

活性炭吸附回收浸出液中金络合物的研究进展

余洪, 谢蕾, 蔡祥, 胡超杰, 张汉泉

(武汉工程大学兴发矿业学院, 湖北 武汉 430073)

摘要: 矿石中的金常用氰化物和非氰化物作为浸出剂, 形成金络合物浸出到浸出液中。由于活性炭具有耐腐蚀、较强的吸附能力、可循环利用等优点, 常用来吸附回收浸出液中金络合物。本文在前人研究的基础上, 重点分析了氰化炭浆法中活性炭吸附 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 的机理和研究进展, 概述了非氰浸出液(硫代硫酸盐浸出液、硫脲浸出液、卤素浸出液、硫氰酸盐浸出液)中活性炭吸附回收金络合物的机理及研究进展。为活性炭在提金工业中的更好应用提供参考。

关键词: 活性炭; 吸附; 金络合物

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.01.006

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 01-0028-06

根据国际理论化学与应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)对活性炭(Activated Carbon 或 Active Carbon; AC)的定义, 活性炭是炭在碳化前、碳化中、碳化后经与气体或化学品(氯化锌)作用以增加吸附性能的多孔碳^[1-2]。近年来, 活性炭具有表面积大、成本低、吸附性强等优点广泛应用于各行各业, 也常用于矿山冶金行业, 如颗粒活性炭吸附回收化学浸出液中的金络合物。活性炭回收浸出液中的金相较于其他回收方法(置换法, 树脂吸附法, 溶剂萃取, 电积冶金法等)具有如下优点: 首先, 活性炭是具有一定机械强度的耐酸耐碱耐腐蚀材料, 吸附过程中不易发生破损、中毒等现象; 其次, 颗粒活性炭加入到矿浆中可以直接吸附金, 省去了矿浆过滤步骤, 节约了生产成本; 第三, 载金碳解吸后通过相应的活化再生方法恢复吸附能力, 可循环利用。

目前, 浸出金的试剂较多, 不同浸出剂与金反应生成的金络合物不同, 金与浸出剂形成的常见金络合物见表 1。各种金络合物在活性炭表面的

吸附机理得到了广泛研究。本文通过对大量文献的分析总结, 概述了活性炭吸附浸出液中金络合物的研究进展。

表 1 金(Au(I))与常见配体的络合常数^[3-5]
Table 1 Stability constant of Au(I) and common ligand

配体	配位数	络合常数(logk)	配体	配位数	络合常数(logk)
CN^-	2	38.3	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	2	28.0
SCN^-	2	17.0	Cl	4	25.6
$\text{CS}(\text{NH}_2)_2$	2	23.3	Br	4	32
NH_3	2	26	I	4	47.6

1 活性炭的结构和性质

活性炭具有较高的吸附性能, 与其结构和性质密切相关。其中, 活性炭的孔结构和表面性质对其吸附性能起着决定性的作用。

(1) 活性炭的孔结构

活性炭孔径大小可分为大孔(大于 50 nm), 中孔(介于 2~50 nm)和微孔(小于 2 nm), 微孔还可以分为亚微孔(小于 0.7 nm)和微孔(介于 0.7~2 nm)。活性炭的碳原子之间通过 sp^2 杂化, 以及炭微晶间的强烈交联形成了孔隙结构高度

收稿日期: 2017-11-23

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目资助(B2017055); 武汉工程大学科学研究基金项目资助, (K201735)

作者简介: 余洪(1986-), 男, 博士。

通讯作者: 张汉泉(1971-), 男, 博士, 教授。

发达的微孔结构。活性炭的孔结构在很大程度上决定其吸附能力，又主要体现在比表面积和孔容积对物质吸附的影响。活性炭微孔容积一般约为 $1.5 \times 10^{-4} \sim 9.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，每千克活性炭含有的孔隙数量约为 1023 个，全部微孔表面积约为 $500 \sim 5000 \text{ m}^2/\text{g}$ 。同时，活性炭的孔径大小影响了被吸附物质的尺寸，多微孔结构较易吸附小分子，孔容积大的则更多的吸附大分子。

