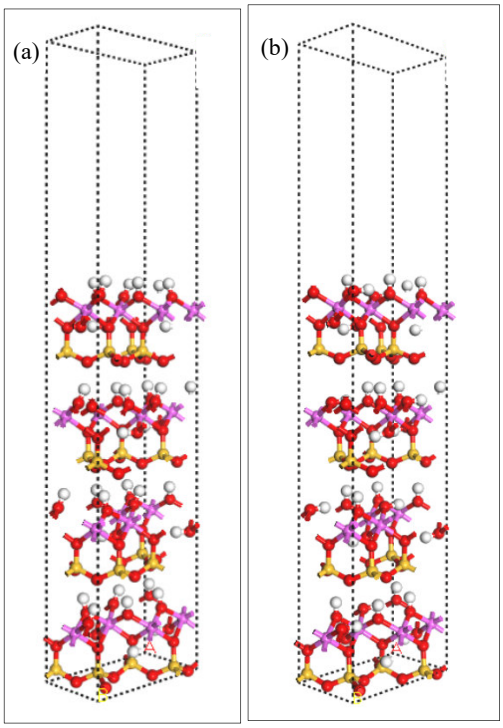

图 6 高岭石(001)表面弛豫前(a)与弛豫后(b)的晶胞结构

Fig.6 Unit cell model of kaolinite(001) surface before optimization (a) and after optimization (b)

由图 6 可以明显看出(001)表面弛豫后 H 原子发生了移动，这也证明了高岭石与金及其络合物发生吸附作用时，金氰化络合物中带负电的氮原子很容易与高岭石中的氢原子发生吸附作用。

3.2　高岭石(001)表面与吸附物的作用计算

在强碱性条件下，使用 OH^-、H_2O、AuCN、$[Au(CN)_2]^-$、$C_6H_5O_7^{3-}$作为吸附物，对高岭石(001)表面吸附物的键长及吸附能进行计算，并分析吸附机理。计算结果见图 7 和表 4。

