

استخراج مس از کنسانتره سولفیدی اکتیو شده مکانیکی از طریق روشی در اسید سولفوریک

صادق محمدیان^۱، علی سعیدی^۲، رضا ابراهیمی^۳، هادی ناصری خبر^۴ و صدیقه زیدآبادی^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد نجف آباد

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد نجف آباد

۴- مدیر واحد لیچینگ، مجتمع مس میدوک شهر بابک

۵- پژوهشگر امور تحقیق و توسعه، مجتمع مس سرچشمه

phd_smo@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق، استخراج مس از کنسانتره مس اکتیو شده معدن میدوک به کمک روشی در محلول اسید سولفوریک رقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر فعال سازی مکانیکی بر فرآیند تشویه بررسی شد و نهایتاً اثر توأم فعال سازی و تشویه بر روشی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه هایی از کنسانتره سولفیدی همراه با آهک تحت اتمسفرهای هوا و اکسیژن، در زمانهای مختلف فعال سازی شد. سپس به کمک آنالیز حرارتی (TG-DSC) حداقل دما و زمان لازم برای تشویه این نمونه ها به دست آمد. نمونه های فعال سازی شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه تحت اتمسفرهای آرگون و هوا تشویه شدند. نمونه های تشویه شده تحت اتمسفر هوا و یک نمونه کنسانتره فعال سازی نشده (به عنوان شاهد) در زمانهای مختلف روشی شدند. نتایج آنالیز فازی به کمک XRD نشان داد در اثر تشویه نمونه های فعال شده تحت اتمسفر هوا، مقدار قابل توجهی از گوگرد موجود در کنسانتره به CaS و $CaSO_4$ تبدیل می شود. نتایج آنالیز جذب اتمی نشان داد نزدیک به ۷۰ درصد بازیابی مس برای نمونه های تشویه شده تحت اتمسفر هوا در ۳۰ دقیقه نخست از روشی صورت می گیرد و افزایش زمان تا ۴ ساعت تأثیر کمی بر بازیابی مس دارد. به دلیل نامحلول بودن CaS و $CaSO_4$ در اسید، گوگرد در پسمانده جامد روشی باقی ماند. این پسمانده شامل CaS ، $CaSO_4$ ، Fe_2O_3 و سیلیکاتهای نامحلول کنسانتره می باشد.

واژه های کلیدی:

کنسانتره سولفیدی مس، فعال سازی مکانیکی، تشویه، روشی.

۱- مقدمه

می گیرد [۱]. اگر چه تاکنون روش های پیرومتالورژی غالب بوده اند، اما روش های جدید هیدرومتالورژی برای تولید فلزات از اواخر قرن نوزدهم توسعه یافته اند [۲]. روش های هیدرومتالورژی

به طور کلی استخراج مس از سنگ معدن با روش های پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی و الکتروشیمیایی صورت

جدول (۱): آنالیز فازی کنسانتره سولفیدی مس میدوک.

گانگ	FeS ₂	CuS	CuFeS ₂	Cu ₂ S	مینرال
۲۰/۶	۳۳/۴	۵/۳	۸/۵	۳۲/۲	درصد وزنی

جدول (۲): آنالیز عنصری کنسانتره سولفیدی مس میدوک.

گانگ	S	Fe	Cu	عنصر
۱۰/۲۴	۳۲	۲۳/۲۵	۳۴/۵۱	درصد وزنی

در این تحقیق فروشویی کنسانتره فعال سازی نشده مس میدوک توسط اسید سولفوریک رقیق در شرایط بهینه بررسی شده و همچنین تأثیر تشویه در محیط آهک با اتمسفر هوا بر راندمان حل سازی مس و تثبیت گوگرد به شکل فازهای جامد غیر قابل حل در اسید مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مصرفی

۱- کنسانتره سولفیدی مورد مصرف از مجتمع مس میدوک شهر بابک تهیه شد که آنالیز فازی و عنصری آن به ترتیب در جدول (۱) و (۲) آورده شده است.

۲- به عنوان عامل فروشویی از اسید سولفوریک تجاری استفاده شد.

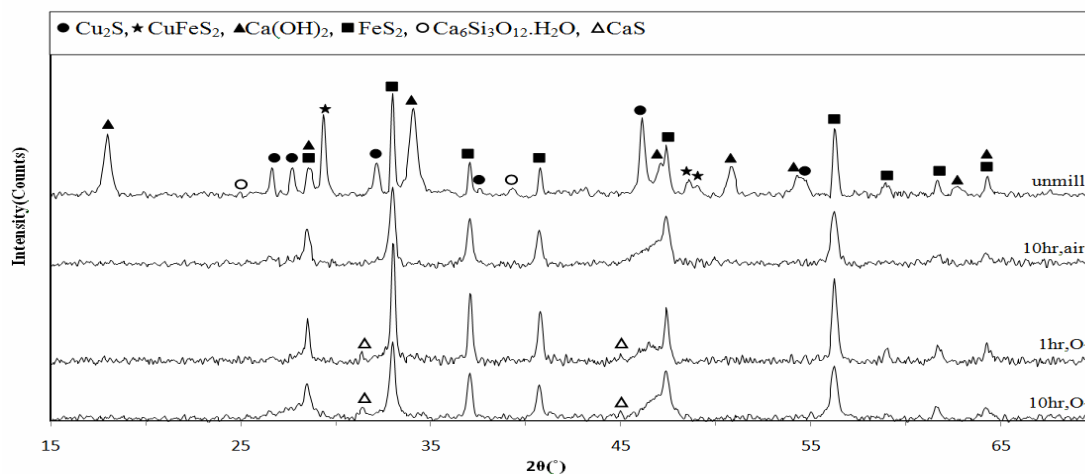
۳- از آهک صنعتی تکلیس شده با خلوص بالای ۹۸ درصد وزنی به عنوان منبع اکسید کلسیم استفاده شد.

