

جداسازی مولیبدنیت از کنسانتره سولفیدی مس با استفاده از بازداشت کننده تیوگلیکولیک اسید

محمود عبدالمهی^{۱*}، بیژن طاهری^۲، احمد خدادادی^۳، صدیقه زیدآبادی^۴، افسر اسلامی^۵

۱- استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، minmabd@modares.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، bijan.taheri@modares.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، akdarban@modares.ac.ir

۴و۵- کارشناس صنعتی، مجتمع مس سرچشمه

(دریافت ۲۳ آبان ۱۳۸۸، پذیرش ۱۲ آبان ۱۳۸۹)

چکیده

در این تحقیق جداسازی مولیبدنیت از سولفیدهای مس و آهن با استفاده از تیوگلیکولیک اسید (TGA) به عنوان بازدارنده سولفیدهای مس و آهن مطالعه شده است. طبق نتایج این تحقیق، میزان مصرف این ماده (TGA) در مقایسه با مصرف سولفید سدیم که حدود ۱۴ کیلوگرم بر تن است، بسیار کم و حدود (۳-۳/۵) کیلوگرم به ازای هر تن خوراک جامد خشک ورودی به کارخانه است و به بازداشت مؤثر مس و آهن گردیده است و بازیابی بالای مولیبدنیت را سبب می‌شود. در این تحقیق با استفاده از ماده مذکور، عیار نهایی مولیبدن بیش از ۵۶ درصد و بازیابی کلی مولیبدنیت حدود ۹۶ درصد به دست آمده است. عیار مس و آهن در کنسانتره نهایی به ترتیب حدود ۰/۲۶ درصد و ۰/۵۶ درصد است که با توجه به کمتر بودن این مقادیر از حد مجاز مطلوب می‌باشد.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون، مولیبدن، سولفیدهای مس و آهن، تیوگلیکولیک اسید، بازدارنده

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

روی سطح پیریت و کالکوپیریت شامل یک فرایند اکسیداسیون است که به حذف گزنتات جذب شده روی کانی منجر می‌شود و قابلیت فلوتاسیون آن را از بین می‌برد [۷]. شواهد نشان داده است که واکنش گر TGA روی سطح کالکوپیریت هم از طریق گروه SH- و هم از طریق گروه COOH- یا هر دو جذب می‌شود و می‌تواند جایگزین گزنتات شود و با آن جهت جذب روی سطح کانی به شدت رقابت نمایند [۷].

واکنش گر TGA و محصول حاصل از اکسیداسیون آن یعنی DTGA (دی تیوگلیکولیک اسید)، هر دو به عنوان بازدارنده‌های کالکوسیت عمل می‌کنند. مطالعات الکتروشیمیایی حاصل از واکنش بین TGA و کالکوسیت نشان داده است که سطح کالکوسیت به عنوان یک کاتالیزور در اکسیداسیون TGA به DTGA عمل می‌کند. هر دو گونه به عنوان بازدارنده‌های مؤثر عمل می‌کنند و عمل بازدارندگی TGA نسبت به DTGA تقریباً بیشتر است [۹]. اسید تیوگلیکولیک یک کمپلکس ساز قوی برای گونه‌های هیدروکسید مس در محلول و روی سطح پیریت است و باعث از بین رفتن سطوح فعال کانی‌های سولفیدی و مانع از جذب کلکتور روی این کانی‌ها می‌شود [۱۱].

در این تحقیق، جداسازی مولیبدنیت از سولفیدهای مس و آهن با استفاده از تیوگلیکولیک اسید به عنوان بازدارنده سولفیدهای مس و آهن روی نمونه‌هایی از مدار فلوتاسیون کارخانه پرعیارکنی مولیبدن مجتمع مس سرچشمه مطالعه شده است. جزئیات مدار فلوتاسیون مذکور در شکل (۱) به طور شماتیک نشان داده شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مواد شیمیایی

- تیوگلیکولیک اسید (TGA) با خلوص ۹۸ درصد و دانسیته $1/324 \text{g/cm}^3$ به عنوان بازدارنده سولفیدهای مس و آهن
- سود سوزآور برای تنظیم pH
- گازوئیل به عنوان کمک کلکتور برای افزایش خاصیت آبرانی مولیبدنیت
- اسید نیتریک غلیظ (۶۵ درصد) برای انحلال نمونه‌ها برای آنالیزهای جذب اتمی و ICP

