

تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس

بهناز میرشکاری، سید محمد جواد کلینی*، بهزاد شهبازی

بخش فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق تأثیر امواج ماکرو بر شیمی سطح و درجه آزادی کانی‌های سولفیدی مس (کانسنگ سرچشمه و پلنگی) بررسی شد. در آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی تأثیر امواج ماکرو بر شیمی سطح، عیار و بازیابی نمونه سرچشمه پس از ۹۰ ثانیه تابش به ترتیب ۷ و ۲ درصد افزایش یافت، اما در نمونه پلنگی عیار و بازیابی به ترتیب ۴ و ۸ درصد کاهش یافت. همچنین آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی تأثیر امواج ماکرو بر درجه آزادی نشان داد که برای افزایش عیار و بازیابی نمونه سرچشمه به ترتیب به میزان ۴ و ۶ درصد نیاز به ۱۸۰ ثانیه تابش امواج ماکرو است اما در نمونه پلنگی برای همین میزان افزایش در عیار و بازیابی، نیاز به ۶۰۰ ثانیه تابش امواج ماکرو است. علاوه بر این، ثابت نرخ فلوتاسیون نمونه‌های سرچشمه و پلنگی پس از ۱۲۰ ثانیه تابش امواج ماکرو به ترتیب ۰/۲ و ۰/۱ بر دقیقه افزایش یافت.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :
دریافت: ۱۸ فروردین ۱۳۹۷
دریافت پس از اصلاح: ۲۲ دی ۱۳۹۷
پذیرش نهایی: ۴ اسفند ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

امواج ماکرو
فلوتاسیون
مس
کالکوسیت
کالکوپیریت

حقوق ناشر محفوظ است.

* عهده دار مکاتبات

koleini@modares.ac.ir

۱- مقدمه

اختلاف در خواص ترشوندگی کانی‌های تشکیل دهنده کانسنگ، اساس جدایش در روش فلوتاسیون است. امروزه با توجه به کاهش عیار مواد معدنی و افزایش پیچیدگی‌های کانی‌شناسی، از روش‌های پیش عمل‌آوری برای افزایش اختلاف خواص کانی‌های تشکیل دهنده کانسنگ استفاده می‌شود. از جمله این روش‌ها که در سه دهه اخیر بیشتر بررسی شده، استفاده از تابش امواج ماکرو است [۳، ۲، ۱]. بررسی‌های انجام شده بیانگر تاثیر زیاد امواج ماکرو بر خواص کانی‌ها است که نوید بخش افق‌هایی روشن در فرآوری مواد معدنی، افزایش بازیابی فلزات، افزایش کارایی فرآیند، بهبود درجه آزادی کانی‌ها، کاهش هزینه‌ها، صرفه جویی در زمان، کاهش آلاینده‌گی و غیره است [۶، ۵، ۴].

سه مکانیزم موثر در استفاده از امواج ماکرو عبارتند از: (۱) تفاوت در میزان جذب امواج ماکرو توسط کانی‌های مختلف و در نتیجه انبساط حرارتی نابرابر کانی‌ها باعث ایجاد میکروتترک در کانسنگ می‌شود. (۲) فشار داخلی ناشی از بخار بسیار گرم آب و گاز (به عنوان مثال، SO_2 ناشی از تبدیل سولفیدهای فلزی به اکسیدهای فلزی) باعث ایجاد شکاف در سنگ می‌زبان می‌شود. (۳) گرمای زیاد ناشی از جذب امواج ماکرو باعث واکنش بین کانی‌های موجود در کانسنگ و تغییر شیمیایی آنها می‌شود [۷، ۸].