۲-۲- تجهیزات

آنالیز حرارتی (TG-DSC) با استفاده از یک دستگاه آنالیز حرارتی NETZSH مدل STA409 صورت گرفته و شرایط آنالیز در این دستگاه با نرخ گرمایش ۱۰°K/min، حداکثر دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و اتمسفر آرگون تنظیم شد. برای انجام تشویه تحت اتمسفر آرگون و هوا به ترتیب از کوره های لوله ای و موفلی مدل Atash1500 ساخت شرکت Exition استفاده گردید. آزمایشهای فروشویی در یک بشر شیشه ای بر روی یک

در استخراج فلزات غیر آهنی جایگاه ارزشمندی دارند. به همین خاطر اخیراً روشهای ترکیبی پیرو و هیدرومتالورژیکی برای استخراج مس از مینرال های سولفیدی مورد نظر قرار گرفته به طوری که گوگرد را به صورت سولفید و سولفات کلسیم در داخل مخلوط کنسانتره و آهک در حین تشویه نگه داشته شده و در بخش هیدرومتالورژی به صورت پسمانده جامد دفع می شوند [۳ و ۴].

فرآیند تشویه کنسانتره مس در محیط آهک، به دلیل تولید فازهای جامد گوگردی، فراوانی و بهای کم آهک نسبت به دیگر ترکیبات بازی مورد توجه زیادی می باشند [۵]. تبدیل کنسانتره سولفیدی مس به ترکیبات اکسیدی مس، اخیراً مورد توجه قرار گرفته و مقالات متعددی در این زمینه به چاپ رسیده است [۶]. اخیراً فرآیند ترکیبی پیرو و هیدرومتالورژیکی در دو مرحله شامل تشویه در حضور آهک برای دستیابی به اکسید مس و مهار گوگرد و سپس انحلال محصول تشویه در اسید مورد مطالعه قرار گرفته که در این خصوص اطلاعات بسیار کمی در منابع موجود است [۷]. نتایج تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که واکنش تشویه آهک با سولفیدهای مس فازهای CuO، CuSO₄، Cu₂O، CuSO₄، CaS، CaSO₄ و ترکیبات اکسیدی آهن را نتیجه می دهد. در ادامه محصولات تشویه می توانند در اسید رقیق حل شده و مس موجود در محلول سولفات مس توسط فرآیند الکترولیز استحصال شود. به دلیل نامحلول بودن CaS و CaSO₄ در اسید، گوگرد در پسمانده جامد فروشویی باقی می ماند و این پسمانده شامل CaS، CaSO₄، Fe₂O₃ و سیلیکاتهای نامحلول کنسانتره می باشد. این پسمانده ممکن است بوسیله محلولهای سیانیدی جهت بازیابی طلا و نقره تحت فروشویی قرار گیرد [۸]. نتایج برخی تحقیقات اخیر [۹]، نشان می دهد فعال سازی مکانیکی مخلوط کنسانتره های سولفیدی مس و آهک واکنش پذیری آنها را در زمان تشویه به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می دهد که خود باعث افزایش حلالیت مس در فرآیند فروشویی می شود.



شکل (۱): الگوهای پراش پرتو ایکس مخلوط پودری کنسانتره و آهک فعال‌سازی نشده، فعال‌سازی شده در اتمسفر هوا به مدت ۱۰ ساعت و فعال‌سازی شده در اتمسفر اکسیژن به مدت ۱ و ۱۰ ساعت.

کنسانتره به آهک ۱:۱) به مدت زمان ۱۰ ساعت تحت اتمسفرهای هوا و اکسیژن در آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با سرعت ۶۰۰ rpm فعال‌سازی شد. بدین منظور از ۵ عدد گلوله به قطر ۲۵/۴ میلی‌متر و با وزن کل ۱۵۲ گرم استفاده شد. نمونه‌های فعال‌سازی شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه تحت اتمسفر هوا تشویه شدند و پس از آن توسط پراش اشعه ایکس (XRD) مورد آنالیز فازی قرار گرفتند. شرایط بهینه روشی که از بررسی اثر پارامترهای نسبت حجم اسید به وزن جامد، غلظت اسید و درجه حرارت روشی کنسانتره فعال‌سازی نشده تعیین شد، برای روشی نمونه‌های حاصل از تشویه به کار گرفته شد.