۲-۲- نمونه‌گیری و آنالیز

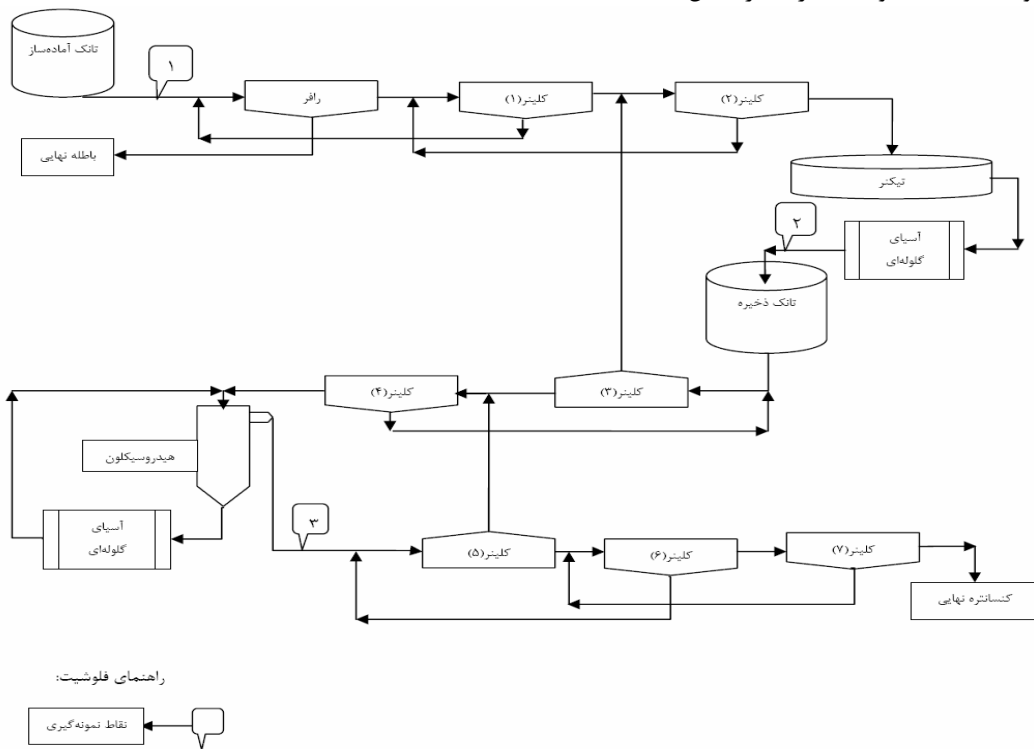
نمونه لازم برای آزمایش‌ها از خوراک (حدود ۳۰ کیلوگرم با اندازه ذرات حدوداً $43 \mu\text{m} < 86$ درصد) و خروجی مراحل

در کانسارهای پرفیری، مولیبدنیت به عنوان یک محصول جانبی در مقادیر بسیار کم موجود است و به علت خاصیت آبرانی طبیعی، در طی فرایندهای فلوتاسیون به همراه سولفیدهای مس و آهن شناور شده و در کنسانتره تجمع و ارزش اقتصادی پیدا می‌کند. در فراوری کانی‌های سولفیدی، انتخاب یک بازدارنده مؤثر یکی از فاکتورهای اصلی و تعیین کننده در فلوتاسیون کانی‌های با ارزش است [۱]. برای جداسازی مولیبدن از کانی‌های سولفیدی، اغلب از بازدارنده‌های مختلف کانی‌های سولفیدی مس و آهن استفاده می‌شود. این بازدارنده‌ها اغلب شامل سولفید سدیم، سیانید سدیم، واکنش گرهای (Nokes) فسفاتی و آرسنیک و... هستند [۲، ۳، ۴، ۵]. بازدارنده‌های آلی با زنجیر کوتاه نیز به عنوان بازدارنده‌های مؤثر سولفیدهای مس و آهن در کاربردهای اقتصادی شناخته شده‌اند. از مهم ترین این بازدارنده‌های آلی اسید تیوگلیکولیک با فرمول شیمیایی HSCH₂COOH است [۶، ۷، ۸، ۹]. این اسید آلی با نام اختصاری TGA یک اسید مونوکربوکسیلیک حاوی گروه سولفیدی (-SH) است و در دمای ۲۰ درجه در محلول‌های آبی و در غلظت وزنی کمتر از ۷۰ درصد پایدار است و همچنین در غلظت‌های بالای اکسیژن به راحتی به دیمر خود یعنی دی-تیو-گلیکولیک اسید اکسید می‌شود [۱۰]. این اسید یک بازدارنده مهم برای کانی‌های سولفیدی شناخته شده است و به طور قابل توجهی نسبت به بازدارنده‌های غیرآلی مرسوم و مورد استفاده در کارخانجات مولیبدن (از جمله سولفید سدیم، سیانید سدیم و پنتاکسید فسفر) دارای سمیت کمتری است [۹]. از طرف دیگر استفاده از بازدارنده‌های غیرآلی مستلزم مصرف زیاد این واکنش گر هاست که علاوه بر قیمت آن‌ها مضرات شدید عملیاتی دارند که باعث تولید یک کف عمیق، پایدار و غیرقابل کنترل می‌شوند؛ ولی TGA به ایجاد یک کف قابل کنترل منجر می‌شود که کمتر به وسیله نوسانات مدار که در کارخانجات فلوتاسیون معمول است، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. میزان مصرف مورد نیاز این ماده آلی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به HS⁻، CN⁻ و P₂O₅ کمتر است که این کاهش مصرف به کاهش عمده در قیمت واکنش گر به ازای هرتن خوراک حاوی سولفیدهای مس منجر می‌شود [۹]. اسید تیوگلیکولیک، کالکوپیریت را به شدت در محلول حاوی هوا بازداشت می‌کند. در این خصوص عمل بازدارندگی TGA مستقیماً با قدرت کاهندگی قوی آن ارتباط دارد. جذب TGA

خردایش اول (حدود ۱۰ کیلوگرم با اندازه ذرات تقریباً $43\mu\text{m} < 100\%$ درصد) و خردایش دوم (حدود ۱۰ کیلوگرم با اندازه ذرات $38\mu\text{m} < 100\%$ درصد) کارخانه پرعیارکنی مولیبدن مجتمع مس سرچشمه تهیه گردید. مطابق شکل ۱ نمونه اخذ شده از نقطه (۱) برای آزمایش‌های فلوتاسیون مراحل رافر و کلینرهای اول و دوم و نمونه اخذ شده از نقطه ۲ برای آزمایش‌های کلینرهای ۳ و ۴ و نمونه گرفته شده از نقطه ۳ برای آزمایش‌های کلینرهای ۵، ۶ و ۷ استفاده شدند. نمونه‌گیری از نقاط ۲ و ۳ به منظور دستیابی به نمونه خرد شده در شرایط کارخانه است که در آزمایشگاه عملاً غیر ممکن بود.

