Archive of SID

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دانشگاه بین المللی امام خمینی
IMAM KHOMEINI INTERNATIONAL UNIVERSITY
دوره دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۴۵ تا ۵۱
Vol. 2, No. 2, Summer 2017, pp. 45-51

بررسی پیش تغلیظ کانسنگ طلای موته با روش فلوتاسیون

وفادار رئیسی[۱]، محمود عبدالهی[۲*]، محمدرضا خالصی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۱۲، پذیرش ۱۳ /۱۳۹۶/۰۶)

چکیده

در حال حاضر روش فرآوری طلای موته، لیچینگ سیانیدی است که بار ورودی زیادی به این بخش وارد می‌شود که شامل باطله‌های همراه طلا است و هزینه‌های اقتصادی زیادی را منجر می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی امکان حذف باطله‌های همراه طلا و پرعیارسازی بار ورودی به مرحله لیچینگ سیانیدی، به وسیله یکی از روش‌های پرعیارسازی مانند فلوتاسیون یا ثقلی است که در این صورت، باعث کاهش بار ورودی به مرحله لیچینگ سیانیدی و اقتصادی‌تر شدن فرآیند خواهد شد. از آنجایی‌که انتخاب روش فرآوری مناسب و اقتصادی برای استحصال طلا، مستلزم شناسایی دقیق کانی‌های حاوی طلا در کانسنگ است، در این پروژه برای شناسایی کانی‌های حاوی طلا و بررسی نحوه درگیری طلا در نمونه موجود از کانسنگ طلای موته، از روش لیچینگ تشخیصی استفاده شد. نتایج دو آنالیز حرارتی، عیار طلا در نمونه موجود را ۰٫۸۵ ppm و ۰٫۸۶ ppm گزارش کرد. پس از فلوتاسیون پیریت، ۳۸ درصد از طلای موجود در کانسنگ، با عیار حدود ۸ ppm با بازیابی وزنی ۳٫۸ درصد بازیابی شد که با سیانوراسیون کنسانتره فلوتاسیون پیریت، طلا قابل دستیابی است که این خود می‌تواند یک پیش تغلیظ مناسب باشد. شرایط بهینه فلوتاسیون پیریت برای حداکثر بازیابی طلا عبارتند از: pH=۹، درصد جامد ۲۵، کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم با مقدار بهینه ۱۵۰ گرم بر تن، دانه‌بندی d_{80} برابر با ۱۵۰ میکرون، مقدار ۲۵ ppm کف ساز MIBC و مدت زمان آماده‌سازی ۱۰ دقیقه بود. با استفاده از آنالیز گوگرد، مشخص شد که حدود ۹۲٫۲ درصد از پیریت موجود در نمونه با فلوتاسیون بازیابی شده است. همچنین تصاویر EPMA نشان دادند که طلای موجود در کانسنگ طلای موته، به صورت درگیر با پیریت وجود دارد که با خردایش بیشتر، طلا قابل آزاد شدن است. اندازه ذرات طلای آزاد شده در تصاویر EPMA، ۴-۳ میکرون، تشخیص داده شد. با توجه به نتایج لیچینگ تشخیصی بر روی نمونه موجود و همچنین آزمایش‌های فلوتاسیون کوارتز، هیچ‌گونه طلای درگیر، درون کانی‌های سیلیکاته گزارش نشد و با فلوتاسیون کوارتز و حذف ۲۴٫۳۴ درصد وزنی از بار ورودی، می‌توان بار ورودی به مرحله لیچینگ سیانیدی را کاهش داد که این نیز می‌تواند یک پیش تغلیظ مناسب باشد که باید مورد بررسی بیشتر واقع شود.

کلمات کلیدی

موته، پیریت، طلا، کوارتز، فلوتاسیون.

[*] نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات **Email: minmabd@modares.ac.ir**

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

معادن طلای موته در فاصله ۱۰ کیلومتری از روستای موته، بین شهرستان‌های میمه و دلیجان در یک رشته‌کوه پست قرار گرفته است. معادن موته در مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی قرارگرفته‌اند و ماده معدنی تشکیل دهنده آن‌ها کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی طلا هستند [۱]. عموما نوع سنگ متاریولیت آلتره شده و واحد میزبان دولومیت، گرین شیست و میکا شیست است و کانسار دارای شکل رگه‌ای است. کانسارهای اصلی طلای موته در ناحیه‌ای به مساحت ۱۵۰ کیلومترمربع و در ۹ منطقه شناسایی شده‌اندکه عبارتند از: معادن چاه خاتون، سنجده، چاه باغ، تنگه زر، سه کلب، دره اشکی، چشمه گوهر، قره‌قروم و چاه علامه [۲].