(2) 活性炭的表面性质

活性炭表面含有诸如氧、氮、硫、磷等杂原子，构成酸性、碱性、中性的官能团，使得活性炭表面带有极性，对活性炭表面疏水性、表面电子密度等都有影响^[6-7]。活性炭表面的官能团可以彼此作用，形成新的官能团来增强表面的吸附性。因此，活性炭表面官能团的性质和数量对于活性炭的表面活性有很大影响。

2 活性炭吸附 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$

自从 MacArthur 和 Forrest 兄弟采用木炭回收氰化法浸金液中的金以来^[8]，氰化炭浆法已经成为炼金企业最广泛采用的提金方法。按照不同的吸附方式从浸金矿浆中提取金的方法有炭柱法 (CLC)、炭浆法 (CIP)、炭浸法 (CIL)，而炭浆法也成为氰化提金工业中最常用的方法，常见的氰化炭浆法 (CIL) 流程有活性炭吸附和活性炭逆流吸附。

(1) 活性炭吸附 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 机理

氰化炭浆法 (CIP) 常见的吸附机理有以下三种^[9-10]：一是 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 通过静电作用力吸附在活性炭表面，不发生任何变化；二是 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 以离子对的形式吸附在活性炭表面，形成离子对 $\text{M}^{n+}[\text{Au}(\text{CN})_2^-]_n$ ，式中 M^{n+} 指代 Na^+ 、 K^+ 或 Ca^{2+} 等碱金属离子；三是吸附在活性炭表面的离子对化合物 $\text{M}^{n+}[\text{Au}(\text{CN})_2^-]_n$ 发生分解生成难溶的 $\text{Au}(\text{CN})_x$ 。也有研究表明当活性炭与贵液接触时，贵液中的 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 会与活性炭微孔表面的氧化活性中心上的阴离子发生置换反应，从而将贵液中的 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 吸附于活性炭的微孔表面^[11]。

在活性炭吸附金的研究中，它的理论方面的研究的确远远落后于工业实践，M.A. 米列图科夫^[12]总结了实践经验基础上的研究结果，也归纳了活

性炭的吸附机理：(1) 在氰化溶液中金以离子对偶或中性分子形式被吸附在活性炭的内表面上，或是络合离子与金属离子结合沉积在活性炭的孔隙里，其中金属离子来自溶液或是活性炭的灰分（这些金属离子可能有 Ca、K、Na 等）；(2) $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 阴离子发生化学分解，生成不溶解的 AuCN ，并留在炭的孔隙里；(3) 部分金氰络合物被还原成某些含有氧化态为 0 和 1 价的金原子化合物；(4) $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 离子或 AuCN 被还原成金属 Au。

N. 楚奇达 (TSuchida) 研究表明， $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 通过 OH^- 进行离子交换，随后氧化降解为 AuCN ，吸附在活性炭上。菲尔德曼 (Feldtman) 提出 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 的氧化降解过程为：



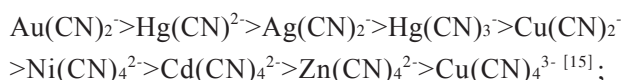
不少研究者认为，在活性炭吸附金氰化络合物的过程中伴随着一些化学变化，这些化学反应都是有条件的，例如：活性炭催化 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ （由阴离子组成的混合物）的氧化反应为：



$\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 完全分解成 AuCN 和 CNO^- ，促使反应向右移动；除此之外，还可能形成沉积物，活性炭表面氧化官能团之间的作用也会导致在活性炭相里出现 AuCN 。由此可以得出：氰化溶液中的金是以离子对、阴离子和普通氰根离子的形式被吸附；在活性炭相里金的这些存在形式之间处在平衡状态^[13]。