نتایج آنالیز XRD حاکی از آن است که کانی‌های عمده موجود در نمونه به ترتیب شامل کالکوپیریت (CuFeS_2)، پیریت (FeS_2)، کالکوسیت (Cu_2S) و به مقدار کمتر شامل سیلیکات‌ها

کوارتز (SiO_2)، کوولیت (CuS) و به میزان ناچیز حاوی بورنیت ($\text{Cu}_{4.98}\text{Fe}_{1.02}\text{S}_4$) و مولیبدنیت (MoS_2) و مقادیر ناچیزی کانی‌های رسی از جمله ایلیت و مونتموریونیت است. نتایج حاصل از آنالیز XRF، میزان عناصر و ترکیبات موجود در کانه را به صورت کمی مطابق جدول ۱ نشان می‌دهد. در مراحل بعدی نمونه‌گیری که پس از مراحل خردایش کارخانه صورت گرفته است فقط به آنالیز میزان عناصر مولیبدن، مس و آهن با استفاده از روش‌های جذب اتمی و ICP اکتفا شده است که مقادیر آن‌ها در بخش‌های مربوطه گزارش شده است. برای آنالیز نمونه‌ها از دستگاه XRF مدل فیلیپس PW1480 و دستگاه جذب اتمی مدل Varian 240 و دستگاه ICP مدل Varian - Vista-Pro-ICI-OES استفاده شده است.

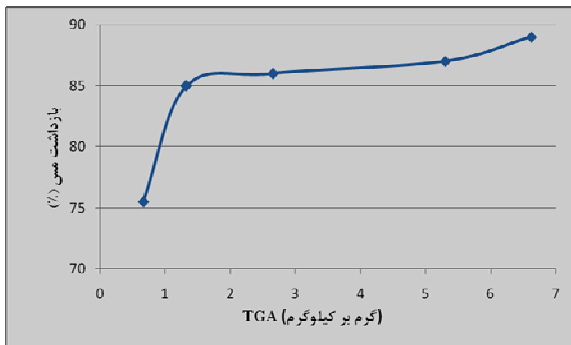


شکل ۱: نقاط نمونه‌گیری از فرایند فلوتاسیون کارخانه مولیبدن

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF جهت تعیین میزان عناصر و ترکیبات موجود در نمونه

| عنصر | (%) | عنصر | (%) | ترکیب | (%) |
|------|-----------|------|------|--------------------------------|------|
| Cu | ۲۸/۹۲ | Mn | ۰/۰۲ | MgO | ۰/۰۳ |
| Fe | ۲۵/۴۸ | Mo | ۰/۵۶ | SiO ₂ | ۷/۱۱ |
| Pb | ۰/۰۷ | Zn | ۰/۲۶ | Al ₂ O ₃ | ۲/۱۷ |
| Ni | ۴۵/۲۷ ppm | K | ۰/۴۷ | TiO ₂ | ۰/۱۵ |
| S | ۳۱/۰۱ | As | ۰/۱۱ | CaO | ۰/۱۴ |

توجه به اهمیت بسیار بازیابی در مرحله رافر حتی الامکان سعی شده است که بازیابی بیشینه حاصل گردد.



منحنی ۲: تغییرات بازداشت مس نسبت به تغییرات TGA

علت کاهش بازیابی مولیبدنیت با افزایش TGA احتمالاً به دلیل بازداشت ذرات مولیبدنیت درگیر با ذرات مس و آهن است که در این مرحله (رافر) به درجه آزادی کامل نرسیده‌اند. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده میزان بهینه مصرف TGA در مرحله رافر به طور متوسط $2/648 \text{ g/kg}$ است. از طرفی با این میزان مصرف TGA بازداشت مس نیز در این مرحله قابل قبول می‌باشد.

۲-۴- مقدار بهینه pH در مرحله رافر

برای تعیین مقدار بهینه pH، تمام پارامترها ثابت در نظر گرفته شد و میزان pH از مقدار ۸ تا ۱۱ تغییر داده شد. تغییرات بازیابی مولیبدنیت و بازداشت مس نسبت به تغییرات pH، به ترتیب در منحنی‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش pH به افزایش بازیابی مولیبدنیت منجر می‌گردد، ولی تأثیر چندانی بر بازداشت مس ندارد.

با توجه به نتایج به دست آمده، pH بهینه، بالای ۱۰ است. زیرا کمتر از آن بازیابی مولیبدنیت را کاهش می‌دهد. پس از بهینه سازی پارامترهای مؤثر، فلوتاسیون مرحله رافر با شرایط بهینه انجام شد. در این آزمایش عیار مولیبدن از مقدار حدود ۱/۱۹ درصد در خوراک به مقدار حدود ۹/۵۱ درصد در کنسانتره افزایش یافت که بازیابی مولیبدنیت در این مرحله به مرز ۹۸ درصد رسید و بازداشت مس در مرحله رافر متجاوز از ۸۴ درصد بود. مقادیر به دست آمده رضایت بخش بود.

در هر مرحله از آزمایش‌ها بسته به درصد جامد و حجم سلول میزان نمونه لازم محاسبه و استفاده شد.