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- فعال‌سازی مکانیکی

برای مقایسه بین فازهای موجود در قبل و بعد از فرآیند فعال‌سازی مکانیکی، از مخلوط کنسانتره و آهک فعال‌سازی نشده آنالیز فازی XRD گرفته شد. این آنالیز فازی، تمامی فازهای سولفیدی مس و آهن موجود در کنسانتره را به همراه فاز $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (فاز هیدراته CaO) نشان داد (شکل ۱).

هیتر مجهز به همزن مغناطیسی انجام گرفت و برای کنترل درجه حرارت از دماسنج جیوه‌ای با دقت ± 0.5 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. برای آنالیز فازی از دستگاه اشعه ایکس Philips مدل Xpert با پرتوی $\text{CuK}\alpha$ و برای آنالیز محلول از دستگاه جذب اتمی شرکت واریان مدل 240 استفاده شده است.

۳-۲- نحوه انجام آزمایشها

مقدار معینی اسید سولفوریک توسط آب مقطر به حجم ۲۰۰ سی‌سی رسانده شد تا غلظت‌های ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی اسید سولفوریک تهیه شود. محلول تهیه شده روی هیتر قرار گرفته تا به درجه حرارت مورد نظر برسد. در سری اول آزمایشها مقدار ۵ گرم کنسانتره فعال‌سازی نشده به محلول افزوده شده و عملیات روشی با زدن کلید همزن آغاز شد. فرآیند روشی بر روی کنسانتره فعال‌سازی نشده با نسبت‌های مختلف حجم اسید به وزن جامد انجام گرفت. در زمانهای مشخص و به منظور نمونه برداری، ۵ سی‌سی از محلول جهت آنالیز شیمیایی گرفته شده و بلافاصله توسط ۵ سی‌سی آب مقطر جایگزین می‌گردد. نمونه‌ها پس از رقیق‌سازی توسط دستگاه جذب اتمی آنالیز شدند.

به منظور انجام آزمایشهای فعال‌سازی مکانیکی، مقدار ۷/۵ گرم مخلوط کنسانتره و آهک (مخلوطی با نسبت مولی گوگرد

جدول (۳): نمونه‌های تهیه شده برای فرآیند تشویه با اتمسفر آرگون.

اتم‌سفر تشویه	کد نمونه پس از تشویه	شرایط نمونه تهیه شده	
		زمان فعال‌سازی	محیط فعال‌سازی
آرگون	A1	۱۰ ساعت	هوا
	A2	۱۰ ساعت	اکسیژن

آمورف شده به طوری که پیک‌های مربوط به آن در زمینه پراش قرار گرفته‌اند. فازهای CuFeS_2 و CuS پس از هر دو محیط فعال‌سازی نیز وجود دارند، ولی به دلیل مقدار وزنی کم آنها در کنسانتره اولیه و نیز بر اثر آمورف شدن، توسط آنالیز فازی اشعه ایکس تشخیص داده نشدند.

۳-۲- تشویه

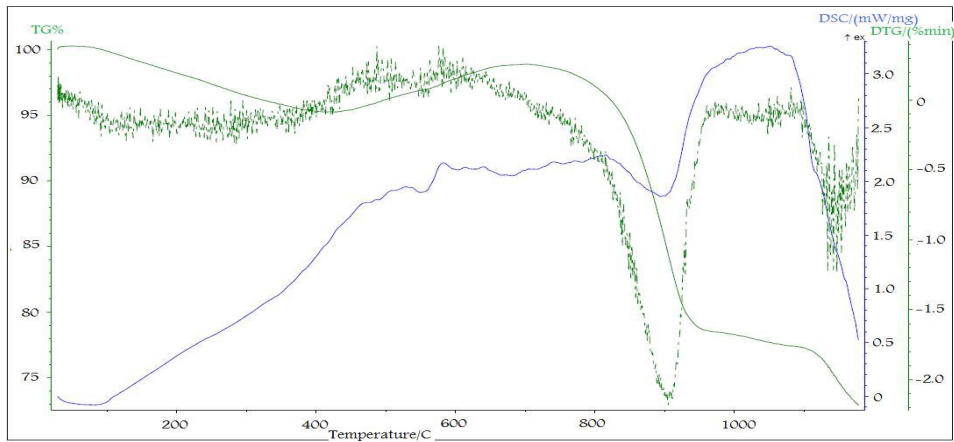
نمونه‌های فعال‌سازی شده به مدت ۱۰ ساعت در محیط هوا و اکسیژن، به دلیل توزیع یکنواخت‌تر آهک در بین ذرات کنسانتره، به عنوان نمونه‌های آماده‌سازی شده جهت فرآیند تشویه انتخاب شدند. تشویه‌ی غیر هم‌دمای این دو نمونه توسط آنالیز حرارتی (TG-DSC) مورد بررسی قرار گرفت (شکل‌های ۲ و ۳). با توجه به نمودار شکل‌های (۲) و (۳) ملاحظه می‌شود دمای شروع تشویه حدود ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، لذا برای آزمایش‌های هم‌دمای جهت بررسی سینتیک تشویه دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۲۰ دقیقه برای تشویه هر دو نمونه در نظر گرفته شد. به این ترتیب نمونه‌ها مطابق جدول (۳) تهیه شدند و مورد تشویه قرار گرفتند.

