

分析测试

含金硫铁矿溶金过程中多种硫形态的测定

王娟^{1,2*}, 赵冲^{1,2}, 李志伟¹, 夏彬涵³, 冯兰慧^{1,2}, 张帆^{1,2}, 张芳^{1,2}, 钟莅湘^{1,2}

(1.河南省地质局地质灾害防治中心,河南 郑州 450012;
2.自然资源部贵金属分析与勘查技术重点实验室,河南 郑州 450012;
3.河南地矿职业学院,河南 郑州 450007)

摘要:为了查明含金硫铁矿在碱性环境下化学氧化过程中金硫自配位溶金机理,需要准确测定浸出过程中硫的转换形态以及各形态的含量。由于碱性浸金体系中含硫化物本身不稳定,相互之间会发生反应,所以需要建立一种能同体系、快速测定这些离子方法。采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定浸出液中全硫含量,用离子色谱仪测定浸出液中 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 3种离子的含量,用全自动流动注射分析仪—硫化物检测仪测定 S^{2-} 含量;用差减法计算出 S_x^{2-} ($x>1$)的含量。结果表明, $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 和总S(SO_4^{2-} 计)5种离子的线性关系良好,线性相关系数(R)为0.999 5~0.999 9;样品的加标回收率为93.6%~108.1%,精密度的0.7%~3.4%。该方法能快速测定同一溶金体系中多种含硫离子,可作为含金硫铁矿在碱性环境下浸出过程中硫的转换及各形态含量的测定方法。

关键词:含金硫铁矿;硫;形态分析;等离子体发射光谱仪;离子色谱仪;全自动流动注射分析仪

中图分类号:O657

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)05-0257-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.05.043

Determination of various sulfur forms during gold extraction process of gold-bearing pyrite

WANG Juan^{1,2*}, ZHAO Chong^{1,2}, LI Zhi-wei¹, XIA Bin-han³, FENG Lan-hui^{1,2},
ZHANG Fan^{1,2}, ZHANG Fang^{1,2}, ZHONG Li-xiang^{1,2}

(1.Geological Hazard Prevention and Control Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450012, China;
2.Key Laboratory of Precious Metals Analysis and Exploration Technology, Ministry of Land and Resources,
Zhengzhou 450012, China; 3.Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: It is necessary to determine precisely the conversion forms of sulfur and the content of each sulfur form in the leaching process to find out the gold-sulfur self-coordination mechanism in the chemical oxidation process of gold-bearing pyrite in an alkaline environment. Sulfur-containing compounds themselves are unstable in alkaline gold extraction process for gold-bearing pyrite, and may react with each other. Therefore, a method needs to be established to quickly measure these ions in the same system. The content of total sulfur in the leached solution is determined by means of inductively coupled plasma emission spectrometer, and the contents of $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} and SO_4^{2-} are determined by means of ion chromatograph. The content of S^{2-} is determined by means of fully automatic flow injection analyzer. The content of S_x^{2-} ($x>1$) is obtained through calculation by subtraction method. It is verified by the results that $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} , SO_4^{2-} , S^{2-} and total S (counting on SO_4^{2-}) have a good linear relationship, and the linear correlation coefficients are between 0.999 5 and 0.999 9. The recoveries are in the range of 93.6%–108.1%, and the precision is in the range of 0.7%–3.4%. This method can be used to determine rapidly various sulfur ions simultaneously in the same gold extraction system, and can be used as a method to determine the conversion forms of sulfur and the contents of various sulfur forms in the gold-bearing pyrite leaching process under alkaline environment.

Key words: gold-bearing pyrite; sulfur; morphological analysis; ICP-AES; ion chromatograph; fully automatic flow injection analyzer

传统焙烧-氰化浸金工艺对环境污染严重。硫可以在碱性条件下与金(I)阳离子形成稳定的配合物^[1]。同时,碱性溶液中,硫化物易被氧化成具有溶金作用的多硫化物和硫代硫酸盐^[2]。根据这一原理,有学者提出含金硫化物碱性氧化金硫自配位溶解提金的研究思路^[3],即在碱性环境下,通过化学氧化使载金硫化物中的硫以 S_x^{2-} 和 $S_2O_3^{2-}$ 等浸

金络合剂的形式产出,直接溶解硫化物中的金,实现金的同步非氰浸出。

为了明确含金硫铁矿在碱性环境下化学氧化过程中金硫自配位溶金机理,需要准确测定浸出过程中硫的转换形态以及各形态的含量。含金黄铁矿碱性氧化反应过程中,硫的主要形态有 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 、连多硫酸根 S_x^{2-} ($x>1$)、 HS^- 等离子^[4-7]。

