

مشخصه یابی غبار کوره های ذوب مجتمع مس سرچشمه برای بهینه سازی پارامتر های عملیاتی فرآیند لیچینگ مس

ثنا اکبری فر^{۱،۲}، علی شهابی آذر^۳، زهرا منافی^۳، مهین شفیعی^{۱،۲}، محمد رنجبر همقاوندی^{۱،۲*}

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۲. پژوهشکده صنایع معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۳. شرکت ملی صنایع مس ایران، مجتمع مس سرچشمه، کرمان، ایران

چکیده

مینرالوژی و ترکیب شیمیائی شاخص های اصلی انتخاب پارامتر های عملیاتی لیچینگ مس از منابع معدنی و غبار کوره های ذوب است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی ترکیب غبار کوره های ذوب کنسانتره کالکوپیریتی برای بهبود کارائی لیچینگ مس است. در این راستا بمدت چهار ماه بصورت روزانه از غبار کوره های ذوب مجتمع مس سرچشمه نمونه برداری شد. با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس، طیفسنجی فلورسانس اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با طیفسنجی پراکنده انرژی، و میکروسکوپ نوری انعکاسی ترکیب نمونه ها تعیین گردید و تست های لیچینگ برای تعیین پارامتر اصلی عملیاتی طراحی و اجرا شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در طول دوره نمونه برداری، توزیع دانه بندی نمونه ها تغییر محسوسی ندارد، اما میزان برخی عناصر از جمله آرسنیک در محدوده بین ۰/۱۷ و ۳/۹۰ درصد در نوسان است. تغییرات مس و آهن نیز حدود ۲ درصد تعیین گردید. نتایج تست های لیچینگ غبار کوره فلش نشان داد که درصد جامد، غلظت اسید و دما مهمترین پارامتر های عملیاتی می باشند. تحت شرایط بهینه عملیاتی حدود ۶۵ درصد مس بدون استفاده از اکسید کننده طی حداکثر ۶۰ دقیقه حل می شود. با استفاده از یک فرآیند دو مرحله ای الکتروشیمیائی بستر مناسب برای استحصال بیش از ۹۵ درصدی مس از غبار کوره فلش فراهم گردید باشد.

حقوق ناشر محفوظ است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۸ آذر ۱۴۰۲

دریافت پس از اصلاح: ۲ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش نهایی: ۲۸ اسفند ۱۴۰۲

کلمات کلیدی:

متالورژی

ذوب

غبار

مینرالوژی

لیچینگ مس

* عهده دار مکاتبات

m.ranjbar@uk.ac.ir

۱- مقدمه

برای استحصال حرارتی (پیرو متالورژی) مس از کنسانتره‌های سولفیدی معمولاً فناوری‌های مختلف با استفاده از کوره‌های ریورب، فلش، کنورتور و آندی کاربرد دارند. مشکلات زیست‌محیطی کوره‌های ریورب و مصرف انرژی بالای آنها از دلایل اصلی تغییر تکنولوژی ذوب از کوره‌های ریورب به کوره‌های فلش است. مجتمع مس سرچشمه استفاده از کوره‌های فلش را در سپتامبر سال ۲۰۱۷ میلادی آغاز کرد. با این تغییر علاوه بر افزایش ظرفیت تولید، بازیابی مؤثر گاز SO_2 نیز صورت می‌گیرد [۱]. در مقایسه با تکنولوژی ریورب مزایای عمده فناوری فلش مصرف کمتر انرژی، طول عمر بیشتر، راندمان تولید بالا، سازگاری مناسب‌تر با کیفیت خوراک ورودی، هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین، و ایمنی و شرایط کاری بهتر است [۲، ۳].

طی فرآیند ذوب کنسانتره‌های کالکوپیریتمی مس در مجتمع مس سرچشمه، بخشی از مس موجود در کنسانتره به صورت غبار تولید و در سیستم‌های غبارگیر جمع‌آوری می‌شود. عیار مس این غبار قابل توجه و بیش از ۲۰ درصد ذکر شده است [۱]. برگرداندن این غبار به صورت بار در گردش، باعث کاهش ظرفیت و عملکرد نامناسب کوره، تجمع ناخالصی‌ها در آند، افزایش تعداد آندهای پسیو شده و همچنین به دلیل ریز بودن غبار، علاوه بر آسیبی که در اثر دمش کوره و برخورد با دیواره کوره به آجرهای نسور وارد می‌کند، بعلت دیرگداز بودن نیز باعث افزایش انرژی لازم برای ذوب می‌شود. علاوه بر این، در انتهای فرایند الکترولیز جهت جلوگیری از اتصال کوتاه ناشی از سقوط آند نازک شده به درون سلول، آندهای نازک شده با ۱۵ تا ۲۰٪ وزنی آند اولیه از سلول خارج و پس از شستشو و خشک شدن مجدداً جهت ذوب به کوره آند ریزی اضافه می‌شود [۱]. لذا خارج کردن این غبار از چرخه ذوب و استحصال هیدرومتالورژیکی آن میتواند به عنوان راهکاری برای کاهش مشکلات فنی و افزایش کارائی و بهروری ارزیابی شود.

سوابق تحقیقاتی مرتبط با استحصال فلزات غیر آهنی مانند مس از غبار کورهای ذوب فلزات حاکی از گستردگی این مطالعات می‌باشد در سالهای اخیر اغلب مطالعات روی استحصال هیدرومتالورژیکی فلزات متمرکز بوده است [۴-۱۵]. در مجموع نتایج این

تحقیقات نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، استحصال بیش از ۹۰ درصدی فلز هدف از غبار امکان پذیر است [۱۶-۲۰].