نمودار پراش اشعه ایکس دو نمونه A1 و A2 مشابه هم به دست آمد و به عنوان مثال الگوی پراش اشعه ایکس نمونه A2 در شکل (۴) آورده شده است. ملاحظه می‌شود در اثر تشویه در اتمسفر آرگون حذف گوگرد کنسانتره از طریق شکل‌گیری فاز CaS انجام می‌شود و اکسیداسیون آهن نیز از طریق واکنش با آهک انجام شده است. به علاوه ترکیبات جدیدی از مس-آهن و گوگرد تشکیل شده است.

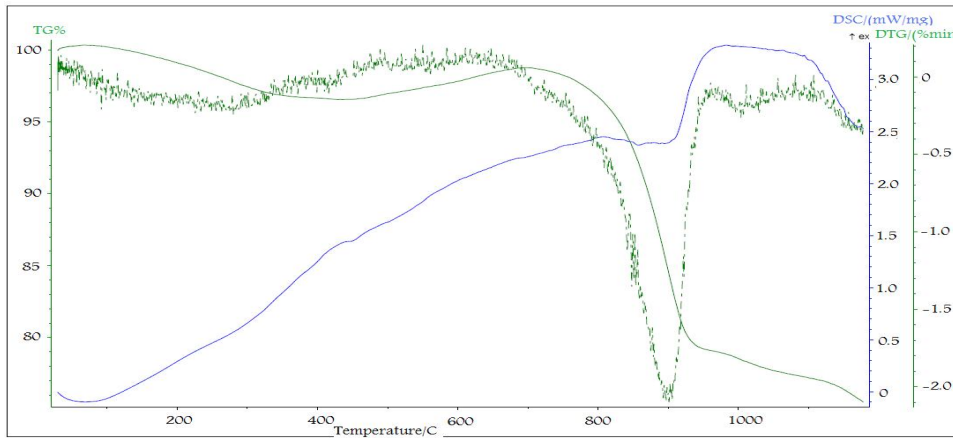
نمونه‌های مشابهی جهت فرآیند تشویه در اتمسفر هوا طبق جدول (۴) تهیه شد.

نتایج آنالیز فازی به کمک XRD نشان دادند، فعال‌سازی بر روی مخلوط کنسانتره و آهک به مدت زمان ۱۰ ساعت در محیط هوا، هیچگونه فاز جدیدی شکل نمی‌گیرد و تنها خردایش کریستالی فازها را به دنبال داشته است. همچنین ملاحظه شد که با فعال‌سازی مخلوط کنسانتره و آهک به مدت زمانهای ۱ و ۱۰ ساعت در محیط اکسیژن، علاوه بر توزیع آهک در بین ذرات کنسانتره، منجر به شکل‌گیری مقدار خیلی کمی فاز CaS می‌شود. نمودارهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های فعال شده در محیط اکسیژن نشان دادند که تنها تفاوت در این دو زمان فعال‌سازی، افزایش خردایش کریستالی فازها در ۱۰ ساعت فعال‌سازی نسبت به ۱ ساعت فعال‌سازی بوده است. افزایش بی‌نظمی در زمینه پراش و افزایش پهنای پیک‌ها در مدت زمان ۱۰ ساعت فعال‌سازی این مسئله را تأیید می‌کند. با این وجود انتظار می‌رفت به دلیل افزایش فعال‌سازی از ۱ به ۱۰ ساعت، سطح ویژه ذرات کنسانتره بیشتر افزایش یابد و به دنبال آن میزان واکنش‌پذیری سطوح ذرات با گاز اکسیژن بیشتر خواهد شد. اما از آنجایی که حرارت ناشی از فعال‌سازی جهت انجام فرآیند تشویه کافی نیست، مقدار فاز CaS شکل گرفته از هر دو نمونه تا حدودی یکسان بدست آمد.