收稿日期:2024-09-27;修回日期:2025-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51874259)

作者简介:王娟(1983-),女,硕士,高级工程师,研究方向为水质分析、矿冶分析,通讯联系人,wangjuanlanbing@126.com。

有关硫代硫酸盐、亚硫酸盐、硫酸盐、二价硫、多硫酸根 S_x^{2-} ($x>1$) 的测定已有报道^[8-17], 但碱性浸金体系中这些离子的测定未见报道。由于很多含硫的离子本身不稳定, 相互之间会发生反应, 所以需要建立一种能同体系、快速测定这些离子的方法。

本文中采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-AES) 测定浸出液中全硫的含量, 用离子色谱仪 (IC) 同时测定浸出液中 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 3 种离子的含量, 用全自动流动注射分析仪—硫化物检测仪 (FIA) 测定 S^{2-} 含量; 用差减法计算出多硫酸根的含量。该方法操作简单、结果准确、灵敏度高、重复性好、测定快速, 可作为碱性浸金体系中多种形态硫的测定方法。该方法的建立, 为研究硫在该体系中的化学形态及相互转化提供了科学依据; 同时为含金硫铁矿在碱性环境下金硫配位溶金的研究提供了方法基础。从而为进一步开发绿色“预氧化-浸出”提金技术, 实现含硫难处理金精矿的绿色化高效提金提供技术保障。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

ICS-2000 离子色谱仪 (美国 Dionex 公司); IonPac AS19 阴离子交换柱, IonPac AS19 保护柱, DionexASRS-ULTRA-4mm 再生抑制器, 电导检测器; 淋洗液为 18 mmol/L KOH 溶液, 流速 1.0 mL/min; 抑制器电流 35 mA, 电导池温度 35℃, 柱温 30℃, 进样体积 25 μ L。

ICAP 6300 电感耦合等离子体光谱仪 (美国赛默飞公司), 配备耐氢氟酸的氧化铝中心管、雾化器和雾室。仪器条件: 射频功率 1.15 kW, 载气流速 0.5 L/min, 雾化器气体流速 0.7 L/min, 冷却气流速 12 L/min, 分析谱线为 180.731 nm。

BDFIA-8000 全自动流动注射分析仪—硫化物检测仪 (北京宝德仪器公司), 仪器条件: 载流为 1 g/L NaOH 溶液, 蠕动泵转速 35 r/min, 加热温度 65℃, 波长 660 nm, 样品周期 200 s, 注射时间 100 s, 进样时间 140 s, 出峰时间 40 s, 到达阀时间 290 s, 峰宽 80 s。

Nanopure 超纯水机 (美国 Thermo Scientific Barnstead 公司)。

硫酸根标准溶液: $c(SO_4^{2-}) = 100 \mu\text{g/mL}$, GBW (E)083216, 北京北方伟业计量技术研究院。

硫代硫酸钠标准溶液: $c(S_2O_3^{2-}) = 224 \mu\text{g/mL}$, BWG083814 (20210525), 北京北方伟业计量技术研

究院。

亚硫酸根标准溶液: $c(SO_3^{2-}) = 100 \mu\text{g/mL}$, B21070383, 坛墨质检科技股份有限公司。

硫化物标准溶液: $c(S^{2-}) = 100 \mu\text{g/mL}$, GSB 07-2733—2019, 生态环境部标准样品研究所。

硫酸根标准样品: $c(SO_4^{2-}) = 17.7 \mu\text{g/mL}$, GSB 07-1196—2000 (201940), 生态环境部标准样品研究所; $c(SO_4^{2-}) = 45.7 \mu\text{g/mL}$, GSB 07-1381—2001 (204726), 环境保护部标准样品研究所; $c(SO_4^{2-}) = 100.0 \mu\text{g/mL}$, GSB 04-1773—2004(a), 国家有色金属及电子材料分析测试中心。

硫代硫酸钠标准样品: $c(S_2O_3^{2-}) = 5.606 \mu\text{g/mL}$, GBW (E)083813, 北京北方伟业计量技术研究院; $c(S_2O_3^{2-}) = 11.234 \mu\text{g/mL}$, GBW (E)083814, 北京北方伟业计量技术研究院; $c(S_2O_3^{2-}) = 112.56 \mu\text{g/mL}$, GWZ 8176—2016 (20190826), 北京北方伟业计量技术研究院。