سوابق تحقیقاتی در ارتباط غبار کوره‌های ذوب مجتمع مس سرچشمه نشان می‌دهد که تحقیقاتی بر روی غبار کوره کنورتور و ریورب و همچنین استحصال مس آن توسط فرایند هیدرو و بیو هیدرومتالورژی انجام شده است [۲۱-۲۳]. با توجه به تغییر کوره ریورب به کوره فلش در سال ۱۳۹۶ در این مجتمع، در حال حاضر اطلاعاتی جامعی در خصوص تغییرات مینرالوژی غبار کوره‌ها به‌ویژه سیستم فلش در دسترس نمی‌باشد [۱].

با توجه به نوسانات قابل توجه در عملکرد واحد لیچینگ غبار مجتمع مس سرچشمه و اهمیت ترکیب خوراک ورودی به این واحد بر عملکرد آن هدف اصلی این پژوهش، مشخصه‌یابی و بررسی تغییرات ترکیب مینرالوژی غبار طی یک دوره حداقل چند ماهه (از بهمن ۱۴۰۱ شروع و تا اوایل تیر ماه ۱۴۰۲) و همچنین ارزیابی‌های مقدماتی برای ارزیابی نقش پارامترهای عملیاتی لیچینگ با هدف فراهم نمودن بستر مناسب برای برنامه‌ریزی تحقیقات جامع لیچینگ مس از این غبار تعیین گردید. در این راستا ابتدا مرحله مشخصه‌یابی انجام و با استفاده از نمونه شاخص تهیه شده طی دوره نمونه برداری، تست‌های مقدماتی لیچینگ با هدف تعیین محدوده مناسب پارامترهای عملیاتی اصلی شامل دمای عملیات، میزان وزنی غبار در پالپ (درصد جامد) و غلظت اسید در فرآیند لیچینگ مس می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق نمونه‌برداری روزانه به مدت بیش از چهار ماه از بهمن ۱۴۰۱ تا تیر ماه ۱۴۰۲ از محل خروج غبار کوره‌های کنورتور و فلش مجتمع مس سرچشمه انجام شد. قبل از آماده‌سازی و تقسیم، نمونه‌ها در دمای $50^{\circ}C$ خشک شدند. توزیع اندازه ذرات نمونه‌های غبار با استفاده از دستگاه لیزری (Laser diffraction particle size analyzers) مدل NanoTec22 تعیین گردید. فازهای موجود در نمونه‌ها با

مشخصه یابی غبار کوره های ذوب مجتمع مس سرچشمه برای بهینه سازی پارامتر های عملیاتی فرآیند لیچینگ مس

در مرحله دوم با استفاده از نرم افزار طراحی آزمایش به روش طراحی مرکب مرکزی (Central Composite Design (CCD)، تأثیر سه پارامتر اصلی دما، غلظت اسید و درصد جامد بر لیچینگ شیمیایی غبار بررسی و شرایط بهینه شناسایی شد. در این راستا ۲۰ آزمایش انجام شد. شرایط عملیاتی این آزمایش ها در جدول ۲ ارائه شده است. سطوح انتخاب بر مبنای حداقل و حداکثر مقادیر در تحقیقات مرجع انتخاب گردید. تست های لیچینگ در یک راکتور شیشه ای یک لیتری دوجداره با قابلیت تنظیم دما انجام شد. مدت زمان لیچینگ ثابت و برابر با ۳ ساعت بود. دور همزنی روی ۴۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید. pH پالپ اندازه گیری و در صورت نیاز با استفاده از محلول اسیدسولفوریک روی مقدار اولیه تنظیم گردید.

جدول (۲) پارامترها و سطوح در طراحی آزمایش های لیچینگ

پارامتر	دما، °C	اسید، مولار	جامد، %
سطح پائین	۲۳	۰/۱	۵
سطح بالا	۸۳	۴/۱	۳۵

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه یابی غبار

نمودار توزیع اندازه ذرات یک نمونه غبار کوره فلش (شکل ۱) و غبار کوره کنورتور (شکل ۲) ارائه شده است. توزیع دانه بندی غبار کوره های فلش و کنورتور در طول چهار ماه نمونه برداری تغییرات محسوسی ندارند. در مجموع D_{80} غبار کوره کنورتور حدود ۵ میکرون و برای کوره فلش حدود ۱۰ میکرون تعیین گردید. نتایج حاصل از آنالیز XRF نشان داد در کنار اکسید مس مهم ترین عناصر موجود در نمونه های غبار کوره ها به ترتیب، مس، آهن، روی، سرب و آرسنیک می باشند. ترکیب شیمیایی غبارها طی دوره نمونه برداری برای برخی عناصر مانند آرسنیک و نقره تغییرات محسوسی و قابل توجهی دارد. به عنوان مثال میزان آرسنیک و آهن نمونه غبار کوره فلش به ترتیب بین ۰/۱۷٪ تا ۳/۹۰٪ (آرسنیک) و ۱۴/۷۷٪ تا ۲۲/۷۰٪ (آهن) در نوسان بود. نوسان میزان مس و اکسید مس نمونه ها حداکثر دو درصد تعیین گردید.

استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) شناسایی شدند. از طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به منظور شناخت کمی عناصر موجود در نمونه های غبار استفاده شد. نمونه های انتخابی تحت آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با طیف سنجی پراکنده انرژی (EDS) و تهیه نقشه عنصری (Map) قرار گرفتند. مورفولوژی و ریزساختار نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN با استفاده از دستگاه SEM-EDS مطالعه شد. از میکروسکوپ نوری انعکاسی جهت مطالعه کانی شناسی نمونه ها استفاده شد. در شکل ۱ تصویر نمونه غبار کوره فلش (رنگ تیره) و کنورتور (رنگ) ارائه شده است.