(2) 影响活性炭吸附 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 的因素

在活性炭吸附氰化络合物中会有很多反应机理存在，这与吸附条件的变化有关^[13]。除了活性炭孔结构、比表面积、表面性质，改变活性炭表面性质和活性炭的大小可以影响对金的吸附容量外，还有试剂种类、试剂浓度、吸附物的性质、溶液酸碱度和其他杂质离子也能影响活性炭的作用，例如含铜的载金液，铜会被活性炭吸附于微孔表面，使活性炭上吸附金的晶格数量减少，从而使金在活性炭上的吸附容量也随之减少，活性炭对金的吸附效率降低^[14]，这时候需要选择适当的方法脱铜，消除铜离子对吸附金的影响。活性炭对不同含氰络合物的吸附顺序为：



当溶液中有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等离子存在时, 促进活性炭对 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 的吸附顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ [16]。

(3) 载金碳的解吸

载金碳解吸法的原理是由于 CN^- 与 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 在活性炭表面发生竞争吸附, 使金的吸附降低, 从而达到解吸的目的。但是这种方法成本高, 含有剧毒的氰化物, 因此人们常用无氰解吸法。解吸工艺有 $\text{NaOH} +$ 有机物, ESPIELL [17] 采用 NaOH 与丙酮的混合液可以较好的解吸金, NaOH 与一部分醇也可以达到解吸的作用, 经研究 [18] $\text{NaOH} +$ 乙二醇的方法较好。

(4) 活性炭再生

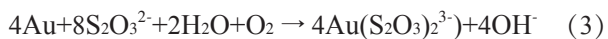
活性炭在氰化解吸提金后, 表面会有一些杂质离子影响其吸附活性, 通常采用热再生法对有机物进行氧化分解, 或者碳化难分解的杂质, 使得活性炭重新具有吸附能力。

3 活性炭对其他金络合物的吸附研究

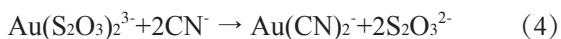
近年来, 由于氰化物为剧毒物质, 处理含铜、含碳等金矿石具有一定的局限性, 许多研究者致力于研究能取代氰化物的无毒提金技术。采用活性炭吸附回收无毒浸出剂中金络合物也得到了相应研究。

(1) 活性炭吸附回收 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的研究

硫代硫酸盐是最有希望取代氰化法提金的无毒浸金试剂, 浸金原理如式 (3) :



研究发现, 没有经过任何处理的活性炭对浸出液中 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 几乎没有吸附作用, 这是由于 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 分子体积、静电力较大致使金离子与活性炭表面距离增大, 吸附难度增加。Young [19-20] 采用氰化亚铜浸渍改性活性炭, 改性活性炭能很好的吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$, 吸附机理为式 (4)。但吸附过程有剧毒的氰化物参与, 具有一定的危险性。



余洪 [21] 详细研究了改性活性炭吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$, 发现采用麻栗树、株列树、西南桦和椰壳四种不同基质活性炭对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的吸附能力为西南桦 > 椰壳 > 麻栗树 > 株列树, 但最大吸附率仅为 12.93%, 由此表明未改性活性炭对

$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 几乎没有吸附能力。

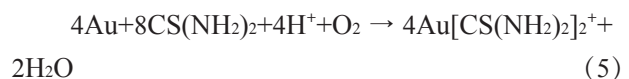
采用类普鲁士蓝化合物 [22-24] 改性活性炭吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 发现, 以氯化铜或硝酸银制备的类普鲁士蓝化合物改性活性炭对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 有很强的吸附能力。活性炭采用“过渡金属盐溶液浸渍 - 焙烧 - 亚铁氰化钾溶液浸渍”改性工艺流程, 制备出的亚铁氰化铜 [25-26] 改性活性炭 (AC-CuFC) 和亚铁氰化银改性活性炭 (AC-AgFC) 对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 最大负载量分别为 2.81 kg/tAC 和 3.35 kg/tAC。采用红外、XPS 研究 AC-CuFC 和 AC-AgFC 吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的机理表明, 吸附过程中 Au^+ 与改性活性炭上的 H^+ 、 Cu^{2+} 或 Ag^+ 发生离子交换吸附, 最终部分金被还原成单质金。