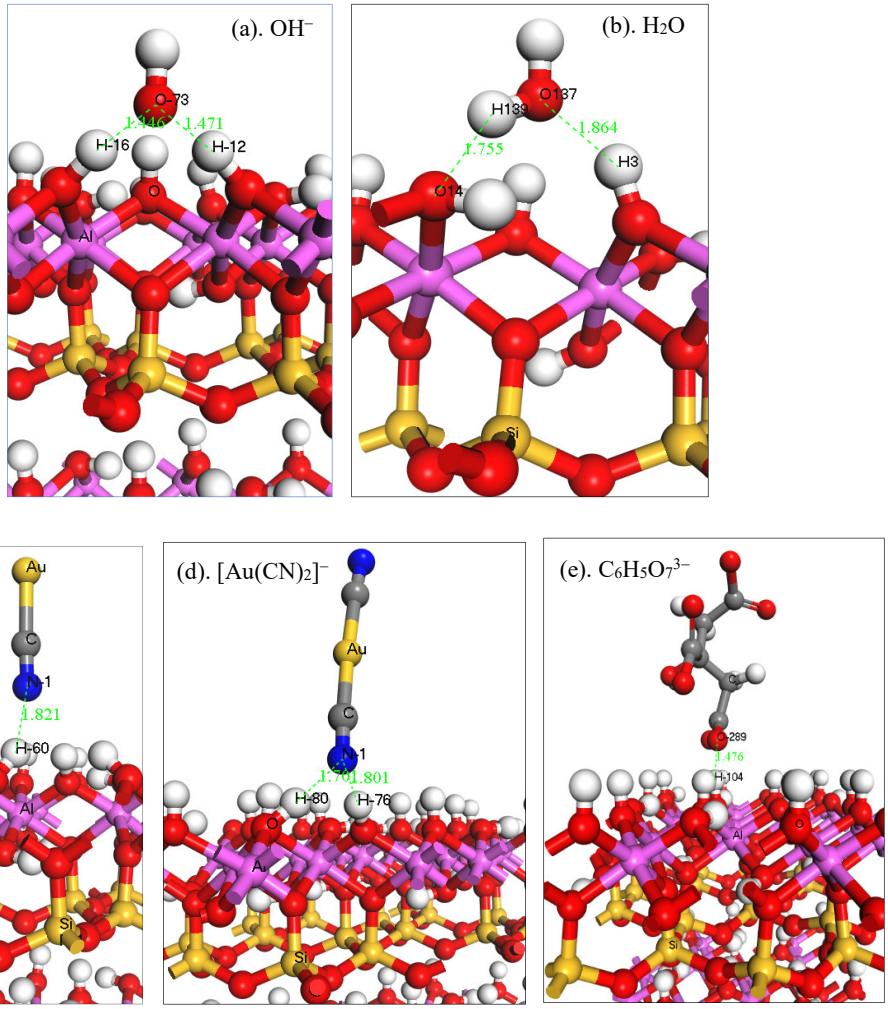

图 7　吸附物在高岭石(001)表面的结构

Fig.7 Structure of adsorbent on kaolinite (001)

表 4　吸附物在高岭石(001)表面所成键长及吸附能

Tab.4 Bond length and adsorption energy on kaolinite (001) surface

吸附物	OH^-	H_2O	AuCN	$[Au(CN)_2]^-$	$C_6H_5O_7^{3-}$
键长/nm	1.446	1.755	1.821	1.701	-1.467
吸附能/(kJ/mol)	-438.01	-33.51	-263.01	-428.14	-293.49

由图 7 和表 4 可知，OH^-在高岭石(001)表面形成作用力较强的氢键，吸附能为-438.01 kJ/mol；H_2O则以水化膜的形式吸附于(001)表面[25]，其吸附能为-33.51 kJ/mol；AuCN 与高岭石作用后二者的 N-H 键长为 1.821 nm，吸附能为-263.01 kJ/mol，所以 AuCN 能够在(001)表面发生吸附作用；$[Au(CN)_2]^-$在(001)表面作用后二者的 N-H 键长为 1.701 nm，吸附能为-428.14 kJ/mol，所以$[Au(CN)_2]^-$能够吸附于高岭石(001)表面；$C_6H_5O_7^{3-}$中的氧原子与高岭石中的氢原子的键长为 1.467 nm，吸附能为-293.49 kJ/mol，所以 $C_6H_5O_7^{3-}$在高岭石表面能够发生较强作用力的吸附。由于原子之间的相互吸引会引起金表面钝化膜脱落，因此吸附物的存在能够促进氰化浸出的反应速率，同时使用交换关联泛函离散变分法对金和高岭石的作用计算发现，金与高岭石的氧原子会以较强的共价键进行吸附，而金与高岭石铝

原子发生吸附作用时，Au-O 离子键发挥强烈作用，此时体系更加稳定，能量更低，因此金与高岭石的铝空位模型更加稳定。

3.3 高岭石(001)表面与吸附物作用电子结构分析

AuCN 和 $[Au(CN)_2]^-$ 在高岭石(001)表面的 Mulliken 布居分析结果见表 5。

表 5 AuCN 和$[Au(CN)_2]^-$在高岭石(001)表面的布居分析

Tab.5 Population analysis of AuCN and $[Au(CN)_2]^-$ on kaolinite(001) surface

吸附物	原子	状态	s/e	p/e	合计/e	电荷/e	布居
AuCN	N-1	吸附前	1.71	3.77	5.48	-0.48	0.11
		吸附后	1.67	3.82	5.49	-0.49	
	H-60	吸附前	0.51	-	0.51	0.49	
		吸附后	0.57	-	0.57	0.47	
$[Au(CN)_2]^-$	N-1	吸附前	1.68	3.85	5.53	-0.53	0.13
		吸附后	1.65	3.94	5.59	-0.59	
	H-80	吸附前	0.54	-	0.54	0.46	
		吸附后	0.55	-	0.55	0.45	

由表 5 可知，当 AuCN 在高岭石(001)表面发生吸附作用后，布居值为 0.11，N-1 原子的总电子增加 0.01 e，其中 2s 轨道的电子从 1.71 e 减小为 1.67 e，2p 轨道则从 3.77 e 增至 3.82 e；H-60 原子 1s 轨道电子增加了 0.06 e。