شکل (۱) نمونه غبار کوره فلش (تیره) و کنورتور (روشن)

به منظور تعیین شرایط بهینه لیچینگ شیمیایی غبار، در مرحله اول از شرایط عملیاتی جدیدترین تحقیق مشابه و یا مرتبط با غبار کوره های مجتمع مس سرچشمه استفاده شد. در جدول ۱ پارامترهای عملیاتی این تست ها و شرایط انتخاب شده برای تست های لیچینگ این تحقیق ارائه شده است. تست ها مرحله اول بدون استفاده از نرم افزارهای طراحی آزمایش و با حداقل سه بار تکرار انجام شدند.

جدول (۱) شرایط عملیاتی لیچینگ غبار مس مرحله اول

ردیف	دما، °C	اسید، g/l	جامد، %	زمان، h	مرجع
۱	۷۵	۵۰	۳۰	۴	سرچشمه
۲	۷۵	۷۰	۱۵	۳	[۱]
۳	۶۰	۱۳۰	تا ۲۵	تا ۳	[۴]

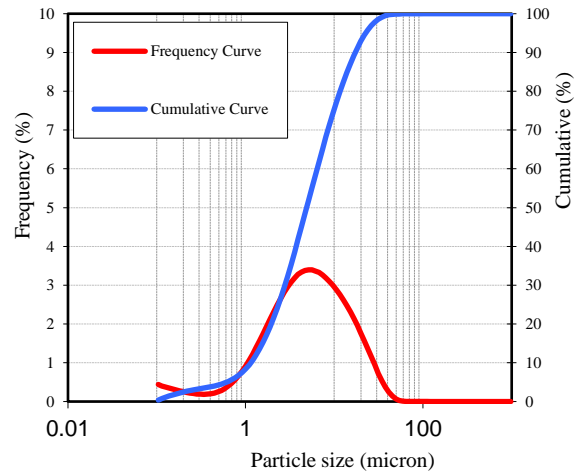
این عناصر در غبار کوره فلش است. در شکل ۴ و ۵ آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) یک نمونه غبار کوره فلش و کوره کنورتور ارائه شده است.

جدول (۳) محدوده آنالیز شیمیائی غبار کوره فلش

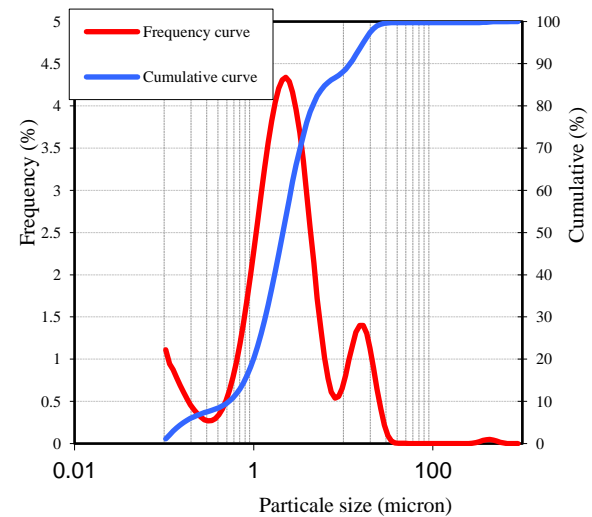
عناصر-ترکیب	حداقل	حداکثر	میانگین
Cu, %	۲۱/۲۵	۲۳/۸۰	۲۲/۳۳
Fe, %	۱۴/۷۷	۲۲/۷۰	۱۸/۰۹
Pb, %	۱/۶۱	۲/۷۲	۲/۱۷
Zn, %	۱/۸۰	۳/۱۷	۲/۵۰
As, %	۰/۱۷	۳/۹۰	۲/۰۵
Al, %	۰/۵۸	۱/۲۶	۰/۸۸
Ca, %	۰/۳۲	۰/۶۱	۰/۴۴
Cd, %	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۸
Bi, %	۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۵
Mo, %	۰/۱۰	۰/۳۲	۰/۱۹
Mg, %	۰/۱۳	۰/۲۱	۰/۱۸
Sb, %	۰/۱۰	۰/۱۹	۰/۱۴
Ni, ppm	۵۰	۹۰	۶۸
Mn, ppm	۲	۲۸۰	۱۹۷
Ag, ppm	۶	۱۲۰	۶۰
Co, ppm	۶۰	۸۰	۶۸
CuO, %	۱۲/۲۰	۱۶/۰۰	۱۳/۸۸

جدول (۴) محدوده آنالیز شیمیائی غبار کوره کنورتور

عناصر-ترکیب	حداقل	حداکثر	میانگین
Cu, %	۱۲/۸۰	۲۵/۱۰	۱۸/۶۹
Fe, %	۱/۰۸	۲/۶۱	۱/۶۷
Pb, %	۲/۳۸	۱۱/۳۰	۶/۲۶
Zn, %	۴/۶۲	۸/۲۲	۶/۳۲
As, %	۳/۶۰	۵/۲۳	۴/۲۰
Al, %	۰/۱۰	۰/۲۴	۰/۱۷
Cd, %	۰/۴۱	۰/۷۷	۰/۵۱
Ca, %	۰/۱۳	۰/۳۰	۰/۲۱
Bi, %	۰/۵۶	۱/۰۲	۰/۷۸
Mo, %	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲
Mg, %	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳
Sb, %	۰/۳۵	۰/۵۷	۰/۴۵
Ni, ppm	۹۰	۲۰۰	۱۳۰
Mn, ppm	۱۵	۲۵	۱۸
Co, ppm	۱۰	۲۵	۲۱
Ag, ppm	۶۵	۱۰۴	۸۵
CuO, %	۳/۳۰	۵/۰۰	۴/۲۱