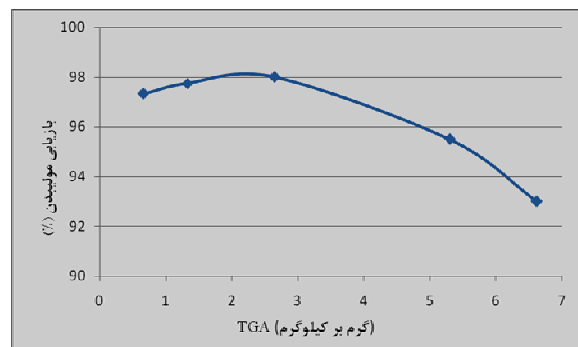
۳- آزمایش‌ها

با توجه به مطالعات و آزمایش‌های اولیه انجام شده، فاکتورهایی شامل pH، میزان مصرف TGA، درصد جامد خوراک و زمان آماده‌سازی با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش DX.7 و آزمایش‌های مختلف بررسی شد. از میان فاکتورهایی تعریف شده برای نرم‌افزار، فقط دو فاکتور pH و میزان مصرف TGA تأثیر قابل توجهی بر بازیابی مولیبدن داشتند و بازداشت مس تنها متاثر از میزان مصرف TGA بود. بقیه فاکتورها یا تأثیری نداشتند و یا بسیار ناچیز بودند. لذا آزمایش‌های گسترده‌ای برای تعیین شرایط بهینه فلوتاسیون در مراحل مختلف رافر و کلینر انجام شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- میزان مصرف بهینه TGA در مرحله رافر

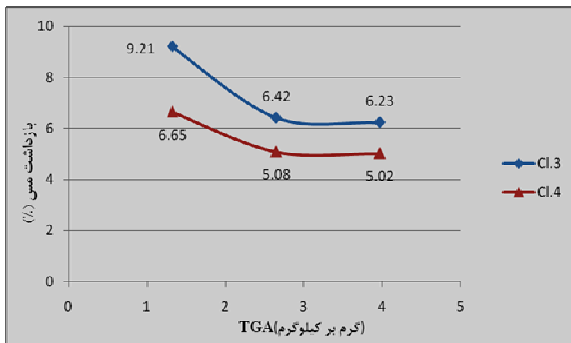
در این مرحله از آزمایش‌ها تمام پارامترها ثابت در نظر گرفته شد (درصد جامد = ۲۸ درصد، زمان آماده‌سازی = ۷ دقیقه، ۱۱- pH = ۱۰). میزان مصرف TGA از مقدار $0/662 \text{ g/kg}$ تا $6/62 \text{ g/kg}$ تغییر داده شد. سپس بازیابی مولیبدنیت و میزان بازداشت مس محاسبه گردید که منحنی ۱ تغییرات بازیابی مولیبدنیت نسبت به تغییرات TGA، و منحنی ۲ تغییرات بازداشت مس را نسبت به تغییرات TGA نشان می‌دهد.



منحنی ۱: تغییرات بازیابی مولیبدنیت نسبت به تغییرات TGA

براساس این منحنی‌ها، با افزایش میزان مصرف TGA ابتدا بازیابی مولیبدنیت افزایش و سپس کاهش می‌یابد، ولی بازداشت مس با افزایش میزان مصرف TGA افزایش می‌یابد با

نتایج حاصل از آزمایش‌های مرحله رافر، حداکثر میزان TGA مورد استفاده $3/972\text{g/kg}$ در نظر گرفته شد.

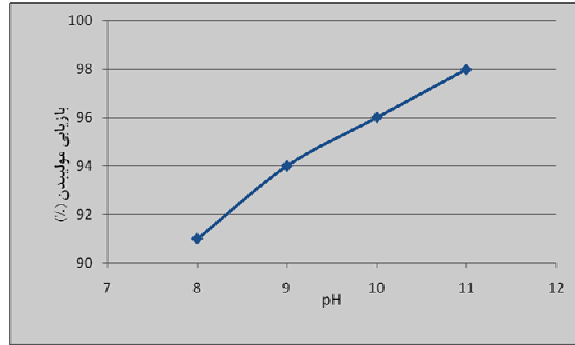


منحنی ۵: تغییرات عیار مس در کلیز اول و دوم نسبت به تغییرات میزان TGA

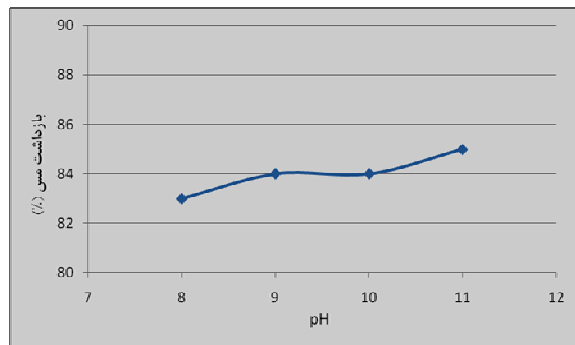
گفتنی است که در آزمایش‌های کلیز اول و دوم مقادیر درصد جامد به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شد و زمان آماده‌سازی طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های قبلی ۷ دقیقه و زمان کف‌گیری طبق مطالعات در هر مرحله ۵ دقیقه در نظر گرفته شد. مقادیر بهینه pH در این مراحل نیز مطابق مرحله رافر بین ۱۰-۱۱ در نظر گرفته شد. هرچند تغییرات pH تأثیر چندانی بر بازداشت مس ندارد، ولی چون در این مراحل هنوز ذرات مس و مولیبدن به درجه آزادی کامل نرسیده‌اند، لذا کاهش pH به افت بازیابی مولیبدنیت منجر می‌شود. بنابراین مقادیر pH در این مراحل همچنان بالا (۱۰-۱۱) در نظر گرفته شد. در صورتی که در مراحل کلیز بعدی (بعد از خردایش اول)، مقادیر بهینه pH کاهش می‌یابد که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۴-۳-۲- مراحل کلیز بعد از خردایش اول و قبل از خردایش دوم (کلیزهای ۳ و ۴)