硫化物标准样品: $c(S^{2-}) = 0.42 \mu\text{g/mL}$, BWZ 6676—2016A, 北京北方伟业计量技术研究院; $c(S^{2-}) = 1.76 \mu\text{g/mL}$, GSB 07-1373—2001 (205558), 环境保护部标准样品研究所; $c(S^{2-}) = 4.40 \mu\text{g/mL}$, GSB 07-1373—2001 (205549), 生态环境部标准样品研究所。

亚硫酸根标准样品: $c(SO_3^{2-}) = 0.50 \mu\text{g/mL}$, BW81373DW (G0052945), 北京曼哈格生物科技有限公司; $c(SO_3^{2-}) = 9.00 \mu\text{g/mL}$, BW81373DW (H3000502), 北京曼哈格生物科技有限公司; $c(SO_3^{2-}) = 14.9 \mu\text{g/mL}$, BWZ 7067—2016, 北京北方伟业计量技术研究院。

SO_3^{2-} 标准工作液临用时用 1% 甲醛溶液逐级稀释。 S^{2-} 标准工作液用 1% (V/V) 抗氧化剂和 1 g/L NaOH 溶液逐级稀释。

抗坏血酸 (分析纯, 湘大化工公司); EDTA-2Na、NaOH、甲醛 (分析纯, 国药集团化学试剂公司); 实验用水为 5 次蒸馏水, 电导率值小于 1.25 μ S。0.22 μ m 微孔尼龙膜。

1.2 标准曲线绘制

分别吸取 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 标准储备液, 逐级稀释, 配制成 8 个不同浓度的混合标准系列, $S_2O_3^{2-}$ 标准系列浓度为 0、1.12、5.6、11.2、22.4、56.1、112.1、224.3 mg/L; SO_3^{2-} 标准系列浓度为 0、0.05、1.00、5.00、10.0、20.0、50.0、100.0 mg/L; SO_4^{2-} 标准系列浓度为 0、1.00、5.00、10.0、20.0、50.0、100.0、200.0 mg/L。按浓度由低到高的顺序依次注入 IC

测定,绘制标准曲线。

吸取 S^{2-} 标准储备液,逐级稀释为 0、0.010、0.10、0.50、1.00、2.00、5.00、10.00 mg/L 8 个不同浓度的单独标准系列溶液, FIA 测定,绘制标准曲线。

吸取 SO_4^{2-} 标准储备液,逐级稀释为 0、1.00、5.00、10.0、20.0、50.0、100.0、200.0 mg/L 8 个不同浓度的单独标准系列溶液, ICP-AES 测定,绘制标准曲线。

1.3 样品前处理及测定

取 1 mL 浸金液,用 0.1% 甲醛、1 g/L NaOH 溶液逐级稀释,摇匀后备用。将稀释后的样品依次通过 0.22 μm 微孔滤膜和 Dionex OnGuard II Ag/H 纯化柱,弃去初始 3 mL 后收集剩余样品,制成 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 待测溶液, IC 测定。

用 20% (V/V) 抗坏血酸、1% (V/V) EDTA-2Na、1 g/L NaOH 配成抗氧化剂。容量瓶中依次加入 NaOH 溶液、1% (V/V) 抗氧化剂和浸金液,最后用 NaOH 溶液稀释、定容,制成 S^{2-} 待测溶液, FIA 测定。

2 结果与讨论

2.1 标准曲线及方法检出限

按 1.2 节方法进行实验,得到不同形态硫的标准曲线线性方程和相关系数,见表 1。

由表 1 可知, S^{2-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 $S_2O_3^{2-}$ 和总 S (SO_4^{2-} 计) 这 5 种离子线性关系良好,线性相关系数 (R) 在 0.999 5~0.999 9 之间。

根据标准 GB/T 34672—2017,信噪比为 3 时对应的浓度为待测物浓度的检出限。取标准曲线中待测离子最低浓度连续检测 6 次,计算得 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、

表 1 不同形态硫的线性方程和相关系数

硫的形态	测试方法	线性方程	相关系数(R)
$S_2O_3^{2-}$	IC	$Y_1 = 8.5203X_1 + 0.0019$	0.9998
SO_3^{2-}	IC	$Y_2 = 18.4536X_2 + 0.0175$	0.9996
SO_4^{2-}	IC	$Y_3 = 4.0552X_3 + 1.2502$	0.9997
S^{2-}	FIA	$Y_4 = 0.0004X_4 + 0.0007$	0.9999
Total S (SO_4^{2-} 计)	ICP-AES	$Y_5 = 179.98X_5 + 1.373$	0.9995