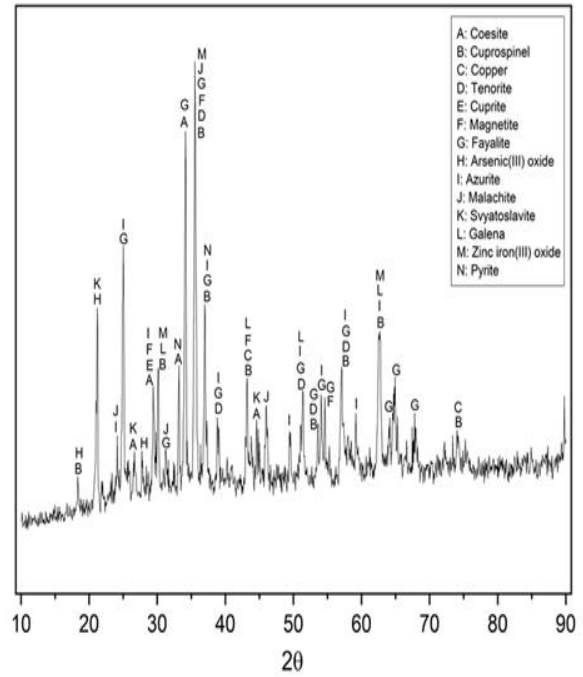
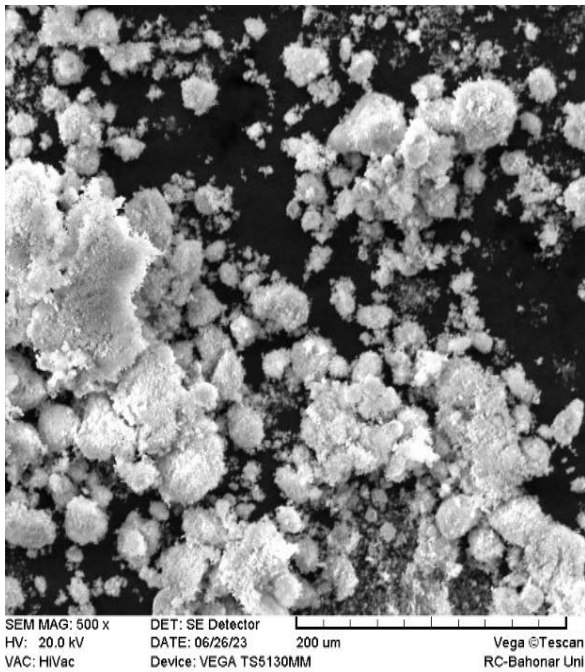
شکل (۲) توزیع دانه بندی یک نمونه غبار کوره ذوب فلش



شکل (۳) توزیع دانه بندی یک نمونه غبار کوره کنورتور

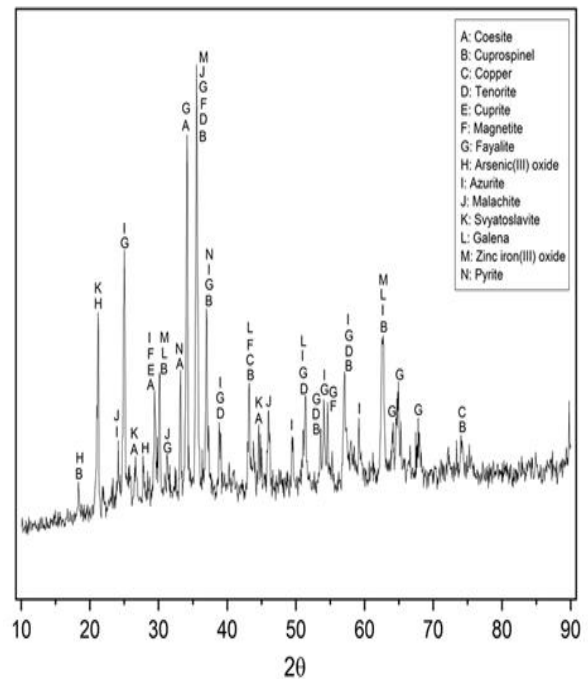
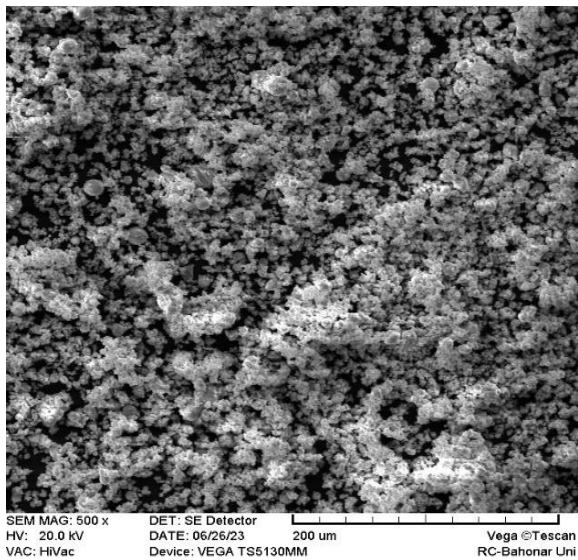
کنسانتره مورد نیاز واحد ذوب مجتمع مس سرچشمه از معادن مختلف تهیه می شود که عمدتاً ماهیت و ترکیب شیمیائی و مینرالوژی متفاوت دارند. در ادامه برنامه مشخصه یابی غبار کوره های ذوب ابتدا با استفاده از سیستم طیفسنجی فلورسانس اشعه ایکس ترکیب شیمیائی غبار ها تعیین گردید. نتایج آنالیز (XRF) غبار کوره فلش در جدول ۳ و کنورتور در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۳ و ۴ نشان می دهد که میزان عناصر Al، Ca، Cu، Fe، Mg، Mn، Mo و CuO در غبار کوره فلش بیشتر است. در نمونه های غبار کوره کنورتور مقدار عناصر Ag، As، Bi، Cd، Ni، Pb، Sb و Zn بیش از مقادیر