در این مراحل از کلیز برای تهیه خوراک لازم، از مدار فلوتاسیون کارخانه بعد از آسیای گلوله‌ای مدار باز نمونه‌گیری شد و پالپ به‌دست‌آمده پس از فیلتر کردن و شستشوی کامل (برای حذف سولفید سدیم احتمالی موجود در آن)، خشک گردید و برای آزمایش‌های کلیز سوم آماده‌سازی شد. برای هر آزمایش نمونه معرف از نمونه مورد آزمایش تهیه و با استفاده از روش‌های جذب اتمی و ICP برای تعیین میزان مس و آهن و مولیبدن، مورد آنالیز قرار گرفت. آزمایش‌های کلیز سوم نیز با مقادیر مختلف TGA انجام شد و مقدار بهینه مصرف TGA مطابق منحنی ۶ حدود $2/648\text{g/kg}$ به‌دست آمد. البته با



منحنی ۳: تغییرات بازیابی مولیبدنیت نسبت به تغییرات pH

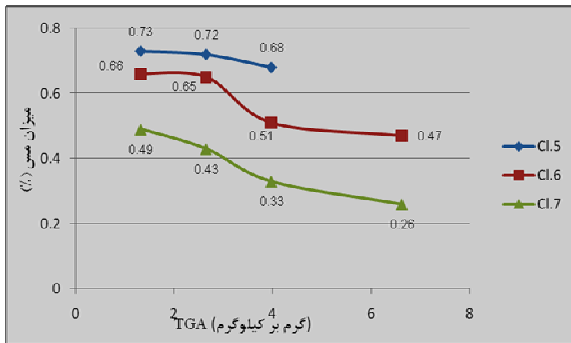


منحنی ۴: تغییرات بازداشت مس نسبت به تغییرات pH

۴-۳-۳- تعیین مقادیر بهینه میزان مصرف TGA و pH در مراحل کلیز

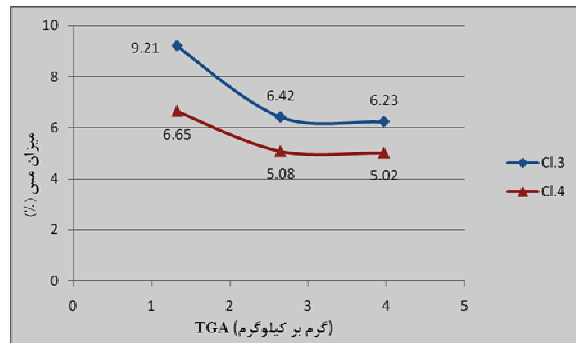
۴-۳-۱- مراحل کلیز قبل از خردایش اول (کلیزهای ۱ و ۲)
برای آزمایش‌های مرحله کلیز به مقادیر زیادی کنسانتره مرحله رافر نیاز بود که با انجام چندین آزمایش فلوتاسیون مرحله رافر با شرایط بهینه به‌دست آمده در مراحل قبل، خوراک مورد نیاز برای این سری از آزمایش‌ها تهیه گردید. سپس با مقادیر مختلف TGA آزمایش‌های کلیز اول انجام شد. میزان مصرف بهینه TGA برای کلیز اول نیز مشابه مرحله رافر تقریباً $2/648\text{g/kg}$ به‌دست آمد. سپس با این مقدار TGA تعدادی آزمایش برای تعیین خوراک لازم کلیز مرحله دوم انجام شد. آزمایش‌های کلیز دوم نیز مشابه کلیز اول انجام شد و میزان مصرف TGA برای این مرحله کلیز به ازای هر کیلوگرم خوراک جامد خشک، حدود $2/648$ گرم به‌دست آمد. نتایج این آزمایش‌ها در منحنی ۵ آمده است. از آن-جایی که در مراحل کلیز، هدف اصلی بازداشت میزان مس موجود در کنسانتره است، لذا برای تعیین مقادیر بهینه TGA، عیار مس در مقادیر مختلف TGA بررسی و مقایسه شد و برای جلوگیری از افت بازیابی مولیبدنیت در این مراحل با توجه به

آزمایش‌ها و ملاحظات اقتصادی میزان مصرف بهینه TGA برای هر کدام از کلیترهای پنجم و ششم برابر ۳/۹۷۲ گرم و برای کلیتر هفتم، ۶/۶۲ گرم به ازای هر کیلوگرم خوراک جامد خشک در این مراحل تعیین گردید. شرایط دیگر اعمالی بر آزمایش‌های این مراحل (کلیترهای ۷ و ۵) به این قرار است: درصد جامد حدود ۵ درصد، زمان آماده‌سازی طبق آزمایش‌های قبلی برابر ۷ دقیقه و زمان کف‌گیری در هر مرحله بر اساس زمان ماند در مراحل کلیتر مجدد طبق مطالعات حدود ۳ دقیقه در نظر گرفته شده است.