مطالعات کینگمن^۱ و همکاران (۲۰۰۰) بر روی کانسنگ سولفیدی مس پالابورا^۲ نشان داد که قابلیت فلوتاسیون کانی‌ها پس از تابش امواج ماکرو در حضور اکسیژن کاهش می‌یابد. در صورتی که در حضور نیتروژن، بازیابی در زمان‌های تابش کم (۱۰ و ۳۰ ثانیه) افزایش یافته و با افزایش زمان تابش، مجدداً کاهش می‌یابد. دلیل آن اکسیداسیون سطح کانی‌های بارزش در اثر تابش امواج ماکرو در حضور اکسیژن است [۹]. به طور مشابه، کن^۳ و همکاران (۲۰۰۷) مشاهده کردند که با افزایش توان و زمان تابش امواج ماکرو، قابلیت فلوتاسیون پیریت، کالکوپیریت و گالن کاهش می‌یابد [۱۰]. بررسی‌های ورستر^۴ و همکاران (۲۰۰۱) بر روی کانسنگ ماسیو مس نشان داد که بازیابی فلوتاسیون پس از ۹۰ ثانیه تابش امواج ماکرو تغییر نمی‌کند، در صورتی که اندیس کار آن ۷۰ درصد کاهش می‌-

یابد [۱۱]. مطالعات اورومونس^۵ و همکاران (۲۰۰۴) بر روی کانسنگ سولفیدی حاوی پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت نشان داد که بازیابی مس پس از تابش امواج ماکرو در زمان‌های طولانی، به شدت کاهش می‌یابد [۱۲]. طبق بررسی‌های سایون^۶ و همکاران (۲۰۰۵) بازیابی فلوتاسیون کانسنگ کربناتی مس در زمان‌های کوتاه تابش امواج ماکرو به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که بازیابی به توان و زمان تابش امواج ماکرو حساس است [۱۳].

ارول کایا^۷ (۲۰۱۰) تاثیر امواج ماکرو بر فلوتاسیون دو نوع کانسنگ سولفیدی مس با کانی‌شناسی متفاوت را بررسی کرد. تابش امواج ماکرو در دماهای پایین بر بازیابی هر دو نوع کانسنگ تاثیری نداشت، اما با افزایش دمای تابش امواج ماکرو، بازیابی به دلیل اکسیداسیون سطحی کانی‌ها، کاهش یافت [۱۴]. مطالعات دیگری که توسط کابوشش^۸ و همکاران (۲۰۱۰) بر روی کانسنگ سولفیدی مس انجام شد، عیار مس پس از تابش امواج ماکرو دو درصد افزایش پیدا کرد، در حالی که بازیابی مس در نمونه‌های تابش یافته و بدون تابش امواج ماکرو تقریباً ثابت بود [۱۵]. مطالعات بچلر^۹ و همکاران (۲۰۱۶) نیز بر روی کانسنگ مس پورفیری شیلی نشان دهنده افزایش درجه آزادی و در نتیجه افزایش عیار و بازیابی پس از تابش امواج ماکرو بود [۱۶، ۱۷].

در تحقیقات قبلی تاثیر امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانسنگ‌های مس سولفیدی بررسی شده است. این بررسی‌ها شامل مطالعات مقدماتی در مورد تاثیر زمان و توان تابش بر فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس است. در این تحقیق علاوه بر مطالعه تاثیر تابش امواج ماکرو بر شیمی سطح ذرات سولفیدی مس، تاثیر آن بر ایجاد ریزترک‌ها و درجه آزادی ذرات و در نتیجه عیار و بازیابی فلوتاسیون بررسی شده است. علاوه بر این تاثیر تابش امواج ماکرو بر نرخ شناورسازی ذرات و کارایی فلوتاسیون تعیین شده است. برای تحلیل بهتر نتایج و بررسی تاثیر تابش امواج ماکرو بر روی مشخصات سطحی ذرات از آنالیز FTIR استفاده شد. همچنین تاثیر نوع کانی سولفیدی، نوع باطله همراه و دانه‌بندی نمونه در پیش عمل‌آوری امواج ماکرو بررسی شد [۱۸، ۱۹].