مشخصه یابی غبار کوره های ذوب مجتمع مس سرچشمه برای بهینه سازی پارامتر های عملیاتی فرآیند لیچینگ مس



شکل (۴) نمودار XRD مربوط به یک نمونه غبار کوره فلش

شکل (۶) تصویر SEM یک نمونه غبار کوره فلش



شکل (۷) تصویر SEM یک نمونه غبار کوره کنورتور

جدول (۵) محدوده آنالیز شیمیائی غبار کوره کنورتور

مطالعات کانی‌شناختی با استفاده از میکروسکوپ نوری انعکاسی با تهیه مقاطع صیقلی انجام شد. در تصاویر غبار کوره کنورتور عمدتاً مس خالص، کالکوسیت، بورنیت و مقداری هم مگنتیت، فایالیت و گانگ سیلیکاته مشاهده شد (شکل ۸). تصاویر میکروسکوپی نمونه های غبار کوره فلش قابل ارزیابی نبودند.

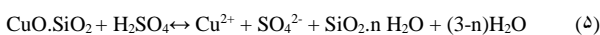
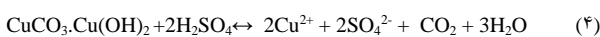
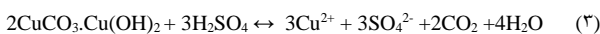
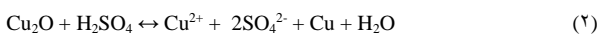
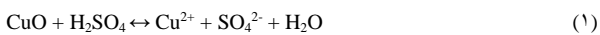
شکل ۶ و ۷ به ترتیب تصاویر SEM MAG با (مقیاس ذرات غبار کوره فلش و کنورتور را نشان می دهد. به نظر می رسد ذرات غبار کوره فلش نامنظم و نمونه غبار کوره کنورتور ریزتر و همگن تر باشند.

در مرحله اول تست‌های لیچینگ مطابق با شرایط ارائه شده در مهم‌ترین منابع مهم (جدول ۱) بدون استفاده از اکسید کننده اجرا شد.

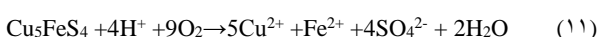
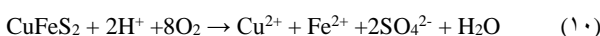
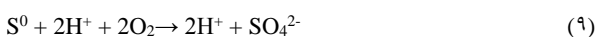
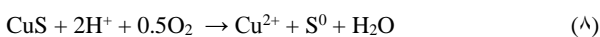
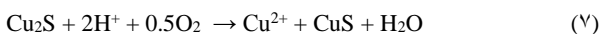
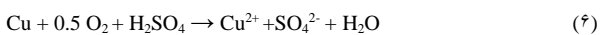
جدول (۵) مینرالوژی نمونه غبار برای تست های لیچینگ

wt. %	نام	Wt. %	نام
۴۸/۶۰	کانی های فلزی	۵/۱۲	کالکوسیت
۲۴/۳۴	کانی های غیر فلزی	۰/۲۲	کولیت
۲۷/۱۲	کانی های اکسیدی	۰/۶۱	کالکوپیریت
۲۳/۸	مس	۶/۸۳	مس - طبیعی
۲۲/۷	آهن	۱/۹۲	فالانیت
۱۶/۳	اکسید مس	۰/۰۴	برونیت
		۳۳/۸۶	مگنتیت

با توجه به ترکیب مینرالوژیکی غبار (جدول ۵) که شامل مس عنصری، و مینرال هائی که در صنعت معدنکاری تحت عنوان اکسیدی شناخته می شوند و مقادیر جزئی سولفید های اولیه و ثانویه مس است. بر مبنای دیاگرام پوربه [۲۴، ۲۵] انحلال منابع اکسیدی مس در محیط های اسیدی (محلول ۱۵ تا ۱۰٪ اسید سولفوریک) و بر اساس واکنش (۵-۱) انجام می شود.



برای انحلال مس عنصری (طبیعی) و سولفیدی به یک اکسید کننده نیاز است در این راستا عمدتاً از Fe^{3+} ; H_2O_2 ; O_2 استفاده می شود (واکنش ۱۲-۶) [۲۴، ۲۵].



تست‌های مرحله اول با استفاده از غبار کوره فلش انجام شد. آزمایش‌ها با حداقل سه بار تکرار انجام و نتایج نهائی در جدول ۶ ارائه شده است. پارامترهای عملیاتی این آزمایش‌ها



شکل (۸) تصویر میکروسکوپی یک نمونه غبار کوره کنورتور

۲-۳ ارزیابی نتایج لیچینگ اسیدی غبار کوره فلش

برای انجام آزمایش های لیچینگ از یک نمونه غبار کوره فلش استفاده شد که آنالیز شیمیائی آن در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج آنالیز مینرالوژی این نمونه (جدول ۵) نشان می دهد که در کنار مس طبیعی و اکسید مس، میزان کالکوسیت قابل توجه است. میزان کولیت ناچیز اما کالکوپیریت حدود ۰/۶٪ و فالانیت حدود ۰/۲٪ است. میزان مگنتیت با حدود ۰/۳۴٪ نمونه قابل توجه است. ارزیابی سوابق تحقیقاتی مرتبط با لیچینگ مس غبار کوره‌های ذوب مس نشان داد که مهم‌ترین پارامترها عملیاتی لیچینگ مخزنی این غبارها شامل درصد جامد، دور همزن، دما عملیات، میزان غلظت اسید یا pH و میزان و نوع اکسیدکننده می‌باشد.