منحنی ۷: تغییرات عیار مس در کلیترهای پنجم، ششم و هفتم نسبت به تغییرات میزان TGA

مقادیر بیشتر، عیار مس کاهش می‌یافت، ولی چون نرخ کاهش عیار مس پایین بود و از طرفی عیار به‌دست آمده با مصرف ۲/۶۴۸g/kg TGA مطلوب بود، لذا مقدار بهینه همان ۲/۶۴۸ گرم در نظر گرفته شد. مرحله کلیتر چهارم نیز با استفاده از کنسانتره به‌دست آمده از کلیتر سوم، با مقادیر مختلف TGA انجام شد که میزان مصرف TGA به ازای هر کیلوگرم خوراک جامد خشک ورودی به این مراحل همانند مراحل قبل حدود ۲/۶۴۸ گرم به‌دست آمد که منحنی ۶ گواهی این گفته است.



منحنی ۶: تغییرات عیار مس در کلیتر سوم و چهارم نسبت به تغییرات میزان TGA

۴-۴- تعیین pH بهینه در مراحل کلیتر بعد از خردایش

همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، در مراحل کلیتر پس از خردایش، مقادیر پایین pH نیز بررسی شد تا در صورت امکان به جهت ملاحظات اقتصادی و فنی از محیط با pH خنثی در این مراحل استفاده گردد. از آنجایی‌که قدرت بازدارندگی TGA بسیار بالاست، اثر PH نقش چندانی در بازداشت سولفیدهای مس ندارد. همچنین لازم به یادآوری است که در بسیاری از موارد وقتی انواع خاصی از رس‌ها در کانه حضور دارند، خصوصیات کف‌سازی وابسته به pH است. انواع خاصی از رس‌ها در pH بالاتر، به‌طور قابل‌توجهی ویسکوزیته پالپ را افزایش می‌دهند که به نوبه خود خصوصیات کف‌سازی را کاهش و انتقال ذرات ریز را به داخل کف افزایش می‌دهند و در چنین مواردی فلوتاسیون با pH پایین مناسب‌تر است [۱].

از آنجایی‌که کانی‌های رسی از جمله ایلیت و مونتموریونیت نیز در کنسانتره موجود است و با خردایش بیشتر کنسانتره اثرات منفی آن‌ها احتمالاً بیشتر می‌شود، لذا استفاده از pH پایین‌تر قابل بررسی است. لذا برای بررسی اثر pH‌های پایین تعدادی آزمایش در مراحل کلیترهای ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ با مقادیر

گفتنی است که این آزمایش‌ها در pH بین ۱۰ تا ۱۱ صورت گرفت و برای تعیین pH بهینه نیز آزمایش‌های دیگری انجام شد که جزئیات آن‌ها در بخش‌های بعدی آورده شده است. شرایط اعمالی دیگر بر آزمایش‌های این مراحل (کلیترهای ۳ و ۴) عبارت بودند از: درصد جامد برابر ۱۰ درصد، زمان آماده‌سازی برابر ۷ دقیقه و زمان کف‌گیری برابر ۵ دقیقه.

۴-۳- مراحل کلیتر بعد از خردایش دوم (کلیترهای ۵ و ۶)

برای این سری از آزمایش‌ها مجدداً از مدار فلوتاسیون کارخانه بعد از خردایش دوم از سرریز سیکلون‌ها نمونه‌گیری شد. پس از شستشو و فیلتر کردن، نمونه‌ها خشک و برای آزمایش‌ها آماده‌سازی شد. برای هر آزمایش، نمونه معرف از نمونه مورد آزمایش تهیه شد و با استفاده از روش‌های جذب اتمی و ICP برای تعیین میزان مس و آهن و مولیبدن، آنالیز شد. با انجام دادن آزمایش‌هایی با مقادیر متفاوت TGA، میزان مصرف بهینه آن در مراحل کلیترهای پنجم، ششم و هفتم نیز مطابق منحنی ۷ به‌دست آمد. شایان ذکر است که خوراک مورد نیاز هر مرحله از کنسانتره مرحله قبل تهیه می‌شد. با توجه به نتایج

کنسانتره نهایی بسیار مطلوب و همواره کمتر از حد مجاز آن در کنسانتره مولیبدنیت است. گفتنی است که حد مجاز عیار آهن در کنسانتره مولیبدنیت کمتر از ۱/۵ درصد است که در کنسانتره نهایی حاصل از آزمایش‌های انجام شده با TGA عیار متوسط آهن به ۰/۵۶ درصد رسیده است که قابل قبول است.

۴-۶- تعیین مقدار کل مصرف TGA

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها، میزان مصرف بهینه TGA در هر مرحله به دست آمد که این مقادیر بر اساس میزان خوراک جامد خشک ورودی در هر مرحله بیان شده است. از آنجایی که در کارخانه‌های فراوری مواد معدنی، میزان مصرف مواد شیمیایی به ازای هر تن خوراک جامد خشک ورودی به کارخانه بیان می‌شود، لذا لازم است که این مقادیر به دست آمده بر حسب میزان خوراک ورودی محاسبه و گزارش گردد.

برای تعیین دقیق میزان کل مصرف این ماده شیمیایی نیاز به بازیابی‌های وزنی تجمعی مواد جامد در هر مرحله است که این مقادیر بازیابی وزنی با توجه به عیار به دست آمده مولیبدن در هر مرحله قابل محاسبه است.