⁵ Orumwense

⁶ Sahyoun

⁷ Erol Kaya

⁸ Kobusheshe

⁹ Batchelor

¹ Kingman

² palabora

³ Can

⁴ Vorster

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- شناسایی نمونه

کانسنگ مس از معادن سرچشمه و پلنگی رفسنجان تهیه شد. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRF و XRD) نمونه‌ها در جدول ۱ و شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. کانی اصلی مس در نمونه سرچشمه، کالکوپیریت و کانی‌های باطله آن مسکوویت، کوارتز، پیریت و آنورتیت است. کانی اصلی مس در نمونه پلنگی، کالکوسیت و کانی‌های باطله آن آنستاتیت، آلیپت، کلسیت، هماتیت و مالاکیت است.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی کانسنگ‌های مس سرچشمه و پلنگی با استفاده از آنالیز XRF

ترکیب	مس سرچشمه (درصد)	مس پلنگی (درصد)
Na ₂ O ₅	۱/۱۷۶	۴/۲۴
MgO	۴/۴۱۵	۱/۹۰۴
Al ₂ O ₃	۱۹/۲۸۱	۱۳/۹۱۱
SiO ₂	۵۷/۰۱۷	۳۷
SO ₃	۲/۹۸۷	۱/۰۲۸
Fe ₂ O ₃	۳/۲۳۲	۱۱/۲۰۱
CaO	۰/۹۶۶	۳/۲۰۲
K ₂ O	۵/۳۰۷	۰/۴
Cu	۰/۹۵۷	۱۵/۲۱۵

۲-۲- پیش عمل آوری با امواج ماکرو

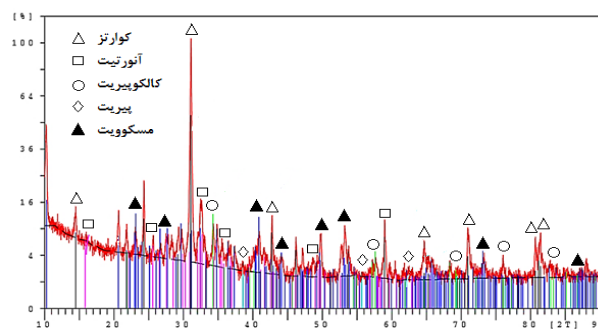
در مطالعات از آون امواج ماکرو مولتی مد خانگی پاناسونیک مدل NN-ST656W با توان اسمی ۱۱۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز استفاده شد. تابش امواج ماکرو به دو روش متفاوت (الف) قبل از آسیاکنی و (ب) بعد از آسیاکنی انجام شد.

در روش (الف)، به منظور بررسی تاثیر تابش امواج ماکرو بر درجه آزادی، دو نمونه سرچشمه و پلنگی با ابعاد کوچکتر از ۵ میلی‌متر در زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه تحت تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات قرار گرفتند و پس از آن به منظور تهیه بار ورودی فلوتاسیون، در آسیای گلوله‌ای تا ابعاد کوچکتر از ۷۵ میکرون خرد شدند.

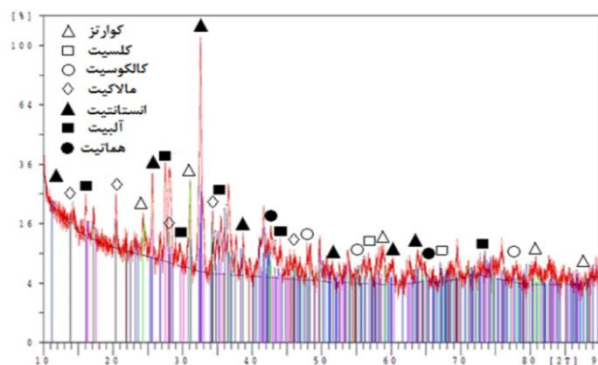
در روش (ب)، به منظور بررسی تاثیر تابش امواج ماکرو بر شیمی سطح، دو نمونه ابتدا تا ابعاد کوچکتر از ۷۵ میکرون خرد شدند و سپس در زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه تحت تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات قرار گرفتند. برای بررسی تاثیر توان تابش، نمونه مس سرچشمه تحت توان‌های ۶۰ و ۱۸۰ وات نیز عمل آوری شد. توان تابش امواج ماکرو با توجه به حداکثر توان دستگاه (۵۵۰ وات) تعیین شد. به منظور تعیین محدوده زمان تابش امواج ماکرو، آزمایش‌های اولیه‌ای با در نظر گرفتن پیشینه تحقیق انجام شد. در زمان‌های کمتر از ۱۰ ثانیه، تابش بی‌اثر بود و در زمان‌های بیشتر از ۶۰۰ ثانیه، ذوب جزئی در نمونه رخ می‌داد.