برای شناسایی کانی‌های حاوی طلا و بررسی نحوه درگیری طلا در نمونه از کانسنگ طلای موته، از روش لیچینگ تشخیصی، استفاده می‌شود [۳]. روش لیچینگ تشخیصی شامل انحلال سیانیدی به منظور استخراج طلا یا نقره آزاد شده پس از چند مرحله انحلال اسیدی است [۴]. در این حالت، از محدوده وسیعی از اسیدهای معدنی برای تجزیه کانی‌های حاوی طلا و نقره استفاده می‌شود [۵].

در این تحقیق با توجه به نتایج لیچینگ تشخیصی و آنالیز EPMA، روش فلوتاسیون به عنوان یک روش پیش تغلیظ احتمالی موفق برای کانسنگ طلای موته، مورد توجه قرار گرفت [۶]. فلوتاسیون پیریت و فلوتاسیون کوارتز با پارامترهای مختلف و در سطوح متفاوت، برای این منظور انجام شد که در ادامه به طور مفصل به نتایج فلوتاسیون آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور تحقق اهداف مورد نظر و دستیابی به نتایج معتبر، روش‌ها و دستگاه‌ها و شرایط مختلفی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. برای خردایش نمونه از آسیای غلتکی استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های لیچینگ تشخیصی از سیانید سدیم (۱٫۵ گرم بر لیتر)، اسید کلریدریک ۱۸درصد حجمی، اسید نیتریک ۳۳درصد حجمی و اسید فلوریدریک ۲۰درصد حجمی استفاده شد. فلوتاسیون پیریت و کوارتز نیز به ترتیب با کلکتورهای آمیل گزنتات و دو دسیل آمین، در یک سلول مکانیکی دنور، انجام شد.

۲-۲- روش آماده سازی نمونه

تهیه نمونه معرف، یکی از حساس‌ترین مراحل در انجام دقیق آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های طلادار است که دقت زیادی را نیاز دارد. بدین منظور، برای تهیه نمونه مورد نیاز برای این تحقیق، ابتدا ۱۲۰ کیلوگرم نمونه از بار ورودی به آسیای کارخانه فرآوری مجتمع طلای موته با d_{80} برابر با ۳۳۰۰ میکرون، تهیه و پس از همگن‌سازی به دو قسمت ۶۰ کیلوگرمی تقسیم شد، سپس یکی از قسمت‌های ۶۰ کیلوگرمی را با آسیای گلوله‌ای خرد کرده تا d_{80}=۳۰۰ میکرون حاصل شود. سپس این ۶۰ کیلوگرم را به دو قسمت ۳۰ کیلوگرمی تقسیم نموده و یکی از قسمت‌های ۳۰ کیلوگرمی را با آسیای گلوله‌ای خرد نموده تا d_{80}=۱۵۰ میکرون حاصل شود و بعد این ۳۰ کیلوگرم با ریفل به قسمت‌های یک کیلوگرمی تقسیم شد. یک نمونه ۱ کیلویی معرف، به مدت ۳۰ دقیقه به وسیله پودرکن، پودر شد و برای آنالیز حرارتی[1] و آنالیزهای کانی‌شناسی، فرستاده شد. d_{80} نمونه پودر شده، ۷۵ میکرون به دست آمد.

دو نمونه ۵ گرمی برای آنالیزهای XRD و XRF، ۲ نمونه ۵۰ گرمی برای آنالیز حرارتی و۶ نمونه ۱۰ گرمی برای آنالیزهای SEM و EPMA به طور معرف تهیه شد؛ نمونه‌های تهیه شده برای آنالیز، با دستگاه پودرکن، پودر شد.

۲-۳- روش آنالیز نمونه

طلا به روش‌های جذب اتمی، آنالیز حرارتی برای هر نمونه دو بار آنالیز و میانگین آن‌ها استفاده شد. آنالیزهای کمی و کیفی نمونه نیز با روش‌های XRF و XRD و SEM و EPMA به منظور شناسایی مقادیر ترکیبات به صورت اکسیدی و فازهای کانی‌شناسی اصلی و فرعی به ویژه طلا و نیز درگیری آن‌ها با هم و تشخیص شکل و ساختار آن‌ها انجام شد. برای آنالیز گوگرد موجود در ۵ نمونه از روش لکو استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آنالیز