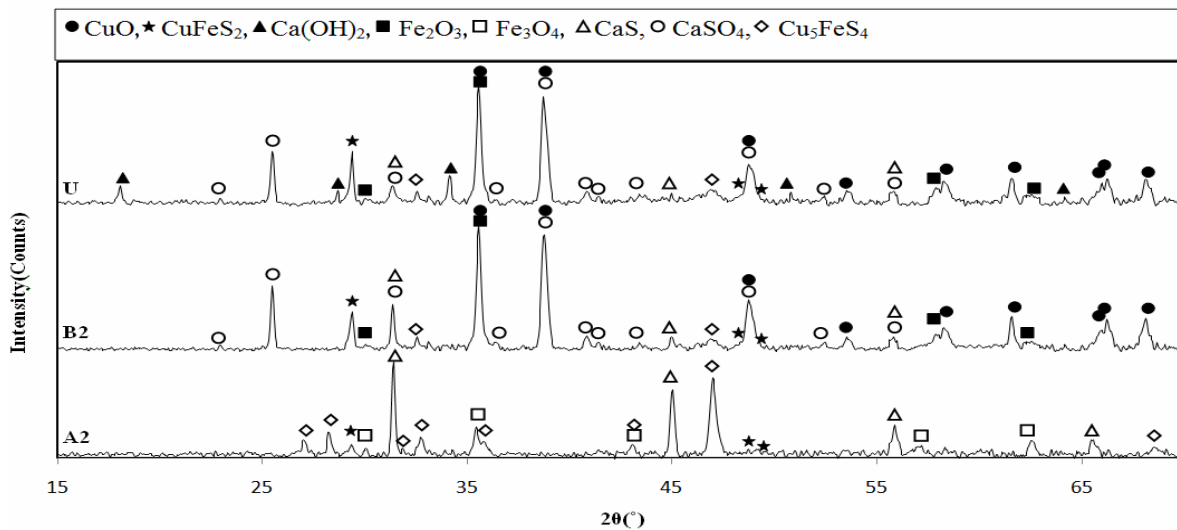
در مقایسه الگوی پراش پرتو ایکس نمونه فعال‌سازی نشده با نمونه‌های فعال‌سازی شده، ملاحظه می‌شود در اثر آسیابکاری فازهای هیدراته حذف شده‌اند. همچنین به نظر می‌رسد کالکوپیریت به سولفید مس و آهن تجزیه شده است. نمودارهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های فعال‌سازی شده در محیط هوا و اکسیژن، حذف پیک‌های مربوط به Ca(OH)_2 را نشان می‌دهند. ولی این نمودارها پیک‌های فاز جدیدی که حاوی Ca یا ترکیبی از CaO باشد را نشان ندادند. زوایای پیک‌های فاز FeS_2 در مخلوط کنسانتره و آهک فعال نشده با نمونه‌های فعال شده در محیط هوا و اکسیژن مقایسه شدند و معلوم شد که پس از فعال‌سازی، زوایای فاز FeS_2 تغییر نکرده‌اند. بنابراین پس از فعال‌سازی هیچگونه محلول جامدی شکل نگرفته و Ca(OH)_2



شکل (۲): منحنی‌های TG-DSC برای مخلوط کنسانتره و آهک فعال‌سازی شده به مدت زمان ۱۰ ساعت تحت اتمسفر هوا.



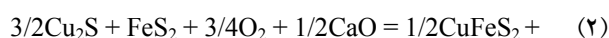
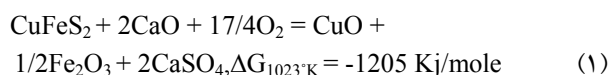
شکل (۳): منحنی‌های TG-DSC برای مخلوط کنسانتره و آهک فعال‌سازی شده به مدت زمان ۱۰ ساعت تحت اتمسفر اکسیژن.



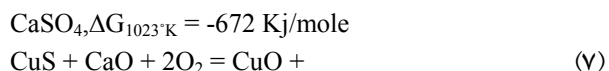
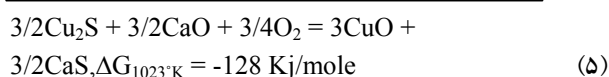
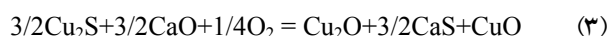
شکل (۴): الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های تشویه شده در اتمسفرهای آرگون و هوا (U) نمونه فعال‌سازی نشده و تشویه شده در هوا، B₂: نمونه فعال شده و تشویه شده در هوا و A₂: تشویه شده در هوا و تشویه شده در محیط آرگون.

تشویه شده در هوا و تشویه شده در محیط آرگون.

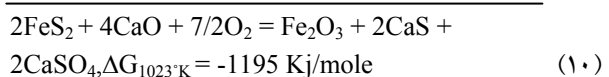
به‌طور کلی واکنش‌های تشویه با اتمسفر هوا برای سولفیدهای مس - آهن فعال‌سازی شده در محیط آهک، بصورت زیر پیش‌بینی می‌شوند:



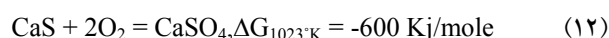
واکنش (۵) از ترکیب دو واکنش (۳) و (۴) انجام می‌شود:



فاز Fe_2O_3 علاوه بر انجام واکنش (۱)، می‌تواند از انجام واکنش (۱۰) طی دو مرحله به‌وجود آید:



به‌طور کلی شکل‌گیری فاز CaSO_4 از CaS طبق واکنش‌های (۱۱) و (۱۲) حدس زده می‌شود:



در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه B2 (شکل ۴) مشاهده شد که شدت پیک‌های فاز اکسید آهن (Fe_2O_3) نسبت به شدت پیک‌های فاز اکسید مس (CuO) به مراتب کمتر می‌باشد. در صورتی که انرژی آزاد برای تشکیل فاز اکسید آهن نسبت به اکسید مس منفی‌تر می‌باشد. به‌عنوان مقایسه واکنش‌های (۶) و (۱۰) را در نظر بگیرید. اولاً در آنالیز فازی به‌روش XRD از لامپ مسی استفاده شد در صورتی که پرتوهای مسی، ترکیبات اکسیدی آهن را به‌خوبی ترکیبات اکسیدی مس نشان نمی‌دهند.