۲-۳- فلوتاسیون مکانیکی

آزمایش‌های فلوتاسیون مکانیکی در سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی دنور با حجم یک لیتر انجام شد. از پتاسیم اتیل گزنات و MIBC به عنوان کلکتور و کف ساز استفاده شد. برای تنظیم pH نیز از هیدروکسید سدیم استفاده شد. بر اساس آزمایش‌های بهینه‌سازی اولیه، درصد جامد ۳۵ درصد، سرعت همزن ۹۰۰ دور بر دقیقه و pH=۹ در نظر گرفته شد. ابتدا نمونه‌های پودر شده درون سلول ریخته شد و پس از سه دقیقه آماده‌سازی و تنظیم pH، کلکتور و کف ساز به سلول اضافه شد. زمان آماده‌سازی کلکتور و کف ساز به ترتیب ۲ و ۱ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از آن هوادهی آغاز و در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ دقیقه عمل کف‌گیری انجام شد.



شکل (۱) آنالیز XRD نمونه مس سرچشمه



شکل (۲) آنالیز XRD نمونه مس پلنگی رفسنجان

۳- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

۳-۱- تاثیر تابش امواج ماکرو بر آزادشدگی ذرات

آزمایش‌های فلوتاسیون به منظور بررسی اثر پیش عمل آوری امواج ماکرو بر آزادشدگی ذرات بر روی دو کانسنگ سرچشمه و پلنگی انجام شد. تابش امواج ماکرو بر بار ورودی فلوتاسیون پس از سنگ شکنی و پیش از آسیابکنی بود. پیش عمل آوری هر دو کانسنگ در توان ثابت ۵۵۰ وات و زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه انجام شد.

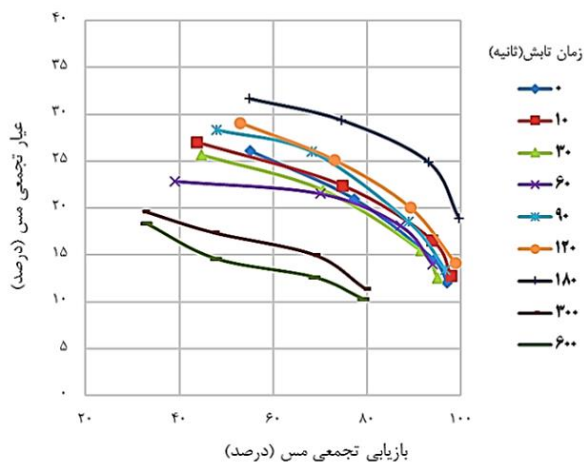
در نمونه مس سرچشمه با افزایش زمان تابش تا ۱۸۰ ثانیه، عیار و بازیابی افزایش یافته اما با افزایش زمان تابش تا ۶۰۰ ثانیه، عیار و بازیابی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (شکل ۳). در نمونه مس پلنگی با افزایش زمان تابش امواج ماکرو تا ۶۰۰ ثانیه، عیار و بازیابی افزایش یافته است (شکل ۴). دلیل افزایش در عیار و بازیابی، افزایش شکاف‌های ایجاد شده در نمونه و در نتیجه بهبود آزادشدگی کانی‌های با ارزش است. درجه آزادی نمونه‌های مس سرچشمه و پلنگی پس از تابش امواج ماکرو به ترتیب در زمان‌های تابش ۱۸۰ و ۶۰۰ ثانیه به میزان قابل توجهی افزایش یافته است (جدول ۲). شکل‌های ۵ و ۶ تصاویر SEM از دو نمونه مس سرچشمه و پلنگی است که درزه و شکاف‌های ایجاد شده در دو نمونه در اثر تابش امواج ماکرو را نشان می‌دهد.