با توجه به آنالیز طلا با جذب اتمی عیار طلا، ppm ۰٫۹ گزارش شد. نتایج دو آنالیز حرارتی که به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی فرستاده شد، میزان طلا را ۰٫۸۵و ۰٫۸۶ ppm گزارش کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج آنالیز XRF در جدول۱ نشان داده شده است که بر اساس آن، بیش از ۶۰ درصد نمونه را کانی‌های سیلیکاته تشکیل می‌دهد. نتایج آنالیز XRD، وجود کانی‌های پیریت، کوارتز، آلبیت، مسکویت، دولومیت و کلینوکلر را در نمونه نشان می‌دهد. آنالیزهای SEM و EPMA نیز نشان داد که کانی‌های اصلی تشکیل دهنده نمونه شامل کوارتز، فلدسپات و کانی‌های کربناتی و کانی‌های فرعی شامل کانی‌های رسی، کلریت، سریسیت، گالن، آپاتیت و پیریت بود. با توجه به آنالیز SEM و EPMA، کانی‌های سیلیکاته در سنگ به صورت ملقمه‌ای در هم مشاهده شدند. کوارتز و فلدسپات عمده کانی‌های تشکیل دهنده نمونه بودند. این کانی‌ها به صورت بی‌شکل و ریزدانه در نمونه حضور داشتند. فلدسپات‌ها اغلب سدیک بوده و تحت تاثیر آلتراسیون به سریسیت (مسکویت ریزدانه) تبدیل شده‌اند.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی نمونه به روش XRF

L.O.I	۵/۷۴	MnO	۰/۰۶
Na2O	۳/۱۷	SiO2	۶۰/۲۹
MgO	۲/۳۹	Sr	۰/۰۱
Al2O3	۱۵/۳۴	SiO3	۲/۲۱
Cl	۰/۰۵	P2O5	۰/۲۰
Zr	۰/۰۲	Fe2O3	۵/۹۰
K2O	۱/۵۹	Cu	۰/۰۶
CaO	۲/۱۸	Zn	۰/۰۲
TiO2	۰/۶۶		

فراوانی کانی‌های کربناته نیز قابل توجه بود. این کانی‌ها به دو شکل دولومیت و کلسیت در نمونه وجود دارند، البته فراوانی دولومیت بیشتر است. کانی‌های کربناته اغلب بی‌شکل و در اندازه حدود ۰٫۵ میلی‌متری مشاهده شدند. کانی‌های رسی بسیار ریزدانه نیز در متن نمونه پراکنده بودند. وجود کانی‌های رسی ظاهری غبارآلود به نمونه داده است. کلریتی شدن از آلتراسیون‌های شایع در نمونه است و برخی قسمت‌ها تحت تاثیر این آلتراسیون به رنگ سبز دیده می‌شد. پیریت مهم‌ترین کانه سولفیدی تشکیل دهنده نمونه بوده که در آن، دانه‌های پیریت به صورت یوهدرال تا ساب‌هدرال است. به علت پایین بودن عیار طلا در کانسنگ طلای موته، با آنالیز SEM و EPMA هیچگونه فاز طلایی در بار ورودی اصلی، شناسایی نشد. تصاویر SEM و EPMA گرفته شده از ۶ مقطع صیقلی تهیه شده، نشان داد که تقریبا بین ۳-۵ درصد از نمونه را پیریت تشکیل داده است و بیش از ۶۰ درصد نمونه حاوی کانی‌های سیلیکاته است. در ضمن با استفاده از آنالیز گوگردی (لکو) که بر روی ۵ نمونه ۲۰ گرمی از کانسنگ طلای موته، انجام شد، مقدار پیریت موجود در نمونه همان ۵-۳ درصد، محاسبه شد. همچنین آنالیز SEM نشان داد که چند نوع پیریت متفاوت در نمونه موجود است که از نظر شکل و ساختار فیزیکی متفاوتند. با توجه به آنالیزهای XRF و XRD و با استفاده از فرمول شیمیایی کانی‌های موجود در نمونه، درصد تقریبی کانی‌های موجود در نمونه به صورت جدول۲ محاسبه شد.