جدول (۴): نمونه‌های تهیه شده برای فرآیند تشویه با اتمسفر هوا.

اتمسفر تشویه	کد نمونه پس از تشویه	شرایط نمونه تهیه شده	
		زمان فعال‌سازی	محیط فعال‌سازی
هوا	B1	۱۰ ساعت	هوا
	B2	۱۰ ساعت	اکسیژن

به‌عنوان مثال الگوی پراش اشعه ایکس نمونه B2 در شکل (۴) آورده شده‌است. تشویه با اتمسفر هوا نشان داد که تثبیت گوگرد از طریق شکل‌گیری فازهای CaS و CaSO_4 صورت گرفته و مقدار قابل توجهی فاز CuO از فازهای سولفیدی مس شکل می‌گیرد.

یک نمونه مخلوط کنسانتره و آهک فعال‌سازی نشده در دمای 750°C درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۲۰ دقیقه مورد تشویه قرار گرفت (نمونه U). البته مجموعه مواد کنسانتره و آهک به مدت ۵ دقیقه در هاون دستی مخلوط شده و سپس تحت تشویه با اتمسفر هوا قرار گرفتند. نمودار پراش اشعه ایکس این نمونه مقداری Ca(OH)_2 را نشان می‌دهد. در توضیح این مسئله می‌توان گفت که در استفاده از هاون دستی اختلاط مجموعه مواد کنسانتره و آهک به‌خوبی صورت نگرفته است به طوری که مقدار کمی از آهک صرف تثبیت گوگرد و مابقی آن به‌صورت آهک عمل نکرده در بین مواد حاصل از تشویه باقی می‌ماند. همچنین میزان تشکیل فازهای CaS و CaSO_4 در نمونه U نسبت به نمونه B2 کمتر می‌باشد ولی میزان تشکیل فاز CuO در نمونه U قابل توجه است. اختلاط غیریکنواخت آهک و کنسانتره در نمونه U باعث شده‌است که مقدار کمی از گوگرد توسط تشکیل فازهای CaS و CaSO_4 تثبیت شود و قسمت عمده آن توسط شکل‌گیری گاز SO_2 حذف می‌شود.

از مقایسه الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های U و B2 در شکل (۴)، ملاحظه می‌شود فعال‌سازی مکانیکی اثر قابل توجهی بر تشویه و حذف گوگرد دارد.

جدول (۵): نمونه‌های تهیه شده برای فرآیند فروشوی.

کد نمونه	مراحل تهیه نمونه	
	۱- فعال سازی مکانیکی	۲- تشویه با اتمسفر هوا
پس از فروشوی	۱۰ ساعت در اتمسفر هوا	۲۰ دقیقه در دمای ۷۵۰ °C
LB1	۱۰ ساعت در اتمسفر اکسیژن	۲۰ دقیقه در دمای ۷۵۰ °C

از شرایط بهینه بدست آمده در فروشوی نمونه شاهد، برای فروشوی نمونه‌های تشویه شده استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های تهیه شده طبق جدول (۵) تحت فروشوی قرار گرفتند. به منظور مشخص شدن نرخ انحلال مس نمونه‌های LB1 و LB2 در اسید سولفوریک، در ابتدا فروشوی با زمانهای ۲، ۴، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت انجام شد. نرخ بازیابی مس پس از گذشت ۴ ساعت از زمان فروشوی ثابت شد. به همین خاطر نمونه برداری از محلول فروشوی در فاصله زمانی ۳۰ تا ۲۴۰ دقیقه (با پیوند ۳۰ دقیقه) انجام شد.

همانطور که از شکل (۵-ب) مشاهده می شود، برای هر دو نمونه LB1 و LB2 انحلال در ۳۰ دقیقه نخست با سرعت بالایی پیشرفت می کند، به نحوی که بخش اعظم بازیابی مس برای هر دو نمونه در همین فاصله زمانی صورت می گیرد. اگر فرآیند انحلال به ۲ مرحله تقسیم شود، دلیل عمده چنین رفتاری آشکارا می شود. در ۳۰ دقیقه نخست (مرحله اول) فاز CuO شکل گرفته از فرآیند تشویه به راحتی در اسید رقیق حل شده و سرعت انحلال بالاست.