تفاوت در رفتار دو نمونه مس سرچشمه و پلنگی در زمان‌های تابش بیش از ۱۸۰ ثانیه را می‌توان به تفاوت در کانی‌شناسی آن‌ها نسبت داد. در واقع در نمونه مس سرچشمه به دلیل اختلاف بالای کانی‌های با ارزش و باطله از نظر جذب امواج ماکرو، گرادیان گرمایی بالایی در مرز کانی‌ها ایجاد می‌شود که باعث ایجاد تنش‌های کششی در مرز کانی‌ها و گسترش شکاف‌ها در زمان تابش ۱۸۰ ثانیه می‌شود ولی در نمونه مس پلنگی به علت کمتر بودن اختلاف کانی‌های با ارزش و باطله از نظر جذب امواج ماکرو، میزان گرادیان گرمایی ایجاد شده در مرز کانی‌ها کمتر است. بنابراین برای رسیدن به درزه و شکاف‌های بیشتر و در نتیجه بهبود عیار و بازیابی به زمان تابش بیشتری نیاز است. به طور خلاصه برای افزایش عیار و بازیابی فلوتاسیون نمونه مس سرچشمه به ترتیب به میزان ۴ و ۶ درصد نیاز به ۱۸۰ ثانیه تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات است، در حالی که در مورد نمونه مس پلنگی برای همین میزان افزایش در عیار و بازیابی، نیاز به ۶۰۰ ثانیه تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات است.

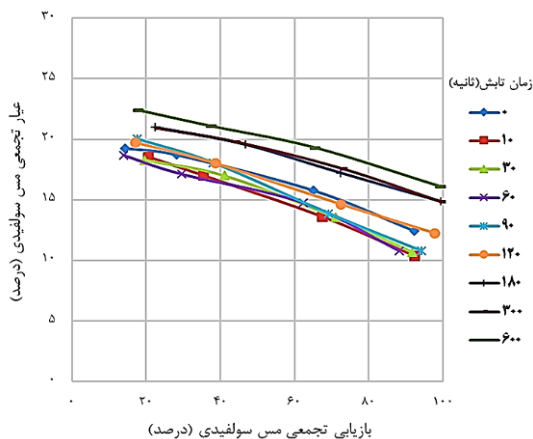
جدول (۲) تأثیر امواج ماکرو بر درجه آزادی دو نمونه

مس سرچشمه و مس پلنگی

نام نمونه	دانه‌بندی (میکرون)	زمان تابش (ثانیه)	درجه آزادی (درصد)
مس	-۷۵+۵۴	۰	۸۲/۷۷
		۱۸۰	۸۷/۸۶
سرچشمه	-۵۴+۳۸	۰	۹۵/۰۸
		۱۸۰	۹۷/۸۶
مس پلنگی	-۷۵+۵۴	۰	۸۱/۶۵
		۶۰۰	۸۵/۵۳
		۶۰۰	۸۳/۵۰
			۹۲/۵۰

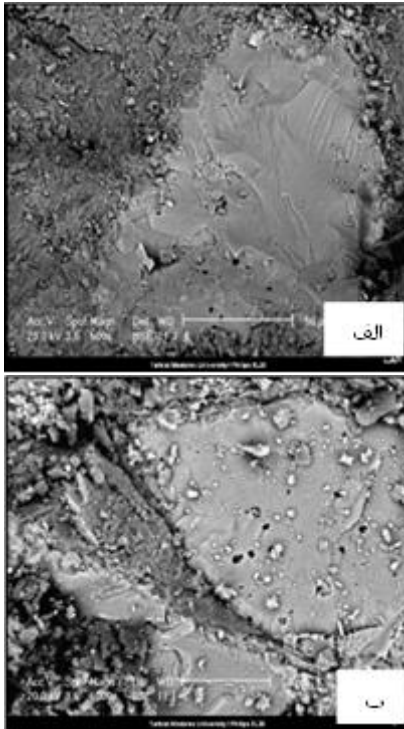


شکل (۳) عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس سرچشمه در توان ۵۵۰ وات (تابش امواج ماکرو قبل از آسیابکنی)