جدول ۲: درصد کانی‌های موجود در نمونه

نام کانی	درصد تقریبی
آلبیت	۲۶ - ۲۴
مسکویت	۱۴ - ۱۲
دولومیت	۸ – ۶
کلینوکلر	۳۲ – ۳۰
کوارتز	۳۰ - ۲۵
پیریت	۵ – ۳

۳-۲- نتایج لیچینگ تشخیصی

آزمایش‌های لیچینگ تشخیصی در دانه‌بندی‌های ریز (d_{80}=۳۸ μ)، دانه‌بندی‌های درشت (d_{80}=۱۵۰ μ) و دانه‌بندی متوسط (d_{80}=۶۳ μ) برای شناسایی فازهای حاوی طلا انجام شد. با توجه به نتایج لیچینگ تشخیصی، مشخص شد که بیش از ۹۰ درصد طلا در نمونه موجود، به صورت طلای آزاد است. همچنین لیچینگ تشخیصی نشان داد که ۹ درصد از طلا، احتمالا با دولومیت همراهی و درگیری دارد همچنین تقریبا یک درصد از طلا نیز به صورت طلای محبوس در شبکه پیریت، گزارش شد. با توجه به نتایج لیچینگ تشخیصی بر روی نمونه موجود، هیچ‌گونه طلای درگیر، درون کانی‌های سیلیکاته گزارش نشد.

۳-۳- فلوتاسیون پیریت

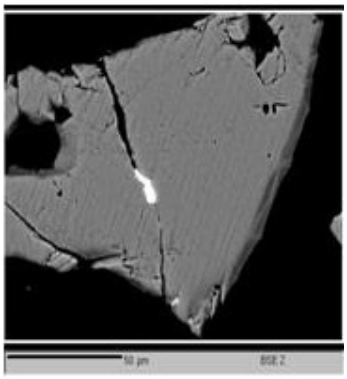
نتایج لیچینگ تشخیصی نشان داد که بیش از ۹۰ درصد طلا به صورت طلای آزاد در نمونه کانسنگ طلای موته وجود دارد که با سیانوراسیون مستقیم قابل بازیابی است، بنابراین می‌توان گفت که احتمالا طلای موجود در نمونه به صورت طلای همراه با پیریت، کوارتز یا دولومیت است که طلا به

www.SID.ir

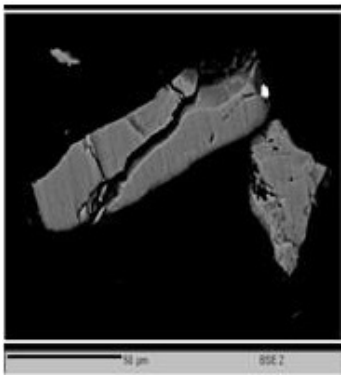
Archive of SID

جدول۳: شرایط بهینه فلوتاسیون پیریت (درصد جامد ۲۵)

نوع کلکتور	مقدار کلکتور (گرم بر تن)	مدت زمان آماده سازی (دقیقه)	pH	مقدار کف ساز (ppm)	دانه بندی (میکرون)	وزن کنسانتره (گرم)	بازیابی وزنی (درصد)	عیار طلا در کنسانتره (ppm)	بازیابی طلا در کنسانتره (درصد)
آمیل گزنتات	۱۵۰	۱۰	۹	۲۵	۱۵۰	۲۲/۵۶	۳/۸۰	۸/۰۲	۳۸/۰۱



شکل ۱: آنالیز کنسانتره پیریت با EPMA (ذره روشن، ذره طلا است که در لبه ی ذره پیریت قرار دارد.)