پیوندهای زمانی پس از ۳۰ دقیقه (مرحله دوم) صرف انحلال فازهای CuFeS_2 و Cu_5FeS_4 شدند، به طوری که سرعت انحلال یکدفعه نزول فاحشی از خود در این مرحله نشان داد. با این حال بعد از اتمام ۴ ساعت از زمان فروشوی، میزان بازیابی مس از فروشوی نمونه‌های LB1 و LB2 به ترتیب ۸۱ و ۸۳ درصد حاصل شد. اولاً مقایسه فروشوی نمونه‌های LB1 و LB2

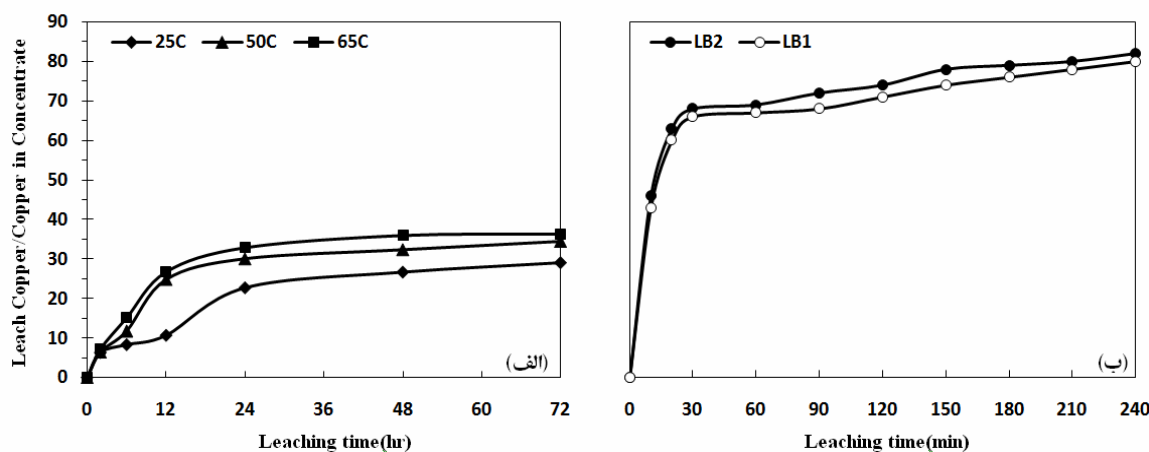
ثانیاً، مقداری از فاز FeS_2 (فاز عمده آهن در کنسانتره) طبق واکنش (۲) صرف تشکیل فازهای کالکوپیریت و بورنیت می شود. البته احتمال آن می رود که فاز Fe_2O_3 شکل گرفته آمورف بوده و مقداری از آن در زمینه الگوی پراش اشعه ایکس قرار گرفته باشد.

۳-۳- فروشوی

به منظور افزایش میزان انحلال و دستیابی به شرایط بهینه فروشوی، آزمایشهای متعدد فروشوی بر روی یک نمونه کنسانتره فعال سازی نشده انجام شد. به این ترتیب پارامترهای نسبت حجم اسید به وزن جامد، غلظت اسید و درجه حرارت فروشوی به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفتند. بهبود شرایط فروشوی از بین تمامی غلظت‌های رقیق اسید، در اسید با غلظت ۱۰۶/۶ گرم بر لیتر مشاهده شد. بنابراین برای رسیدن به دیگر شرایط بهینه فروشوی، از اسید با غلظت ۱۰۶/۶ گرم بر لیتر استفاده شد. نسبت حجم اسید به وزن جامد تأثیر چندانی بر میزان انحلال نداشت ولی با این وجود نسبت حجم اسید به وزن جامد ۴۰ به ۱ بهترین نتیجه کلی را در بر داشته است.

شکل (۵-الف) نشان داد که افزایش دما بر میزان انحلال مس اثری محسوس دارد. در این شکل تأثیر دما خصوصاً در تغییر از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتی گراد به وضوح دیده می شود. میزان افزایش انحلال مس با افزایش دما به ۶۵ درجه سانتی گراد اگر چه در مقایسه با ۵۰ درجه سانتی گراد تغییر کمی نموده است ولی منجر به حداکثر بازیابی مس در تمامی زمانهای فروشوی گردیده است.

با بررسی شرایط فروشوی نمونه شاهد معلوم شد که شرایط بهینه فروشوی در اسید با غلظت ۱۰۶/۶ گرم بر لیتر، نسبت حجم اسید به وزن جامد ۴۰ به ۱، دمای ۶۵ درجه سانتی گراد و پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان فروشوی حاصل می شود. حداکثر میزان انحلال مس از فروشوی نمونه شاهد تحت شرایط بهینه یاد شده، ۳۶ درصد بدست آمد.



شکل (۵): نمودارهای تغییرات بازیابی مس بر حسب زمان فروشویی برای نمونه‌های (الف): کنسانتره فعال‌سازی نشده و (ب): اکتیو شده مکانیکی LB2 و LB1.

۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان نتایج را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱- فعال‌سازی مکانیکی بر روی مخلوط کنسانتره و آهک در زمانهای ۱ و ۱۰ ساعت در محیط اکسیژن منجر به شکل‌گیری مقدار خیلی کمی فاز CaS می‌شود ولی با انجام فعال‌سازی در اتمسفر هوا فاز CaS تشکیل نمی‌شود.