مشخصه یابی غبار کوره های ذوب مجتمع مس سرچشمه برای بهینه سازی پارامتر های عملیاتی فرآیند لیچینگ مس

در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج در محدوده نتایج اعلام شده در مراجع مربوطه می باشد. اختلاف عموماً کمتر از ۵ درصد نتایج می تواند بدلیل تفاوت در ماهیت غبار و ترکیب مینرالوژی آن باشد که متناسب با ترکیب خوراک کوره ها و همچنین شرایط عملیاتی آنها می تواند نوسان داشته باشد.

در ادامه تست های مقدماتی برای بررسی ، تأثیر اکسیدکننده ها بر لیچینگ پس ماند مرحله اول با استفاده از یک اکسیدکننده مایع (H_2O_2) تحت شرایط مشابه تست های مرحله اول (۲۰ درصد جامد، دما $65^{\circ}C$ ، $pH=0.5$ و سرعت دور همزن 400 RPM) با سه بار تکرار انجام گردید. نتایج این مرحله نشان داد که حدود ۹۵ درصد مس باقیمانده از مرحله اول قابل بازیابی طی این فرآیند الکتروشیمیایی می باشد.

جدول (۶) نتایج تست های لیچینگ غبار (مرحله اول)

ردیف	تحقیق مرجع	بازیابی تحقیق	بازیابی این تحقیق (%)
۱	لیچینگ سرچشمه	۶۶/۷	۶۹/۳
۲	مکملی [۱]	۶۲/۴	۵۹/۶
۳	ریوس [۴]	۶۵/۷	۶۲/۳

جدول (۷) طراحی نرم افزاری تست های لیچینگ و نتایج

در ادامه تست های سینتیکی لیچینگ مخزنی با شرایط این تحقیق ، که بر مبنای میانگین شرایط عملیاتی تحقیقات مرجع انتخاب گردید (۲۰ درصد جامد، دما $65^{\circ}C$ ، $pH=0.5$ و دور همزن 400 RPM) با سه بار تکرار انجام شد. نمونه برداری از محلول باردار در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه به مدت ۴ ساعت انجام و غلظت مس نمونه ها تعیین گردید. نتایج این تست ها نشان داد که زمان مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر استحصال مس در لیچینگ اسیدی کمتر از یک ساعت می باشد. در مجموع نتایج تست های لیچینگ مرحله اول تحقیق نشان داد که میانگین انحلال مس در لیچینگ اسیدی غبار تحت شرایط ذکر شده و بدون استفاده از اکسید کننده حدود ۶۵ درصد می باشد. لذا در مرحله نهائی تحقیق و با استفاده از تجربیات کسب شده در مراحل قبلی تست های لیچینگ با استفاده از نرم افزار طراحی با گسترش محدوده عملیاتی پارامتر های اصلی طراحی (جدول ۲ و ۷) و اجرا گردید. نتایج نهائی و شرایط عملیاتی این تست ها در جدول ۸ ارائه شده است. این نتایج نشان می دهد که ظاهراً درصد جامد، دما و غلظت اسید سولفوریک تاثیر مستقیم روی میزان بازیابی مس دارند. بیشترین بازیابی مس با حدود ۹۰ درصد در دمای $50^{\circ}C$ ، غلظت دو مولار اسید سولفوریک و پالپ با ۲۰ درصد جامد حاصل می شود. افزایش درصد جامد به ۳۵ درصد در دمای و غلظت اسید ثابت کاهش محسوس میزان استحصال مس از حدود ۹۰ درصد به ۷۷ درصد همراه دارد. با افزایش دما به

جدول (۷) طراحی نرم افزاری تست های لیچینگ و نتایج

شماره	Std	غلظت اسید، مولار	دما، $^{\circ}C$	جامد، %	بازیابی مس، %
۱	۱۸	۱/۲	۵۳	۲۰	۶۴/۹
۲	۱۵	۱/۲	۵۳	۲۰	۷۵/۶
۳	۱۹	۱/۲	۵۳	۲۰	۷۲/۹
۴	۱۷	۱/۲	۵۳	۲۰	۸۹/۹
۵	۳	۳/۳	۳۵	۱۱	۶۳/۹
۶	۵	۰/۹	۳۵	۲۹	۶۹/۶
۷	۱۳	۱/۲	۵۳	۵	۶۶/۱
۸	۱۰	۱/۲	۸۳	۲۰	۸۴/۶
۹	۷	۳/۳	۳۵	۲۹	۶۶/۹
۱۰	۱	۰/۹	۳۵	۱۱	۸۲/۳
۱۱	۱۶	۱/۲	۵۳	۲۰	۵۴/۰
۱۲	۱۱	۰/۱	۵۳	۲۰	۷۸/۴
۱۳	۲	۰/۹	۷۰	۱۱	۷۴/۹
۱۴	۶	۰/۹	۷۰	۲۹	۷۵/۱
۱۵	۴	۳/۳	۷۰	۱۱	۷۴/۱
۱۶	۹	۱/۲	۲۳	۲۰	۷۵/۳
۱۷	۸	۳/۳	۷۰	۲۹	۷۵/۳
۱۸	۲۰	۱/۲	۵۳	۲۰	۷۶/۸
۱۹	۱۴	۱/۲	۵۳	۳۵	۷۷/۲
۲۰	۱۲	۱/۲	۵۳	۲۰	۷۶/۱

به نظر می رسد برای کاهش ورود یون های مزاحم مانند آرسنیک، اجرای عملیات در دمای حدود $50^{\circ}C$ با حداکثر ۲۰ درصد جامد و محلول اسید سولفوریک مناسب باشد. با دو مرحله ای نمودن فرآیند و استفاده از اکسید کننده ها

ترکیب غبارها در نقاط مختلف هر نمونه تفاوت‌های قابل توجهی دارد. این سیستم برای تعیین کمی عناصر مطلوب نیست.