شکل ۲: آنالیز مقطع تهیه شده از کنسانتره پیریت با EPMA

صورت طلای آزاد با این کانی‌ها همراهی و درگیری دارد (درگیری فیزیکی که با خردایش بیشتر، قابل آزاد شدن است). بنابراین، با استفاده از فلوتاسیون، یک پیش تغلیظ مناسب برای بازیابی طلا ارایه شد. در این تحقیق، بیشترین آزمایش‌های فلوتاسیون، بر روی فلوتاسیون پیریت انجام پذیرفت [۷]. با توجه به نتایج لیچینگ تشخیصی و آنالیز EPMA ، فلوتاسیون پیریت مورد توجه بیشتری قرار گرفت. فلوتاسیون پیریت در سه سطح از دانه‌بندی‌های d_{80}=۲۱۲ µ، d_{80}=۱۵۰ µ و d_{80}=۱۰۶ µ و با دو کلکتور اتیل گزنتات و آمیل گزنتات و در سه سطح از pH های ۸، ۹ و ۱۰ با درصد جامدهای ۳۵، ۲۵ و ۱۵ انجام شد [۸]. کف‌ساز مورد استفاده برای فلوتاسیون پیریت، MIBC بود. همچنین در هر آزمایش فلوتاسیون پیریت، ۳ نمونه ۱۰ گرمی معرف، به صورت تقسیم شطرنجی از کنسانتره حاصل از فلوتاسیون پیریت برداشته شد و با تیزاب سلطانی هضم اسیدی شد و محلول حاصل، برای مشخص شدن مقدار طلای موجود در پیریت با دستگاه جذب اتمی آنالیز شد. با توجه به آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده بر روی پیریت موجود در کانسنگ طلای موته، شرایط بهینه فلوتاسیون پیریت به صورت جدول ۳ نشان داده شده است. در این شرایط بیشترین بازیابی طلا در کنسانتره پیریت حدودا ۳۸ درصد به دست آمد، بنابراین با توجه به نتایج آنالیز EPMA می‌توان عنوان کرد که درصدی از طلای موجود در کانسنگ طلای موته، در نمونه‌های بررسی شده از کنسانتره پیریتی، با پیریت همراه است. نکته قابل توجه در بازیابی طلای موجود در کانسنگ، با استفاده از فلوتاسیون پیریت این است که تنها با بازیابی وزنی ۳٫۸ درصد از کل نمونه کانسنگ، مقدار بازیابی ۳۸ درصدی برای طلای موجود در نمونه حاصل شد. یعنی در واقع پس از فلوتاسیون پیریت موجود در کانسنگ طلای موته، با سیانوراسیون ۳٫۸ درصد از کل بار ورودی موجود، می‌توان به بازیابی ۳۸ درصدی طلا دست یافت. برای پاسخ به این سوال که طلای موجود در کنسانتره پیریت به چه شکلی در پیریت وجود دارد و آیا به صورت درگیر با پیریت (درگیری فیزیکی) یا به صورت طلای موجود در شبکه پیریت، حضور دارد، ۶ نمونه ۱۵ گرمی از کنسانتره پیریت برای آنالیز EPMA و SEM فرستاده شد. آنالیز SEM نتوانست هیچ‌گونه طلایی در مقاطع تهیه شده از کنسانتره پیریتی، شناسایی کند بنابراین مقاطع صیقلی تهیه شده، برای آنالیز EPMA فرستاده شد. با توجه به نتایج آنالیز EPMA که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، مشخص شد که طلا به صورت درگیر با پیریت در کنسانتره پیریت حضور دارد و درگیری طلا با کانی پیریت از نوع فیزیکی است،

www.SID.ir

Archive of SID

یعنی ذرات طلا، با خردایش بیشتر پیریت، به راحتی قابل آزاد شدن است. همچنین اندازه ذرات طلای آزاد شده در نمونه مشاهده شده، تقریبا بین ۴-۳ میکرون گزارش شد. بنابراین هرچند که طلا به خودی خود، قابلیت فلوته شدن دارد و ممکن است که با فلوتاسیون پیریت، طلای آزادشده موجود در بار ورودی، نیز شناور شده باشد، ولی تصاویر EPMA گرفته شده از کنسانتره پیریت، درگیری فیزیکی طلا با پیریت را به خوبی نشان داد. شاید تصور شود که نتایج فلوتاسیون پیریت با نتایج لیچینگ تشخیصی در تضاد است ولی این‌چنین نیست. در واقع لیچینگ تشخیصی نشان داده بود که یک درصد از طلا به صورت محبوس در شبکه پیریت وجود دارد ولی با توجه به تصاویر EPMA، این ۳۸ درصد طلای مشاهده شده همراه کنسانتره فلوتاسیون پیریت، به شکل طلایی است که با پیریت درگیری فیزیکی دارد.

بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون پیریت و نتایج آنالیز SEM و EPMA، مشخص شد طلا با پیریت همراه است، بنابراین برای افزایش بازیابی طلا باید بازیابی پیریت در فلوتاسیون را افزایش داد و ماکزیمم مقدار پیریت موجود در نمونه را فلوته کرد. یعنی با افزایش بازیابی پیریت می‌توان مقدار طلای بیشتری را بازیابی نمود. حال این سوال مطرح است که مقدار ۳۸ درصد بازیابی طلا که در آزمایش‌های فلوتاسیون پیریت به عنوان مقدار بازیابی بهینه برای طلا، به دست آمد، از بازیابی چه مقدار پیریت حاصل شده است. یعنی با بازیابی چه مقدار از پیریت موجود در نمونه، بازیابی ۳۸ درصدی طلا حاصل شده است.