浸出液的 pH 值、溶解氧、吸附温度和吸附液中 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的浓度对改性活性炭吸附金均有影响。吸附液 pH 值为 5 ~ 7.2 时, 适量的溶解氧、较高的吸附温度有利于 AC-CuFC 和 AC-AgFC 对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的吸附 [27-28]。常见杂质金属离子 Ag^+ 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 对 AC-CuFC 吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的影响试验研究发现, 溶液中含有少量 (5 mg/L) 的 Ag^+ 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 与 Co^{2+} 时, 首先与 OH^- 或 NH_3 发生反应, 促进了吸附的进行, 提高了改性活性炭对金的吸附率。但溶液中 Ag^+ 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 与 Co^{2+} 浓度过高时, 可生成金属氢氧化物沉淀 $\text{Me}(\text{OH})_x$ 覆盖在改性活性炭的表面, 阻碍了改性活性炭对金的吸附。其影响顺序为: $\text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} \approx \text{Pb}^{2+} > \text{Ag}^+$ 。

载金碳的解吸试验研究 [29] 表明, Na_2S 发生水解生成相应的 SH^- 和 OH^- , 与活性炭上的单质金在强碱条件下发生反应, 生成相应的 $\text{Au}(\text{SH})(\text{OH})^-$ 和少量的 $\text{Au}(\text{SH})_2^-$, 从而促进金的解吸 [30]。该解析法具有解吸时间短、解吸速率快等优点。再生试验研究表明, 0.1 mol/L 的双氧水对活性炭有很好的再生效果。

(2) 活性炭吸附回收 $\text{Au}[\text{CS}(\text{NH}_2)_2]_2^+$

硫脲作为浸出剂浸金时, 常在酸性有氧环境下进行, 浸出原理如式 (5) :



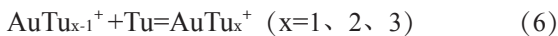
相关研究表明, 活性炭在酸性硫脲浸出液中吸附 $\text{Au}[\text{CS}(\text{NH}_2)_2]_2^+$ 具有较高的吸附速度、吸附效率和吸附容量, 且回收率高、解吸快速、矿石适应性强。在活性炭浓度为 2 g/L、金浓度 30 mg/L

的条件下,最大吸附容量为 26.5 kg/t, 金吸附速度快,回收率高,用 4 g/L 的活性炭经两段两小时的吸附,回收率可达 99% 以上,并且用乙醇和氢氧化钠做解吸剂取得很好的解吸效果^[31]。

有研究表明^[32],硫脲浓度增加,活性炭对金的吸附率下降,但不管硫脲浓度多高,活性炭吸金率都随活性炭添加量的增大而增加。当溶液中的硫脲、硫酸和 Fe³⁺ 的浓度分别为 5 g/L、0.4 mol/L 和 0.5 g/L,并在活性炭浓度为 7.5 g/L、温度为 35℃ 和吸附时间为 75 min 的较佳条件下,金可被完全吸附在活性炭上,活性炭是吸附回收酸性硫脲浸出液中金的良好吸附剂。

活性炭吸附 Au[CS(NH₂)₂]₂⁺ 的影响因素研究表明,高浓度的银离子会大大降低活性炭在硫脲浸出液中吸附金的速率和容量,主要是因为大量银离子阻碍了金在溶液中的扩散以及金在活性炭上吸附的顺利进行,同时,少量银离子以大分子络合物的形式占据了较大的活性炭表面^[33],使得活性炭对金的吸附下降。

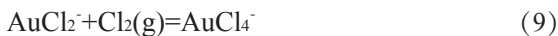
Au[CS(NH₂)₂]₂⁺ 在活性炭表面的吸附形态:有研究者^[34]试验得出: AuTu₂Cl (Tu 系硫脲 CS(NH₂)₂ 的简写)晶体溶于蒸馏水后,形成 AuTu⁺、AuTu₂⁺、AuTu₃⁺ 三种形态络离子,三种物质存在如下平衡:



活性炭将 AuTu_{x-1}⁺ 还原为 Au(0) 而吸附在外表面上:

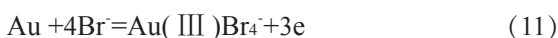


(3) 活性炭吸附回收卤素浸出液中的金
卤素浸出金有氯化浸金、碘化浸金和溴化浸金。氯化浸金主要有以下反应^[35]



因为在氯化浸金体系下浸出液为酸性,在该环境下活性炭表面带正电,从而吸附带有负电荷的 AuCl₄⁻,所以活性炭在浸出液中是有选择的靠分子间力将 AuCl₄⁻ 吸附在其表面。

溴化浸金见式 (10)、(11)^[36]:



溴化浸金液中活性炭的吸附原理为:在酸性条件下,带正电荷的活性炭吸附带负电的 AuBr₄⁻。

碘液^[37]也可以提取金,在浸出过程中形成稳定的 AuI₂⁻ 络合物,反应如 (12)~(14):



反应的原理是碘和碘盐反应生成三碘阴离子,在碘盐的存在下,阴离子与金生成可以被活性炭吸附的络合物,以此来吸附回收金。

(4) 活性炭吸附回收硫氰酸盐浸出液中的金
硫氰酸盐提金法是在酸性介质中以软锰矿(含二氧化锰 30%~50%)为氧化剂,硫氰酸钠为络合剂,使金矿中的金以络离子 Au(SCN)₂⁻ 溶解下来,该方法不污染环境,提金效率高且反应快。

根据苏联学者 N.H·马斯列尼茨基等^[38]发展的现代概念,他们认为活性炭吸附电解质的反应是一种离子交换的过程,活化后的活性炭与空气中的氧作用,在炭上生成碱性的氧化物。当活性炭与溶液作用时,活性炭上的氧就以氢氧根离子的形式进入溶液,形成双电子层。活性炭作为一种阴离子交换剂,在浸金时,浸金液中的 Au(SCN)₂⁻ 与活性炭表面的 OH⁻ 发生交换反应,金被活性炭吸收。

有试验表明,对硫氰酸盐法浸取金,活性炭吸附金时,应控制 pH 值在 1~2。NaSCN 浓度对活性炭吸附金的影响很大,当 NaSCN 浓度从 0 增加到 5% 时,活性炭载金量 18.71 mg/g 降到 4.71 mg/g,金吸附率从 88.17% 降到 22.49%。硫氰酸盐浸取金时,矿石中的铁会部分溶解,主要以 Fe³⁺ 的形式存在,少量以 Fe²⁺ 存在,对活性炭吸附金影响较小。

活性炭的碘值和比表面积对活性炭吸附金有较大影响,碘值高,比表面积大,活性炭的载金量就大,反之则小。硫氰酸盐法浸取金时,加入 H₂SO₄ 调 pH 值,由于 MnO₂ 的氧化作用,会生成 Fe(III) 和 Fe(II) 硫酸盐及游离态硫酸,它们均以 SO₄²⁻ 离子存在于浸取液中,但是对活性炭影响也很小。

庞捷^[39]证实,活性炭质量、浸取液 pH 值、硫氰酸盐浓度、吸附温度对活性炭吸附金影响较大,而活性的颗粒大小和 Fe²⁺、Fe³⁺、SO₄²⁻ 等离子浓度的影响较小。为了提高活性炭载金量和对金的吸附率,应选用碘值高、比表面积大、硫氰酸

盐浓度小、浸取液 pH 值低和较低温度下吸附。

4 结 论

(1) 活性炭具有一定机械强度,耐酸耐碱耐腐蚀性能,吸附过程中不易发生破损、中毒等现象,颗粒活性炭吸附金可省去矿浆过滤从而节约了生产成本,载金碳解吸后通过活化再生可循环利用等优点。

(2) 相关研究表明, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 以离子对偶或中性分子形式被吸附在活性炭的内表面上,或是络合离子与金属离子结合沉积在活性炭的孔隙里;或者生成不溶解的 AuCN , 或 AuCN 被还原成单质 Au 。