$[Au(CN)_2]^-$在高岭石(001)表面发生吸附作用后，布居值为 0.13，N-1 原子的总电子增加了 0.06 e，H-80 原子 1s 轨道电子从 0.54 e 增加到 0.55 e，增加了 0.01 e。$C_6H_5O_7^{3-}$在高岭石表面吸附后 O-289 和 H-104 所成布居值为 0.21。因此与高岭石(001)表面作用后的吸附强度为 $C_6H_5O_7^{3-}$最强，$[Au(CN)_2]^-$次之，AuCN 最弱。所以在氰化浸金过程中加入助浸剂 $C_6H_5O_7^{3-}$后，会抑制高岭石与金及其氰化络合物的吸附，从而改善金的浸出效果。

4 结论

1) 电化学实验结果表明，高岭石的存在会使金阳极的溶解电极电位降低，溶解电流密度峰增高，使得金阳极的溶解阻力变小，活性溶解区间变宽，对金阳极钝化膜的形成有抑制作用，所以金的溶解速率比无高岭石存在时的溶解速率更快。当高岭石的粒度小于 0.25 mm 时，随着高岭石的粒度逐渐变小，溶液中金发生溶解的起始电位则越低，溶解电流密度峰值越高，高岭石对溶液中金的吸附率也越高，吸附能力越强。

2) 金的浸出率随着浸出时间的增加呈现先快后慢的趋势。高岭石存在时，金的浸出率由 93.21% 降低到 91.76%；采用柠檬酸三钠、过氧化镁和十二烷基硫酸钠助浸后，金浸出率为 94.42%；高岭石会与溶解后金的络合物发生吸附作用，加入助浸剂后提高了金的浸出率。

3) SEM、IR 和密度泛函理论计算结果分析发现，在氰化浸金过程中，高岭石和金的氰化络合物以 C≡N 形式发生化学吸附作用，高岭石与金的氰化络合物的吸附作用导致金表面的 AuCN 逐渐积累，提高金的浸出速率。氢原子为高岭石活性位点，金的络合物在高岭石(001)表面会发生吸附作用，OH^-、H_2O、AuCN、$[Au(CN)_2]^-$和 $C_6H_5O_7^{3-}$几种吸附物相比较 $C_6H_5O_7^{3-}$优先吸附于高岭石(001)表面，使高岭石表面活性降低，助浸剂的加入降低了高岭石与金及其络合物的吸附强度，提高了金的浸出率。

参考文献：

[1] 陈成运. 黄金难选冶矿石预氧化技术研究现状及发展前景[J]. 世界有色金属, 2020(12): 51-52.
CHEN C Y. Research status and development prospects of gold refractory ore pre-oxidation technology[J]. World Nonferrous Metals, 2020(12): 51-52.

[2] 杨剧文, 王二军. 黄金选冶技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2007(4): 34-38.
YANG J W, WANG E J. Progress of mineral processing and metallurgy for gold ores[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2007(4): 34-38

[3] 王笃军. 氰化法在堆浸提金工艺的应用和研究[J]. 科技创新导报, 2017, 14(35): 66-67.

[4] AZIZITORGHABEH A, MAHANDRA H, RAMSAY J, et al. Gold leaching from an oxide ore using thiocyanate as a lixiviant: Process optimization and kinetics[J]. ACS Omega, 2021, 6(27): 17183-17193.

[5] 方兆珩, 马其, 谢慧琴. 细微碳质金矿的预处理和氰化浸取研究[J]. 黄金, 1993(4): 28-31.
FANG Z H, MA Q, XIE H Q, Study on pretreatment and cyanide leaching of fine carbonaceous gold ore[J]. Gold, 1993(4): 28-31.

[6] 朱国庆, 杜淑华, 夏亮, 等. 国外某含蛇纹石绿泥石微细粒难选金矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2021(5): 115-119.

ZHU G Q, DU S H, XIA L, et al. Experimental study on mineral processing of a micro-fine particle refractory gold deposit abroad containing serpentine and chlorite[J]. Metal Mine, 2021(5): 115-119.

[7] CHEN T T, CABRI L J, DUTRIZAC J E. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues[J]. JOM, 2002, 54(12): 20-22.

[8] 张凛, 朱一民, 张淑敏. 采用二氰胺钠浸出某金矿石试验研究[J]. 金属矿山, 2019(4): 97-100.
ZHANG L, ZHU Y M, ZHANG S M. Leaching experiment on a gold ore with sodium dicyanamide[J]. Metal Mine, 2019(4): 97-100.