تصاویر SEM و EPMA نشان دادند تقریبا ۸۵-۸۰درصد پیریت با فلوتاسیون بازیابی شده است. برای اطمینان از اینکه چند درصد از کل پیریت موجود در بار ورودی، با فلوتاسیون فلوته شده است، از آنالیز گوگرد (آنالیز لکو)، برای مشخص شدن درصد پیریت موجود در کنسانتره فلوتاسیون، استفاده شد. به این صورت که مقدار ۲۰ گرم نمونه از بار ورودی، کنسانتره و باطله فلوتاسیون پیریت برای آنالیز لکو برای مشخص شدن درصد گوگرد در هر نمونه، استفاده شد. لازم به ذکر است که از هرکدام از نمونه‌های بار ورودی، کنسانتره و باطله، ۵ عدد نمونه برای آنالیز لکو فرستاده شد تا با اطمینان بیشتری، مقدار پیریت بازیابی شده محاسبه شود. نتایج آنالیز لکو در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این آنالیز، پس از محاسبه بازیابی پیریت مشخص شد که ۹۲٫۲ درصد پیریت موجود در بار ورودی با انجام فلوتاسیون، بازیابی شده است. بنابراین مقدار بهینه ۳۸ درصد بازیابی طلا که با آزمایش‌های فلوتاسیون به دست آمد، حاصل از بازیابی ۹۲٫۲ درصدی پیریت موجود در نمونه است.

جدول ۴: آنالیز گوگرد با روش لکو

درصد گوگرد در خوراک	درصد گوگرد در باطله	درصد گوگرد در کنسانتره
۱٫۶۶	۰٫۳۴	۲۵٫۱۲

۳-۴- فلوتاسیون کوارتز

فلوتاسیون کوارتز با حضور کلکتور دودسیل آمین در سه سطح از دانه‌بندی، درصد جامد، مقدار کلکتور و pH های مختلف انجام شد. زمان آماده‌سازی برای تمام آزمایش‌های فلوتاسیون کوارتز ۱۰ دقیقه بود [۶]. برای بهینه‌سازی پارامترهای فلوتاسیون کوارتز به منظور دستیابی به حداکثر بازیابی طلا، آزمایش‌های فلوتاسیون کوارتز به این صورت انجام شد: برای انتخاب pH بهینه برای فلوتاسیون کوارتز، فلوتاسیون در سه سطح از pHهای ۸، ۹ و ۱۰ و درصد جامد ۲۵ با دانه‌بندی d_{80}=۱۵۰ µ، انجام شد. بنابراین با توجه به آزمایش‌های فلوتاسیون کوارتز، شرایط بهینه برای فلوتاسیون کوارتز به منظور دستیابی به حداکثر بازیابی طلا، در جدول ۵ ارایه شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که ۱۶٫۵۳ درصد از طلای موجود در نمونه، با استفاده از فلوتاسیون کوارتز، قابل بازیابی است. در ضمن برای فلوتاسیون کوارتز، با توجه به وجود درصد بالایی از کوارتر در نمونه کانسنگ طلای موته، در تمام آزمایش‌های فلوتاسیون آن، دو کنسانتره به صورت کنسانتره اول و کنسانتره دوم گرفته شد که کنسانتره اول که بازیابی وزنی کوارتز در آن ۸٫۹۴ درصد بود، حاوی طلا بود ولی در کنسانتره دوم که بازیابی وزنی کوارتز در آن ۱۵٫۳۹ درصد بود، هیچ‌گونه طلایی مشاهده نشد. بازیابی وزنی حاصل از دو کنسانتره اول و دوم کوارتز ۲۴٫۳۳ درصد بود. در ادامه این سوال مطرح شد که آیا واقعا طلا با کوارتز موجود در نمونه همراهی دارد یا خیر. برای بررسی موضوع و اطمینان از نتایج حاصل، فلوتاسیون پیریت و کوارتز انجام شد. به این صورت که ابتدا بر روی بار ورودی مورد نظر، فلوتاسیون پیریت انجام شد، سپس بر روی باطله حاصل از فلوتاسیون پیریت، فلوتاسیون کوارتز انجام گرفت و مقدار بازیابی طلا در هر کدام

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۵: شرایط بهینه و نتایج فلوتاسیون کوارتز

نوع کلکتور	مقدار کلکتور (گرم بر تن)	درصد جامد	دانه بندی (میکرون)	pH	وزن کنسانتره (گرم)	بازیابی وزنی کنسانتره اول (درصد)	عیار طلا در کنسانتره (ppm)	بازیابی طلا در کنسانتره (درصد)
دودسیل آمین	۲۵۰	۲۵	۱۵۰	۸	۵۳/۱۷	۸/۹۴	۱/۴۸	۱۶/۵۳