(3) 非氰提金工艺中,综述了活性炭吸附 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的研究进展,类普鲁士蓝改性活性炭可提高其对 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 的吸附能力。 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ 在类普鲁士蓝改性活性炭表面主要以单质 Au 的形式吸附存在。

(4) 活性炭吸附硫脲浸出液、卤素浸出液以及硫氰酸盐浸出液中的金,主要吸附机理为静电吸附和分子间作用力发生吸附。

(5) $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 在活性炭表面的吸附机理比较复杂,还未形成统一的认识,需进一步深入研究,得出广泛的吸附机理,从而为实际生产提供指导。

参考文献:

- [1] 郑其庚. 活性炭的应用 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002.
- [2] 王爱平. 活性炭对溶液中重金属的吸附研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.
- [3] 段玲玲, 胡显智. 从硫代硫酸盐浸金液中回收金的研究进展 [J]. 矿冶, 2007, 16(4): 40-4.
- [4] NAVARRO P, VARGAS C, VILLARROEL A, et al. On the use of ammoniacal/ammonium thiosulphate for gold extraction from a concentrate [J]. Hydrometallurgy, 2002, 65(1): 37-42.
- [5] Aylmore M G, Muir D M. Thiosulfate leaching of gold—a review [J]. Minerals Engineering, 2001, 14(2): 135-74.
- [6] 范延臻, 王宝贞. 改性活性炭的表面特性及其对金属离子的吸附性能 [J]. 环境化学, 2001, 20(5): 437-443.
- [7] 白树林. 改性活性炭对 $\text{Cr}(\text{III})$ 吸附研究 [J]. 化学研究应用, 2001, 13(6): 670-672.
- [8] McDougall G J, Hancock R D. Gold complexes and activated carbon [J]. Gold Bulletin, 1981, 14(4): 138-53.
- [9] Adams M, Fleming C. The mechanism of adsorption of aurocyanide onto activated carbon [J]. Metallurgical Transactions B, 1989, 20(3): 315-25.
- [10] 周崇松. 金在活性炭上的吸附和解吸行为研究 [D]; 成都: 成都理工大学, 2005.
- [11] 甘胤, 吴建存. 高铜载金炭脱铜技术研究进展 [J]; 黄金, 2015, 11(36): 57-22
- [12] M.A. 米列图科夫. 活性炭吸附金氰络合物机理 (待续) [J]. 黄金, 2005, 9(26): 57.
- [13] M.A. 米列图科夫. 活性炭吸附金氰络合物机理 (续完) [J]. 黄金, 2005, 10(26): 48.
- [14] 黄志华. 含铜金矿氰化浸金回收过程中铜的行为 [J]. 矿产综合利用, 2015(1): 35 -39.
- [15] 周崇松. 金在活性炭上的吸附和解吸行为研究 [D]; 成都: 成都理工大学, 2005.
- [16] 陈淑萍. 从氧化贵液 (矿浆) 中回收金技术进展 [J]. 黄金, 2012,(2): 43-8.
- [17] Espiell F, Roca A, Cruells M, et al. Gold desorption from activated carbon with dilute NaOH /organic solvent mixtures [J]. Hydrometallurgy, 1988, 19(3): 321-33.
- [18] Ubaldini S, Massidda R, Abbruzzese C, et al. A Cheap Process For Gold Recovery From Leached Solutions, 2003.
- [19] Young C A, Gow R N, Twidwell L G, et al. Cuprous cyanide adsorption on activated carbon: pre-treatment for gold take-up from thiosulfate solutions, F, 2008 [C].
- [20] Young C, Gow N, Melashvili M, et al. Impregnated Activated Carbon for Gold Extraction from Thiosulfate Solutions [J]. Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources, 2012, 391.
- [21] 余洪. 活性炭改性及其对金硫代硫酸根络离子吸附特性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [22] Loos-neskovic C, Ayrault S, Badillo V, et al. Structure of copper-potassium hexacyanoferrate (II) and sorption mechanisms of cesium [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2004, 177(6): 1817-28.
- [23] Ayrault S, Jimenez B, Garnier E, et al. Sorption mechanisms of cesium on $\text{CuII} 2 \text{Fe II} (\text{CN})_6$ and $\text{Cu II} 3 [\text{Fe III} (\text{CN})_6]_2$ hexacyanoferrates and their relation to the crystalline structure [J]. Journal of solid state chemistry, 1998, 141(2): 475-85.
- [24] Ayrault S, Loos-Neskovic C, Fedoroff M, et al. Compositions and structures of copper hexacyanoferrates (II) and (III): experimental results [J]. Talanta, 1995, 42(11): 1581-