- در مجموع نتایج تست‌های لیچینگ اسیدی (محلول اسیدسولفوریک) غبار نشان می‌دهد که تحت شرایط بهینه حدود ۶۵ درصد مس بدون استفاده از اکسید کننده طی حدود ۴۵ دقیقه حل می‌شود. این میزان با افزایش غلظت اسید به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. با توجه به چالش افزایش یون‌های مزاحم در محلول باردار با افزایش غلظت اسید، راهکار ساده تر استفاده از یک فرآیند دو مرحله‌ای الکتروشیمیایی برای انحلال بیش از ۹۵ درصدی مس از غبار کوره فلش است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این اثر مراتب قدردانی خود را از مجتمع مس سرچشمه بویژه کارشناسان امور تحقیق و توسعه این واحد و مدیران و کارشناسان محترم واحد ذوب و لیچینگ اعلام می‌نمایند.

مراجع

- [1] Mokmeli M, Torabi Parizi M. (2020) The effect of copper smelting technology on the dissolution of anodes at the Sarcheshmeh copper electrorefining plant. *Metallurgical Engineering* 23(2), 90-101.
- [2] www.mindat.org/element/Copper.
- [3] www.en.wikipedia.org/wiki/List_of_copper_ores.
- [4] Ríos, G., Ruiz, I., Rius, O., Cruells, M., & Roca, A. (2022). "Leaching of copper from a flash furnace dust using sulfuric acid". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(4), 411-421.
- [5] Ke, J. J., Qiu, R. Y., & Chen, C. Y. (1984). "Recovery of metal values from copper smelter flue dust". *Hydrometallurgy*, 12(2), 217-224.
- [6] Vítková, M., Ettler, V., Hyks, J., Astrup, T., & Kříbek, B. (2011). "Leaching of metals from copper smelter flue dust (Mufulira, Zambian Copperbelt)". *Applied Geochemistry*, 26, S263-S266.
- [7] Shibayama, A., Takasaki, Y., William, T., Yamatodani, A., Higuchi, Y., Sunagawa, S., & Ono, E. (2010). "Treatment of smelting residue for arsenic removal and recovery of copper using pyro-hydrometallurgical process". *Journal of hazardous materials*, 181(1-3), 1016-1023.

بیولوژیکی (بیولیچینگ) [۲۳] و یا شیمیایی (H_2O_2 , Fe^{3+}) در لیچینگ باطله مرحله اول امکان استحصال بیش از ۹۰ درصدی مس فراهم می‌باشد.

۴ نتیجه‌گیری

- شناسایی و آنالیز ترکیب غبار کوره‌های مجتمع سرچشمه از اهداف اصلی این تحقیق بود که در آنالیز XRF، عنصر مس با متوسط عیار ۲۳ درصد (۱۴ درصد آن مس اکسیدی) در غبار کوره فلش و همچنین مس با متوسط عیار ۱۹ درصد (۴ درصد آن مس اکسیدی) در غبار کوره‌های کنورتور مشاهده گردید. مقادیر سایر عناصر نظیر آرسنیک، سرب و روی هم قابل توجه بود.
- تغییرات میزان عناصر طی دوره نمونه‌برداری برای مس در محدوده ۲ درصد اما برای تعدادی از عناصر مانند آرسنیک و نقره قابل توجه بود و به‌عنوان مثال میزان آرسنیک غبار کوره فلش در محدوده بین ۰/۱۷ تا ۳/۹۰ درصد در نوسان بود.
- نتایج آنالیز دانه‌بندی غبار کوره‌های مجتمع مس بیانگر دانه‌ریز بودن بود. به‌صورت کلی d_{80} غبار کوره فلش حدود ۱۰ میکرون و d_{80} غبار کوره کنورتور حدود ۵ میکرون و در طول زمان نمونه‌برداری نوسان محسوسی نداشتند.
- نتایج آنالیز XRD در مجموع حاکی از تغییر نسبی ترکیب نمونه‌های طی دوره نمونه‌برداری است. البته برای نتیجه‌گیری کلی در خصوص تغییرات کمی ترکیبات نیاز به آزمایش‌های تکمیلی و توسعه دوره نمونه‌برداری است؛ لذا فرآیند نمونه‌برداری از غبار کوره‌ها ادامه دارد.
- نتایج تصاویر حاصل از آنالیزهای SEM-EDX نشان می‌دهد که ذرات غبار Submicron هستند و اندازه عمده ذرات زیر ۱۰ میکرون می‌باشد. شکل ذرات غبار دایره‌ای و نامنظم است. نمونه غبار کوره فلش می‌تواند غنی از سرب، مس، آرسنیک، گوگرد و اکسیژن باشد که در نقاط مختلف، مقادیر و درصد وزنی عناصر تغییر می‌کند. نتایج آنالیز کمی (EDS)

by sulfation roasting, water leaching and electrorefining". *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2133-2139.

[18] Gao, W., Xu, B., Yang, J., Yang, Y., Li, Q., Zhang, B., ... & Jiang, T. (2021). "Comprehensive recovery of valuable metals from copper smelting open-circuit dust with a clean and economical hydrometallurgical process". *Chemical Engineering Journal*, 424, 130411.