注: $X_1 \sim X_5$ 为离子浓度, mg/L; $Y_1 \sim Y_3$ 为峰面积, $\mu\text{S} \cdot \text{min}$; Y_4 为峰面积, Abs $\cdot \text{min}$; Y_5 为强度, 无量纲。

SO_4^{2-} 这 3 种离子的检出限分别为 0.033、0.041、0.011 mg/L。

按样品分析步骤,对浓度值为估计的方法检出限 2~5 倍的样品进行 10 次平行测定,计算标准偏差,按公式计算 S^{2-} 和总 S (SO_4^{2-} 计) 的方法检出限 (MDL)。

$$\text{MDL} = t_{(n-1, 0.99)} \times S$$

式中, n 为样品的测试次数; S 为样品的标准偏差; t 表示自由度为 $n-1$ 、置信度为 99% 时的 t 分布 (单侧)。

计算得 S^{2-} 、总 S (SO_4^{2-} 计) 的方法检出限分别为 0.004、0.043 mg/L。由于浸出液中硫阴离子含量较高,因此灵敏度可以满足检测需求。

2.2 准确度和精密度

取高、中、低 3 种不同浓度的标准样品,连续 6 次平行测定,计算准确度和精密度,结果见表 2。 $S_2O_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 和总 S 的相对标准偏差 (RSD) 分别为 0.7%~2.6%、0.8%~1.6%、0.7%~2.1%、0.5%~2.0%、0.6%~1.6%,相对误差 (RE_i) 分别为 -1.8%~2.4%、-4.7%~-1.9%、-2.4%~1.0%、-6.9%~-1.2%、-3.7%~3.5%,表明本方法准确度和精密度良好。

表 2 方法的准确度和精密度

离子形态	真值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	测定结果/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	相对误差/ %	相对标准 偏差/%
		1	2	3	4	5	6			
总 S	5.90	5.72	5.80	5.84	5.86	5.86	5.84	5.82	-1.4	0.9
	15.23	14.75	14.71	15.05	14.56	14.46	14.43	14.66	-3.7	1.6
	33.33	34.49	34.72	34.39	34.64	34.17	34.58	34.50	3.5	0.6
S^{2-}	0.42	0.387	0.389	0.395	0.391	0.392	0.392	0.391	-6.9	0.7
	1.76	1.65	1.75	1.69	1.70	1.68	1.71	1.697	-3.6	2.0
	4.40	4.33	4.38	4.32	4.35	4.35	4.36	4.348	-1.2	0.5
SO_4^{2-}	17.7	17.42	17.81	17.18	16.75	17.09	17.36	17.27	-2.4	2.1
	45.7	43.21	44.49	43.05	43.21	44.68	43.76	45.21	-1.1	1.6
	100.00	100.29	101.11	101.22	100.65	100.43	102.07	100.13	1.0	0.7

续表

离子形态	真值/ (mg·L ⁻¹)	测定结果/(mg·L ⁻¹)						均值/ (mg·L ⁻¹)	相对误差/ %	相对标准 偏差/%
		1	2	3	4	5	6			
SO ₃ ²⁻	0.50	0.472	0.471	0.468	0.477	0.485	0.486	0.477	-4.7	1.6
	9.00	8.72	8.63	8.77	8.85	8.64	8.81	8.74	-2.9	1.0
	14.9	14.52	14.63	14.49	14.67	14.55	14.81	14.61	-1.9	0.8
S ₂ O ₃ ²⁻	5.606	5.372	5.406	5.359	5.626	5.583	5.691	5.506	-1.8	2.6
	11.234	11.59	11.47	11.61	11.49	11.52	11.31	11.50	2.4	0.9
	112.56	114.33	113.57	113.21	114.07	112.05	114.11	113.56	0.9	0.7

2.3 稀释液浓度的影响

用 IC 分析含金硫铁矿浸出液中的 S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻ 时,由于浸出液离子浓度很高,溶液需要稀释。浸出液为碱性溶液,直接加水稀释会导致溶液 pH 降低,致使原溶液中部分硫形态相互转化。如果稀释液碱含量过高,会造成柱污染,水的负峰消失而出现 1 个正的碱峰,从而导致各个组分出峰时间前移,致使 SO₃²⁻ 与其他峰重合,影响 SO₃²⁻ 的测定。因此,用 NaOH 溶液稀释时,NaOH 的浓度需要优化。稀释液中 NaOH 浓度对测定结果的影响见表 3。