جدول۶: فلوتاسیون کوارتز بر روی باطله حاصل از فلوتاسیون پیریت

نوع کلکتور	مقدار کلکتور (گرم بر تن)	درصد جامد	دانه بندی (میکرون)	pH	وزن کنسانتره (گرم)	بازیابی وزنی (درصد)	عیار طلا در کنسانتره (ppm)	بازیابی طلا در کنسانتره (درصد)
دودسیل آمین	۲۵۰	۲۵	۱۵۰	۸	۴۸/۳۲	۸/۴۴	۰	۰

جدول ۷: فلوتاسیون پیریت بر روی باطله حاصل از فلوتاسیون کوارتز

نوع کلکتور	مقدار کلکتور (گرم بر تن)	مدت زمان آماده سازی (دقیقه)	pH	مقدار کف ساز (ppm)	وزن کنسانتره (گرم)	بازیابی وزنی (درصد)	عیار طلا در کنسانتره (ppm)	بازیابی طلا در کنسانتره (درصد)
آمیل گزنتات	۱۵۰	۱۰	۹	۲۵	۱۷/۰۲	۲/۸۶	۶/۲۳	۲۲/۲۷

از کنسانتره‌ها به طور جداگانه محاسبه و مقایسه شد. همچنین در ادامه، بر روی بار ورودی اولیه، فلوتاسیون کوارتز انجام شد، سپس بر روی باطله حاصل از فلوتاسیون کوارتز، فلوتاسیون پیریت انجام گرفت. در ادامه به نتایج حاصل از آزمایش‌های مورد نظر به طور جداگانه پرداخته شده است.

۳-۵- فلوتاسیون پیریت ــ کوارتز

برای اینکه مشخص شود که واقعا چند درصد از طلا با پیریت و چند درصد از طلا با کوارتز همراه است، بر روی باطله حاصل از فلوتاسیون پیریت در شرایط بهینه به دست آمده، فلوتاسیون کوارتز انجام شد که نتایج آن در جدول ۶ آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد در صورتی که ابتدا پیریت موجود در نمونه فلوته شود و سپس بر روی باطله حاصله، فلوتاسیون کوارتز انجام شود، هیچ‌گونه طلایی در کنسانتره کوارتز مشاهده نمی‌شود، بنابراین می‌توان گفت که بازیابی ۱۶٫۵۳ درصد طلا در آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون کوارتز که به عنوان طلای همراه با کوارتز، گزارش شده بود، در واقع به صورت طلای درگیر با پیریت بوده که این پیریت احتمالا به صورت درگیر با کوارتز، در فلوتاسیون کوارتز، فلوته شده است یا به صورت ذرات بسیار ریز طلای آزاد با فلوتاسیون کوارتز، بازیابی شده است.

۳-۶- فلوتاسیون کوارتز - پیریت

در این بخش، بر روی باطله حاصل از فلوتاسیون کوارتز در شرایط بهینه آن که در جدول ۵ آمده است، فلوتاسیون پیریت در شرایط بهینه انجام شد که نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شد در صورتی که بر روی باطله فلوتاسیون کوارتز، فلوتاسیون پیریت انجام شود، بازیابی طلا در کنسانتره پیریت از ۳۸ درصد به ۲۲٫۲۷ درصد کاهش می‌یابد. یعنی در واقع می‌توان گفت که مقدار بازیابی ۱۶٫۵۳ درصدی طلای حاصل از فلوتاسیون کوارتز که به طلای همراه با کوارتز نسبت داده شد، به صورت طلای آزاد یا طلای درگیر با پیریت بوده که این مقدار پیریت به علت درگیر بودن با کوارتز، به کنسانتره فلوتاسیون کوارتز منتقل شده بود، به این ترتیب این آزمایش فلوتاسیون نیز نتایج قبل را به خوبی تایید کرد. بنابراین می‌توان گفت طلا با کوارتز درگیری و همراهی نداشته و با حذف کوارتز با روش فلوتاسیون، می‌توان بار ورودی به مرحله لیچینگ سیانیدی را ۲۴٫۳۳ درصد

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش داد که این خود می‌تواند به عنوان یک پیش تغلیظ مناسب بیشتر مورد بررسی واقع شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به نتایج آنالیز حرارتی مشخص شد که نمونه کانسنگ مورد مطالعه از کانسنگ طلای موته، از نوع کانسنگ کم عیار با عیار ppm ۰٫۸۵ است.

۲- بر اساس نتایج آنالیز XRD، کانی‌های پیریت، آلبیت، کلینوکلر، دولومیت و کوارتز به عنوان کانی‌های اصلی موجود در نمونه شناسایی شدند.