جدول ۴ مقادیر مصرف TGA در هر مرحله به ازای خوراک ورودی به آن مرحله و نیز بازیابی وزنی مواد جامد در هر مرحله و در نهایت میزان مصرف TGA در هر مرحله به ازای خوراک اولیه مرحله رافر را نشان می‌دهد.

میزان مصرف TGA بر حسب خوراک ورودی، از حاصل ضرب بازیابی وزنی در هر مرحله در میزان مصرف TGA در آن مرحله به دست آمده است و مقدار کل از مجموع مقادیر به دست آمده از هر مرحله حاصل شده است. بنابراین میزان کل مصرف TGA به ازای هر کیلوگرم خوراک جامد خشک ورودی به کارخانه، برابر ۳/۳۱۷۱ گرم می‌باشد.

بهینه مصرف TGA در محدوده pHهای مختلف انجام شد. بقیه شرایط همانند شرایط آزمایش‌های قبلی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. با مقایسه داده‌های جدول ۲ به نظر می‌رسد انتخاب pH بین ۸ تا ۹ در مراحل کلینر سوم، چهارم، پنجم، ششم و هفتم مناسب‌تر است؛ زیرا در مقایسه با ۱۱-۱۰ pH، نتایج نسبتاً مشابهی به دست آمده است. از طرفی از لحاظ فنی و ملاحظات اقتصادی نیز این محدوده pH مزیت بیشتری دارد.

۴-۵- روند تغییرات عیار مس و مولیبدن در مراحل مختلف فلوتاسیون

پس از تعیین شرایط بهینه فلوتاسیون با استفاده از TGA در مراحل مختلف، یک سری آزمایش با شرایط بهینه انجام شد. جدول ۳ روند تغییرات عیار و بازیابی مولیبدنیت و عیار مس را در مراحل مختلف فلوتاسیون نشان می‌دهد.

با توجه به این داده‌ها، مشاهده می‌شود که در مراحل کلینر پس از خردایش به‌ویژه بعد از خردایش مرحله دوم تغییرات چندانی در عیار مولیبدن ایجاد نمی‌شود، لذا عملیات خردایش و فلوتاسیون بعد از این مراحل بیشتر برای کاهش عیار مس و آهن در کنسانتره مولیبدنیت و نیز حذف ناخالصی‌های دیگر است که مقادیر بازیابی مولیبدنیت نیز گواهی بر این مطلب است. بنابراین اگر در مراحل رافر و کلینرهای قبل از خردایش عملیات فلوتاسیون با موفقیت انجام شود، در مراحل بعدی افت چندانی در بازیابی مولیبدنیت نخواهد بود. البته خاصیت آبرانی طبیعی کانی مولیبدنیت نیز کمک شایانی به این امر می‌کند.

همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، بازداشت سولفیدهای آهن نیز از جمله اهداف این تحقیق بوده است و با توجه به مشاهدات، از آنجا که که بازداشت سولفیدهای آهن همواره بیشتر از بازداشت سولفیدهای مس است، فقط به آنالیز عیار آن در کنسانتره نهایی اکتفا شد و مشاهده گردید که عیار آهن در

جدول ۲: نتایج تغییرات عیار مس و مولیبدن نسبت به تغییرات pH

| pH=۱۰-۱۱ | | pH=۸-۹ | | مراحل کلینر |
|----------|-------|--------|-------|-------------|
| Cu(%) | Mo(%) | Cu(%) | Mo(%) | |
| ۵/۱۰ | ۴۵/۱۹ | ۴/۵۰ | ۴۷/۵۳ | کلینر ۳ |
| ۰/۹۷ | ۵۳/۴۱ | ۲/۱۰ | ۵۲/۶۱ | کلینر ۴ |
| ۰/۶۵ | ۵۵/۱۳ | ۰/۵۴ | ۵۵/۱۹ | کلینر ۵ |
| ۰/۴۵ | ۵۴/۹۱ | ۰/۴۶ | ۵۵/۷۰ | کلینر ۶ |
| ۰/۴۳ | ۵۵/۳۵ | ۰/۲۶ | ۵۴/۹۰ | کلینر ۷ |

جدول ۳: روند تغییرات عیار و بازیابی مولیبدنیت و عیار مس در مراحل مختلف فلوتاسیون

| خوراک | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره | کنسانتره |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| رافر | رافر | کلینر ۱ | کلینر ۲ | کلینر ۳ | کلینر ۴ | کلینر ۵ | کلینر ۶ | کلینر ۷ | کنسانتره |
| ۰/۷۲ | ۵/۴۸ | ۲۵/۴۷ | ۴۵/۰۱ | ۴۷/۵۳ | ۵۲/۶۱ | ۵۵/۱۹ | ۵۵/۷۰ | ۵۶/۳۴ | کنسانتره |
| ۲۸/۸۰ | ۲۳/۱۵ | ۱۴/۸۰ | ۵/۷۰ | ۴/۵۰ | ۲/۱۰ | ۰/۵۴ | ۰/۴۶ | ۰/۲۶ | کلینر ۷ |
| -- | ۹۶/۳۶ | ۹۵/۹۵ | ۹۵/۹۰ | ۹۵/۸۹ | ۹۵/۸۹ | ۹۵/۸۹ | ۹۵/۸۸ | ۹۵/۸۸ | کنسانتره |
| Mo | | | | | | | | | |
| Cu | | | | | | | | | |
| Mo Rec. | | | | | | | | | |