表 3 稀释液 NaOH 的浓度对测定结果的影响

mg/L					
c(NaOH)	c(S ₂ O ₃ ²⁻)	c(SO ₃ ²⁻)	c(SO ₄ ²⁻)	c(S ²⁻)	c(全 S)
0	43791.2	22.1	4221.6	87.1	31817.9
0.01	50531.3	37.7	3537.1	130.5	51744.3
0.1	56110.1	60.0	3103.2	135.4	62309.1
1	58576.4	61.4	2949.5	173.6	62051.4
10	58526.1	62.7	2938.8	164.9	60998.8

由表 3 可知,当稀释液中 NaOH 浓度为 0 (即纯水稀释样品)时,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻、S²⁻ 浓度总和大于全 S 浓度,此时,溶液中有大量单质硫沉淀和部分胶质析出。当稀释液中 NaOH 浓度为 0.01 g/L 时,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻、S²⁻ 浓度总和大于全 S 浓度,此时,溶液中有少量沉淀和部分胶质析出。当稀释液中 NaOH 浓度为 0.1 g/L 时,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻、S²⁻ 浓度总和小于全 S 浓度,此时,溶液中无沉淀和极少量胶

质物质。当稀释液中 NaOH 浓度为 1 g/L 时,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻、S²⁻ 浓度总和约等于全 S 浓度,此时,溶液中无沉淀、无胶质。当稀释液中 NaOH 浓度为 10 g/L 时,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻、S²⁻ 浓度总和约等于全 S 浓度,但 10 g/L 的 NaOH 浓度已达到 iCAP 6300 型等离子体发射光谱仪的最大耐盐量。因此,确定稀释液中 NaOH 的最佳浓度为 1 g/L。

2.4 保护剂及样品放置时间的影响

浸出液中 S₂O₃²⁻、SO₃²⁻ 和 S²⁻ 不稳定,易被空气氧化^[18-21]。因此,需要向浸出液中加入一定的保护剂。

取 1 mL 浸出液,用 0.1% 甲醛、1 g/L NaOH 溶液配成保护剂。以保护剂为介质,逐级稀释样品,制成 S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻ 待测溶液 I。取 1 mL 浸出液,用 20% (V/V) 抗坏血酸、1% (V/V) EDTA-2Na、1 g/L NaOH 为介质,逐级稀释,配制成 S²⁻ 待测溶液 II。将上述 2 份溶液于 4℃ 下避光放置 0、3、6、9、12、18、24、48 h 后,分别测定。表 4 结果显示,溶液 I 放置 18 h,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻ 浓度基本不变;放置 18~24 h,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻ 浓度下降,SO₄²⁻ 浓度略微升高;放置 24 h 后,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻ 浓度大幅下降,SO₄²⁻ 浓度大幅升高,说明体系中有其他含硫化合物转化为硫酸根。溶液 II 于 4℃ 下避光放置 12 h,S²⁻ 浓度基本不变,之后随着放置时间的延长呈下降趋势,48 h 后下降了 24.0%。以上实验结果表明,S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻ 待测溶液在 4℃ 下可避光保藏 18 h;S²⁻ 待测溶液在 4℃ 下可避光保藏 12 h。

表 4 放置时间对样品测定结果的影响

离子形态	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	18 h	24 h	48 h
S ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	173.6	174.3	174.0	172.9	170.8	161.1	155.3	132.0
SO ₃ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	61.4	62.5	62.8	61.6	60.8	59.0	56.1	45.4
S ₂ O ₃ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	58576.4	57969.8	57642.1	58137.6	57726.5	57091.4	56136.8	54703.4
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	2949.5	3037.4	3125.5	3049.0	3152.4	3937.4	5073.1	6351.1

2.5 实际样品测定

吸取一定体积的含金硫铁矿浸出液,用1 g/L的NaOH溶液稀释至100倍,配制成浸出液的稀释液。吸取一定体积的稀释液,向其中加入等体积的标准溶液,测定回收率,连续测定6次,结果见表5。加标回收率为93.6%~108.1%,加标样品测定结果的相对标准偏差为0.7%~3.4%,表明该方法准确度高、稳定性好,可以用于测定含金硫铁矿溶金液中多种含硫阴离子的含量。