- 93.
- [25] Bellomo A. Formation of copper (II), zinc (II), silver (I) and lead (II) ferrocyanides[J]. Talanta, 1970, 17(11): 1109-14.
- [26] Loos-Neskovic C, Ayrault S, Badillo V, et al. Structure of copper-potassium hexacyanoferrate (II) and sorption mechanisms of cesium [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2004, 177(6): 1817-28.
- [27] Harish S, Joseph J, Phani K L N. Interaction between gold (III) chloride and potassium hexacyanoferrate (II/III)-Does it lead to gold analogue of Prussian blue [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(16): 5717-21.
- [28] Burdinski D, Bles M H. Thiosulfate- and thiosulfonate-based etchants for the patterning of gold using microcontact printing [J]. Chemistry of Materials, 2007, 19(16):3933-44.
- [29] Jeffrey M I, Hewitt D M, Dai X, et al. Ion exchange adsorption and elution for recovering gold thiosulfate from leach solutions [J]. Hydrometallurgy, 2010, 100(3-4): 136-43.
- [30] Tossell J. The speciation of gold in aqueous solution: A theoretical study [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60(1): 17-29.
- [31] 张云, 杨建元, 胡承祥. 活性炭从硫脲浸出液中回收金的工艺研究 [J]. 矿物岩石, 1999, 19(2): 98-100.
- [32] 利用活性炭从硫酸酸性硫脲金浸出液中回收金的研究 [J]. 国家铀金地质, 1995, 12(2): 185-192.
- [33] 张云, 杨建元, 胡承祥. 高含量银对活性炭从硫脲溶液中吸附金的影响 [J]. 黄金, 21(3): 30-33.
- [34] 白光辉. 活性炭自硫脲溶液吸附金的氧化还原机理探讨 [J]. 西安冶金建筑学院学报, 1993, 25(4): 467-473.
- [35] 钟平, 胡跃华, 黄桂萍, 等. 氯化提金研究和工艺应用现状 [J]. 赣南师范学院学报, 1997, (6): 61-66.
- [36] 王京芳. 热力学分析溴化浸金体系 [J]. 南阳师范学院学报, 2008, 7(9): 47-48.
- [37] 史娟华. 氯化钠一次氯酸钠法提取低品位矿渣中的金 [D]. 山东, 山东理工大学, 2014: 1-63.
- [38] N.H. 马斯列尼茨基著, 田玉芝译, 贵金属冶金学, 原子能出版社, 1992. 213.
- [39] 庞捷. 硫氰酸盐提金法活性炭吸附金的研究 [J]. 河南冶金, 1995(4): 45-51.

Research Progress of Recovery of Gold Complex by Activated Carbon from Leaching Liquid

Yu Hong, Xie Lei, Cai Xiang, Hu Chaojie, Zhang Hanquan

(School of Xing Fang mining Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei, China)

Abstract: Gold and cyanide in ores are used as leaching agents, and gold complexes are leached into leaching fluids. As the active carbon has the advantages of corrosion resistance, strong adsorption ability, recycle and so on, it is commonly used to adsorb the gold complexes. On the basis of previous studies, the mechanism and progress of the adsorption of $Au(CN)_2^-$ by activated carbon in cyanide-carbon slurry method are emphatically analyzed. The mechanism and research progress of non-cyanide leaching solution (thiosulfate leaching solution, Thiourea leaching solution, halogen leaching solution and thiocyanate leaching solution) were summarized. It provides reference for better application of activated carbon in gold extraction industry.

Keywords: Activated carbon; Adsorption; Gold complex