جدول ۴: مقادیر مصرف TGA در مراحل مختلف فلوتاسیون

| مراحل مختلف | مصرف TGA بر حسب خوراک ورودی هر مرحله (g/kg) | بازیابی وزنی تجمعی (%) | مصرف TGA بر حسب کل خوراک ورودی (g/kg) |
|--|---|------------------------|---------------------------------------|
| رافر | ۲/۶۴۸ | -- | ۲/۶۴۸ |
| کلینر ۱ | ۲/۶۴۸ | ۱۲/۶۶ | ۰/۳۳۵۲ |
| کلینر ۲ | ۲/۶۴۸ | ۲/۷۱ | ۰/۰۷۱۸ |
| کلینر ۳ | ۲/۶۴۸ | ۱/۵۳ | ۰/۰۴۰۵ |
| کلینر ۴ | ۲/۶۴۸ | ۱/۴۵ | ۰/۰۳۸۴ |
| کلینر ۵ | ۳/۹۷۲ | ۱/۳۱ | ۰/۰۵۲۰ |
| کلینر ۶ | ۳/۹۷۲ | ۱/۲۵ | ۰/۰۴۹۷ |
| کلینر ۷ | ۶/۶۲ | ۱/۲۴ | ۰/۰۸۲۱ |
| میزان مصرف کل TGA به ازای خوراک ورودی کارخانه (g/kg) | | | ۳/۳۱۷۱ |

۵- نتیجه گیری

- عیار آهن در کنسانتره نهایی حاصل از آزمایش‌های انجام شده با TGA، بسیار مطلوب (حدود ۰/۵۶ درصد) و همواره کمتر از حد مجاز آن (۱/۵ درصد) در کنسانتره مولیبدنیت است.
- میزان کل مصرف TGA به ازای هر تن خوراک جامد خشک ورودی به کارخانه تقریباً برابر ۳/۳۱۷ کیلوگرم است.

۶- تقدیر و تشکر

از دانشگاه تربیت مدرس و مجتمع مس سرچشمه برای حمایت و همکاری در تحقیق، کمال قدردانی و سپاسگزاری به عمل می‌آید.

منابع

- [1] Bulatovic, S and Wyslouzil, D.M; 1995; *Selection and evaluation of different depressants systems for flotation of complex sulfide ores*, Mineral Engineering, Vol. 8, pp. 63-76.
- [2] Bulatovic, M., 2007; *Handbook of flotation reagents*, Volume 1., Elsevier Science & Technology.

خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- میزان مصرف بهینه TGA برای هر کدام از مراحل رافر و کلینر ۱، ۲، ۳ و ۴ تقریباً ۲/۶۴۸ g/kg بدست آمد. میزان مصرف بهینه TGA برای مراحل کلینر ۵، ۶ و ۷ به ترتیب ۳/۹۷۲ g/kg، ۳/۹۷۲ g/kg و ۶/۶۲ g/kg تعیین شد.
- افزایش pH منجر به افزایش بازیابی مولیبدنیت می‌گردد، ولی تأثیر چندانی بر بازداشت مس ندارد.
- مقادیر pH بهینه در مراحل رافر، کلینر اول و دوم حدود (۱۰-۱۱) و در مراحل بعدی (کلینرهای ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷) بنابر ملاحظات اقتصادی و عملیاتی حدود (۸-۹) در نظر گرفته شد.
- بازیابی کلی مولیبدنیت با استفاده از TGA حدود ۹۶ درصد به دست آمده است.
- استفاده از TGA عیار مس را در کنسانتره نهایی مولیبدنیت به طور رضایت‌بخشی کاهش داده و به مقدار حدود ۰/۲۶ درصد، کمتر از مقدار مجاز (۰/۵ درصد) می‌رساند.

- [8] Agar,G.E.; 1984; *Copper sulfide depression with thioglycollate or trithiocarbonate*; CIM Bulletin, Vol. 872, pp. 43-46.
- [9] Raghavan,S and Unger,K.; 1983; *Interaction of thioglycolic acid with chalcocite*; Transaction of Institution of Mining and Metallurgy(C): Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Vol. 92, pp. 95-99.
- [10] Liu,Y; Liu,Q.; 2004b; *Flotation separation of carbonate from sulfide minerals(II): mechanisms of flotation depression of sulfide minerals by thioglycolic acid and citric acid*, Mineral Engineering; Vol. 17, pp. 865-878.
- [11] Liu, Y; Liu, Q.; 2004a; *Flotation separation of carbonate from sulfide minerals (I): flotation of single minerals and mineral mixtures*, Mineral Engineering, Vol. 17, pp. 855-863.
- [3] Poorkani,M Banisi,S.; 2005; *Industrial use of nitrogen in flotation of molybdenite at Sarcheshmeh Copper Complex.*, Mineral Engineering, Vol. 18, pp. 735-738.
- [4] Ansari,A, Pawlik,M; 2007; *Floatability of chalcopyrite and molybdenite in the presence of lignosulfonates(I): adsorption studies*, Mineral Engineering, Vol. 20, pp. 600-608.
- [5] Wills,B.A, Tim Napier-Munn.; 2006; *Mineral processing technology* (seventh edition), Elsevier Science & Technology.
- [6] Bulton,A, Fornasiero,D, and Ralston,J; 2001; *Selective depression of pyrite with polyacrylamide polymers*, International Journal of Mineral Processing, Vol. 61, pp. 13-22.
- [7] Poling,G.W; Liu,Q.; 1986; *Flotation depression of chalcopyrite with thioglycolic acid*; Transaction of Institution of Mining and Metallurgy(C): Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Vol. 96, pp.7-12.

پی نوشت