۳- با توجه به آنالیز SEM، EPMA و آنالیز لکو مشخص شد تقریبا ۵-۳ درصد، پیریت در نمونه کانسنگ طلای موته وجود دارد.

۴- با استفاده از لیچینگ تشخیصی، مشخص شد که بیش از ۹۰ درصد طلا در نمونه موجود، به صورت طلای آزاد است. همچنین لیچینگ تشخیصی نشان داد که ۹ درصد از طلا، احتمالا با دولومیت همراهی و درگیری دارد و تقریبا یک درصد از طلا نیز به صورت طلای محبوس در شبکه پیریت، گزارش شد. با توجه به نتایج لیچینگ تشخیصی بر روی نمونه موجود، هیچ‌گونه طلای درگیر، درون کانی‌های سیلیکاته گزارش نشد.

۵- تصاویر EPMA نشان داد که درگیری طلا با پیریت از نوع درگیری فیزیکی است که با خردایش بیشتر پیریت، ذرات طلا قابل آزاد شدن است.

۶- با استفاده از فلوتاسیون پیریت، ۳۸ درصد از طلای موجود در کانسنگ طلای موته، بازیابی شد که تصاویر EPMA نشان داد این مقدار از طلا به صورت فیزیکی با پیریت همراه است. نکته قابل‌توجه در بازیابی طلای موجود در کانسنگ، با استفاده از فلوتاسیون پیریت، این است که تنها با بازیابی وزنی ۳٫۸ درصد از کل نمونه کانسنگ طلای موجود، مقدار بازیابی ۳۸ درصدی برای طلای موجود در نمونه حاصل شد. یعنی در واقع پس از فلوتاسیون پیریت موجود در کانسنگ طلای موته، با سیانوراسیون ۳٫۸ درصد از کل بار ورودی موجود، می‌توان به بازیابی ۳۸ درصدی طلا دست یافت.

۷- با توجه به فلوتاسیون کوارتز، مشخص شد که طلای موجود در کانسنگ طلای موته هیچگونه همراهی با کانی کوارتز ندارد، بنابراین با حذف کوارتز موجود در نمونه با روش فلوتاسیون، می‌توان بار ورودی به مرحله لیچینگ سیانیدی را ۲۴٫۳۳ درصد کاهش داد.

در پایان موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- در صورت امکان از آنالیز QEMSCAN برای شناسایی فازهای حاوی طلا نیز استفاده شود.

۲- با توجه به وجود درصد بالایی از دولومیت در کانسنگ طلای موته، برای بررسی تاثیر منفی آن بر بازیابی طلا با سیانوراسیون اولیه، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری انجام شود.

۳- امکان استفاده از روش‌های ثقلی به عنوان یک پیش تغلیظ مناسب بررسی شود.

۵- مراجع

[۱] استاد رحیمی، م.؛ ۱۳۸۵؛ "**بررسی امکان استحصال طلا از سد باطله مجتمع طلای موته**". پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه یزد.

[۲] دره بیدی، م. ح.؛ ۱۳۷۲؛ "**روش های فراوری طلای موته**". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

[3] Goodall, W. R., Scales, P. J., and Ryan, C. G. (2005). *"Applications of PIXE and diagnostic leaching in the characterisation of complex gold ores". Minerals Engineering*, 18(10): 1010–1019.

[4] Celep, O., and Serbest, V. (2015). *"Characterization of an iron oxy/hydroxide (gossan type) bearing refractory gold and silver ore by diagnostic leaching". Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2(4): 1286–1297.

[5] Celep, O., Alp, İ., Deveci, H., and Vicil, M. (2009). *"Characterization of refractory behaviour of complex gold/silver ore by diagnostic leaching". Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(3): 707–713.

[6] Zhou, F., Wang, L., Xu, Z., Liu, Q., and Chi, R. (2015). *"Reactive oily bubble technology for flotation of apatite, dolomite and quartz". International Journal of Mineral Processing*, 134: 74–81.

[7] Lu, D., Hu, Y., Li, Q.,Yu, S., Giang, T., Sun, W., and Wang, Y. (2016). *"Improving the recovery of fine auriferous pyrite using iso-amylxanthate and its isomeride". Minerals Engineering*, 92: 57–62.

[8] Forrest, K., Yang, D., and Dunne, R. (2001). *"Optimisation of gold recovery by selective gold flotation for copper-gold-pyrite ores". Minerals Engineering*, 14(2): 227–241.

[۱] Fire Assay

www.SID.ir