[9] 陈瑜, 代淑娟, 韩佳宏, 等. 白云母对氰化浸金的吸附效应研究[J]. 贵金属, 2022, 43(3): 56-61.
CHEN Y, DAI S J, HAN J H, et al. Study on the adsorption effect of muscovite on cyanide leaching gold[J]. Precious Metals, 2022, 43(3): 56-61.

[10] SIMA M, JOHN L P, JANNIE S J V D. Reduction of gold(III) chloride to gold(0) on silicate surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 389(1): 252-259.

[11] 陈庆根. 江西某含砷硫金矿浸金试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2011(Z1): 35-38.
CHEN Q G. Research on leaching of arsenic-sulfur gold ore in Jiangxi province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2011(Z1): 35-38.

[12] 申大志, 庄荣传, 谢洪珍. 强化氰化浸金技术进展[J]. 矿产综合利用, 2014(2): 15-19.
SHEN D Z, ZHUANG R C, XIE H Z. Progress in strong cyanide gold leaching technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(2): 15-19.

[13] 洪汉烈, 闵新民, 付正义. 含金络合离子$[Au(Sb_2S_4)]^-$在高岭石表面吸附的量子化学研究[J]. 矿物学报, 2001(3): 515-518.
HONG H L, MIN X M, FU Z Y. Quantum chemical study of adsorption of $Au(Sb_2S_4)^-$ on kaolinite surface[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001(3): 515-518.

[14] 刘淑杰, 代淑娟, 李鹏程. 机械活化下金与高岭石相互作用研究[J]. 金属矿山, 2019(12): 99-102.
LIU S J, DAI S J, LI P C. Study on interaction between gold and kaolinite under mechanical activation[J]. Metal Mine, 2019(12): 99-102.

[15] LI H, YIN S, LI S, et al. Investigation on the recovery of gold from pretreated cyanide tailings using chlorination leaching process[J]. Separation Science and Technology, 2021, 56(1): 45-53.

[16] 陈利娟, 李骞, 杨永斌, 等. 金氰化溶解过程的电化学行为及形貌特征[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 88-92.
CHEN L J, LI Q, YANG Y B, et al. Electrochemical performance and morphology of gold dissolved in cyanide solution[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(4): 88-92.

[17] 代淑娟, 韩佳宏, 苏馨, 等. 一种金矿氰化浸出用助浸剂及浸出方法: CN111004924B[P]. 2021-11-16.

[18] WU J, AHN J, LEE J. Gold deportment and leaching study from a pressure oxidation residue of chalcopyrite concentrate [J]. Hydrometallurgy, 2021, 201: 105583.

[19] WANG H, XU C, DOWD P A. Modelling the pyrite oxidation level in a refractory gold-bearing stockpile to assess its potential for gold recovery by direct cyanide leaching[J]. Minerals Engineering, 2021, 173: 107177.

[20] БАРЧЕНКОВ В В, 邱京旺. 贵金属在氰化物溶液中的溶解[J]. 矿产综合利用, 1983(3): 14-20.

[21] 李鹏程. 金的络合物 $Au(S_2O_3)_2^{3-}$与石英、高岭石作用机理研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
LI P C. Study on mechanism of interaction of gold complex $Au(S_2O_3)_2^{3-}$ with quartz and kaolinite[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2019.

[22] QIANG W, XIANG-PING K, BAO-HUA Z, et al. Adsorption of Zn(II) on the kaolinite(001) surfaces in aqueous environment: a combined DFT and molecular dynamics study[J]. Applied Surface Science, 2017, 414.

[23] DONG W P, WANG Y X, CHEN Z, et al. Ageing process of pre-precipitation phase in $Ni_{0.75}Al_{0.05}Fe_{0.2}$ alloy based on phase field method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 1105-1111.

[24] RADHA S, NAVROTSKY A. Energetics of CO_2 adsorption on Mg-Al layered double hydroxides and related mixed metal oxides[J]. The Journal of Physical Chemistry, C. Nanomaterials and Interfaces, 2014, 118(51): 29836.

[25] 闵新民, 洪汉烈, 安继明. 高岭石-金-硫系列的化学键与稳定性研究[J]. 分子科学学报, 2000(1): 43-48.
MIN X M, HONG H L, AN J M. Study on chemical bonds and stability of kaolinite-gold-sulfur series[J]. Journal of Molecular Science, 2000(1): 43-48.