[19] Oráč, D., Klimko, J., Klein, D., Pirošková, J., Liptai, P., Vindt, T., & Miškufová, A. (2021). "Hydrometallurgical recycling of copper anode furnace dust for a complete recovery of metal values". *Metals*, 12(1), 36.

[20] Oliazadeh, M., Massinaie, M., Bagheri, A. S., & Shahverdi, A. R. (2006). "Recovery of copper from melting furnaces dust by microorganisms". *Minerals engineering*, 19(2), 209-210.

[21] Bakhtiari, F., Atashi, H., Zivdar, M., Seyedbagheri, S., & Fazaelpoor, M. H. (2011). "Bioleaching kinetics of copper from copper smelters dust". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17(1), 29-35.

[22] Afrouzeh, M., Ehteshamzadeh, M., Jafari, S., & Borhannejad, M. (2021). "Chemical and mineralogical characterization and thermodynamic investigation of sulphatization process of flash smelting furnace flue dust and accretions formed in WHB transition". *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 56(5), 1058-1065.

[23] Ebrahimpour, S., Abdollahi, H., Gharabaghi, M., Manafi, Z., & Tuovinen, O. H. (2022). "Acid bioleaching of copper from smelter dust at incremental temperatures". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(2), 233-242.

[24] Jackson, E., (1986) "Hydrometallurgical Extraction and Reclamation" John Willy & Sons

[25] Free, M. L. (20163) "Hydrometallurgy; Fundamentals and Applications" John Willy & Sons

[8] Morales, A., Cruells, M., Roca, A., & Bergó, R. (2010). "Treatment of copper flash smelter flue dusts for copper and zinc extraction and arsenic stabilization". *Hydrometallurgy*, 105(1-2), 148-154.

[9] Xu, Z. F., Qiang, L. I., & Nie, H. P. (2010). "Pressure leaching technique of smelter dust with high-copper and high-arsenic". *Transactions of nonferrous metals society of China*, 20, 176-181.

[10] Wu, J. Y., Chang, F. C., Wang, H. P., Tsai, M. J., Ko, C. H., & Chen, C. C. (2015). "Selective leaching process for the recovery of copper and zinc oxide from copper-containing dust". *Environmental technology*, 36(23), 2952- 2958.

[11] Alguacil, F. J., Garcia-Diaz, I., Lopez, F., & Rodriguez, O. (2015). "Recycling of copper flue dust via leaching-solvent extraction processing". *Desalination and Water Treatment*, 56(5), 1202-1207.

[12] Ha, T. K., Kwon, B. H., Park, K. S., & Mohapatra, D. (2015). "Selective leaching and recovery of bismuth as Bi₂O₃ from copper smelter converter dust". *Separation and Purification Technology*, 142, 116-122.

[13] Okanigbe, D. O., Popoola, A. P. I., & Adeleke, A. A. (2017). "Characterization of copper smelter dust for copper recovery". *Procedia Manufacturing*, 7, 121-126.

[14] Yang, T., Fu, X., Liu, W., Chen, L., & Zhang, D. (2017). "Hydrometallurgical treatment of copper smelting dust by oxidation leaching and fractional precipitation technology". *JoM*, 69, 1982-1986.

[15] Okanigbe, D. O., Popoola, A. P. I., & Adeleke, A. A. (2017). "Hydrometallurgical processing of copper smelter dust for copper recovery as nano-particles: A review". *Energy Technology 2017: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*, 205-226.

[16] Liu, W. F., Fu, X. X., Yang, T. Z., Zhang, D. C., & Lin, C. H. E. N. (2018). "Oxidation leaching of copper smelting dust by controlling potential". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(9), 1854-1861.

[17] Priya, J., Randhawa, N. S., Hait, J., Bordoloi, N., & Patel, J. N. (2020). "High-purity copper recycled from smelter dust

Characterization of the dust of Sarcheshme copper complex furnaces to optimize the operational parameters of copper leaching process

Sana Akbarifar^{1,2}, Ali Shahabi Azar³, Zahra Manafie³, Mahin Schaffie^{1,2},
Mohammad Ranjbar Hamghavandi^{*1,2}

1. Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2. Institute of Mineral Industries, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. National Iranian Copper Industries Company, Sarcheshmeh Copper Complex, Rafsanjan, Iran

ABSTRACT

Mineralogy and chemical composition are the main indicators for selecting operational parameters for copper leaching from mineral resources and smelting furnace dust. The main goal of this research is to evaluate the dust composition of chalcopyrite concentrate smelting furnaces to improve copper leaching efficiency. In this regard, for four months, samples were taken daily from the dust of the smelting furnaces of Sarcheshme copper complex. Using X-ray diffraction analysis, X-ray fluorescence spectroscopy, scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy, and reflective light microscopy, the composition of the samples was determined and leaching tests were designed and implemented to determine the main operational parameters. The results of this study showed that the grain size distribution of the samples did not change significantly during the sampling period, but the amount of some elements such as arsenic was varied and fluctuated between 0.17 and 3.90%. The changes of copper and iron were also about 2%. The results of leaching tests of flash furnace dust showed that the solid percentage, acid concentration and temperature are the most important operating parameters. Under the optimal operating conditions, about 65% of copper is dissolved without the use of an oxidizer within a maximum of 60 minutes. By using a two-stage electrochemical process, the conditions for extracting more than 95% of copper from flash furnace dust was provided.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: December 19, 2023

Received in revised form: January 22, 2024

Accepted: March 18, 2024

Key words:

Metallurgy,
Melting,
Dust,
Mineralogy,
Copper leaching

* Corresponding author
m.ranjbar@uk.ac.ir