表5 实际样品测定结果

待测物	测得 平均值/ (mg·L ⁻¹)	加标量/ (mg· L ⁻¹)	加标 测得值/ (mg·L ⁻¹)	回收 率/%	样品 浓度/ (mg·L ⁻¹)	相对标 准偏差/ %
S ₂ O ₃ ²⁻	585.80	562.8	556.10	93.6	58576.4	3.4
SO ₃ ²⁻	0.61	0.5	0.55	98.0	61.4	1.3
SO ₄ ²⁻	29.50	17.7	24.30	108.1	2949.5	1.0
S ²⁻	1.70	1.8	1.70	96.0	173.6	0.7
总S	620.50	380.8	490.80	94.8	61760.9	1.3

3 结论

建立了一种含金硫铁矿溶金液中多种硫形态的测定方法:采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定浸出液中全硫的含量,用离子色谱仪(IC)同时测定浸出液中S₂O₃²⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻3种离子的含量,用全自动流动注射分析仪-硫化物检测仪(FIA)测定S²⁻含量;用差减法计算出多硫酸根的含量。研究表明,此方法操作简便,实验快速,灵敏度高,测定结果准确、可靠,可供多硫化物浸金溶液中多种形态硫浓度的分析测试使用。该方法的建立为后续分析含金硫铁矿在碱性环境下化学氧化浸出过程中硫的转换形态以及各形态的含量,查明金硫自配位溶金机理提供了一种可靠方法。

参考文献

[1] Chilton C H. Leach licks arsenic bugaboo in metal ore[J]. Chemical

Engineering(N.Y.), 1958, 65(1): 80-82.

- [2] Sill H A. Removal of arsenic and sulfur from mixed ores or concentrates; DE 1040798[P]. 1958-06-18.
- [3] 宋翔宇,张振,王君玉,等.含金硫化矿碱性氧化提金研究现状与展望[J].黄金科学技术,2020,28(6):41-42.
- [4] Anderson C. Alkaline sulfide gold leaching kinetics[J]. Minerals Engineering, 2016, 92: 248-256.
- [5] 兰新哲,张箭.改性石硫合剂提取贵金属的方法:CN 1128296A[P]. 1996-08-07.
- [6] 陈江安,周源.石硫合剂浸金体系的探讨[J].现代矿业,2009,25(1):41-42.
- [7] 周军,张秋利,兰新哲,等.含硫试剂对某难处理精金矿的浸出研究[J].金属矿山,2008,381(3):102-105.
- [8] 刘军玲,张亚中.离子色谱法测定白花蛇舌草注射液中亚硫酸盐与硫酸盐总量[J].安徽医药,2013,17(5):769-770.
- [9] 任华忠,封家福,伍朝君.离子色谱法测定注射用硫代硫酸钠中的亚硫酸盐和硫酸盐[J].华西药学杂志,2015,30(1):103-104.
- [10] 李轩贞,吴玢.紫硃砂炮制除毒探讨[J].中国中药杂志,1989,(10):18-19.
- [11] 龙炳清,陈希鸿,宾万达,等.多硫化物浸金研究[J].黄金,1987,(3):33-37.
- [12] 朱国才,陈家铺.碱性介质中元素硫歧化产物浸金研究[J].有色金属:冶炼部分,1996,(1):36-39.
- [13] 朱国才,方兆珩,陈家铺.多硫化物浸取含金硫化矿的研究[J].贵金属,1994,(2):26-31.
- [14] 郑秋萍.石硫合剂中多硫化钙分析[J].农药,1995,(7):22-24.
- [15] 聂彦合.连多硫酸盐对硫代硫酸盐浸金过程的影响及调控研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [16] 周军,兰新哲,张秋利.硫代硫酸盐和多硫化物混合浸金体系制备研究[J].有色金属:冶炼部分,2008,(4):26-29.
- [17] 李洪枚,柯家骏,兰新哲.多硫化物浸金溶液中总多硫根离子浓度的测定[J].黄金,1998,(9):51-53.
- [18] 白成庆.硫代硫酸盐溶金机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2008.
- [19] 赖才书.硫代硫酸盐浸金溶液中金的分析及回收[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [20] 孟奇,崔毅琦,童雄,等.从硫代硫酸盐浸金溶液中回收金的研究现状[J].矿冶,2013,22(4):51-54.
- [21] 马燕,乔晋玺,曹疆,等.硫代硫酸盐法浸金研究进展[J].铜业工程,2024,(4):71-79. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>