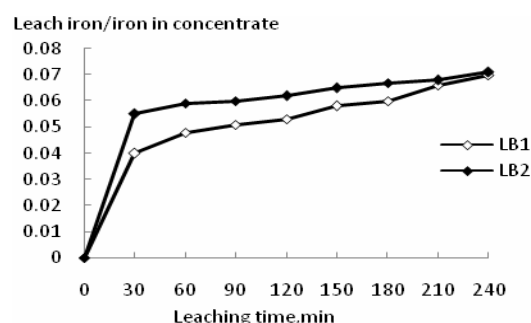
۲- فرآیند تشویه با اتمسفر آرگون، حذف گوگرد کنسانتره از طریق تشکیل فاز CaS را به‌دنبال داشت ولی به‌طور کلی محیطی مناسب برای ایجاد فازهای اکسید مس و آهن نبود.

۳- در اثر فعال‌سازی و اختلاط مناسب توسط آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای بخش اعظمی از گوگرد موجود در کنسانتره در تشویه با اتمسفر هوا به CaS و CaSO_4 تبدیل می‌شود و تنها مقدار کمی از گوگرد کنسانتره توسط شکل‌گیری گاز SO_2 حذف می‌شود.

۴- از فروشویی نمونه‌های حاصل از تشویه معلوم شد که بخش اعظم بازیابی مس در ۳۰ دقیقه نخست از فروشویی صورت می‌گیرد و افزایش زمان تا ۴ ساعت تأثیر کمی بر بازیابی مس دارد. به‌این ترتیب علاوه بر کوتاه شدن زمان فروشویی، احتمال انحلال اجزای نامطلوبی چون آهن کاهش می‌یابد.

۵- در فرآیند فروشویی نمونه‌های حاصل از تشویه به‌دلیل نامحلول بودن CaS و CaSO_4 در اسید، گوگرد در پسمانده

(ب) با فروشویی نمونه فعال‌سازی نشده (۵-الف) تأثیر قابل ملاحظه فعال‌سازی را بر فرآیند فروشویی نشان می‌دهد، ثانیاً ملاحظه می‌شود اصولاً می‌توان با جداسازی و تثبیت گوگرد به‌صورت یک فاز جامد فرآیند فروشویی را با بازده و سرعت قابل قبول انجام داد. همچنین شکل (۶) نشان داد که پس از سپری شدن ۴ ساعت از فروشویی نمونه‌های LB1 و LB2، میزان بازیابی آهن تنها در حدود ۷ درصد بوده‌است. این امر ناشی از انحلال بسیار کم فاز Fe_2O_3 در اسید رقیق می‌باشد.



شکل (۶): نمودار تغییرات بازیابی آهن بر حسب زمان فروشویی برای نمونه‌های LB1 و LB2.

- [2] A. R. Burkin, Chemical Hydrometallurgy Theory and Principle, Imperial Collage Press (ICP), London, pp. 10-15, 1979.
- [3] B. S. Terry and G. Riveros, Lime Concentrate Process for Roasting of Copper Bearing Sulfides-Part 1, Trans. Inst. Mining Metall, Vol. 103, pp. C193-C200, 1994.
- [4] R. W. Bartlett and H. H. Haung, The Lime-Concentrate Pellet Roast Processfor Treating Copper Sulfides Concentrate, J.O.M, Vol. 25, pp. 28-34, 1993.
- [5] K. Rajamani and H. Y. Sohn, Kinetics and Sulfur Fixation in the Reduction or Oxidation of Metal Sulfides Mixed with Lime, Metall Trans. B, Vol. 148, pp. 80-175, 1983.
- [6] F. Habashi, Principles of Extractive Metallurgy, Gordon and Brach, Vol. 3, pp. 53-57, 1986.
- [7] N. Sandish and H. K. Worner, Microwave Application in the Oxidation of Metal Sulfides, J. Microwave Power Electromagn. Energy, Vol. 25, pp. 177-180, 1996.
- [8] F. P. Harvey and M. M. Wong, Making Copper without Pollution, Min. Eng, Vol. 24, pp. 52-53, 1972.
- [9] G. Riveros and T. Marin, Lime Concentrate Roasting Studies-Effect of Activated Lime Stone, Miner. Eng, Vol. 17, pp. 469-471, 2004.

جامد روشویی باقی می ماند و این پسمانده شامل CaSO_4 ، CaS و سیلیکاتهای نامحلول کنسانتره می باشد.

۶- نرخ انحلال مس از محلول روشویی نمونه کنسانتره فعال سازی نشده، ۳۶ درصد حاصل شد در صورتی که نرخ انحلال مس از محلول روشویی نمونه های تشویه شده به بیش از ۸۰ درصد رسید.

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با همکاری و حمایت مالی شرکت ملی صنایع مس ایران در مجتمع مس میدوک شهر بابک انجام شده است. بدینوسیله مراتب تشکر خود را از مدیریت واحد لیچینگ میدوک و همچنین مدیریت مرکز تحقیق و توسعه مس سرچشمه اعلام می داریم.

۶- مراجع

- [۱] ح. رضوی زاده و ر. وقار، "متالورژی مس"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ سوم، ۱۳۸۲.