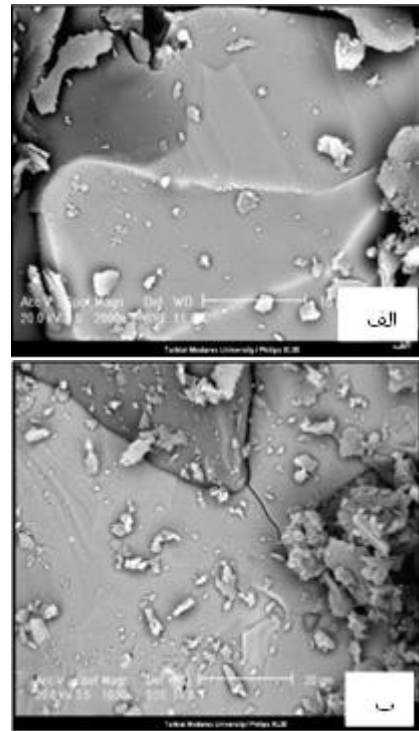


شکل (۴) عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس پلنگی در توان ۵۵۰ وات (تابش امواج ماکرو قبل از آسیابکنی)

تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس



شکل (۶) تصاویر SEM از نمونه مس پلنگی (الف) بدون عمل آوری امواج ماکرو، (ب) پس از عمل آوری امواج ماکرو

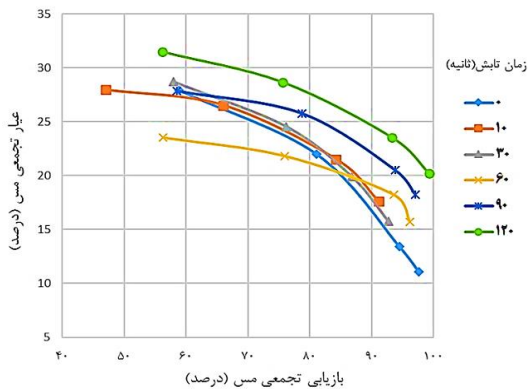


شکل (۵) تصاویر SEM از نمونه مس سرچشمه (الف) بدون عمل آوری امواج ماکرو، (ب) پس از عمل آوری امواج ماکرو

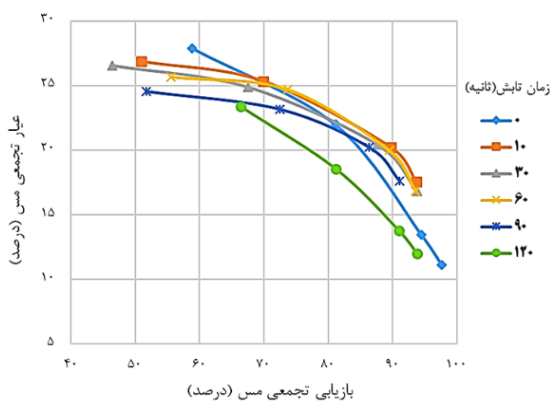
۳-۲- تأثیر تابش امواج ماکرو بر شیمی سطح

تأثیر تابش امواج ماکرو بر شیمی سطح دو کانسنگ مس سرچشمه و پلنگی بررسی شد. تابش امواج ماکرو بر بار ورودی فلوتاسیون، پس از آسیابگری انجام شد. پیش عمل آوری کانسنگ مس سرچشمه با توان‌های ۶۰، ۱۸۰ و ۵۵۰ وات (شکل‌های ۷ تا ۹) و پیش عمل آوری کانسنگ مس پلنگی با توان ۵۵۰ وات (شکل ۱۰) انجام شد.

طبق شکل‌های ۷ تا ۹، در زمان‌های کم تابش (۱۰ ثانیه) با افزایش توان از ۶۰ وات به ۱۸۰ و ۵۵۰ وات، عیار و بازیابی نمونه به میزان قابل توجهی افزایش یافت. به عنوان مثال در زمان ۱۰ ثانیه، بازیابی در توان‌های ۶۰، ۱۸۰، ۵۵۰ وات به ترتیب ۹۱، ۹۵ و ۹۸ درصد است. افزایش در عیار و بازیابی، به دلیل افزایش درزه و شکاف‌های ایجاد شده در مرز کانی‌های هدف و باطله در اثر افزایش توان تابش است. در زمان‌های تابش بالاتر (۱۲۰ ثانیه) با افزایش توان تابش از ۶۰ وات به ۱۸۰ و ۵۵۰ وات، عیار و بازیابی نمونه کاهش یافته است. به عنوان مثال در زمان ۱۲۰ ثانیه، بازیابی در توان‌های ۶۰، ۱۸۰، ۵۵۰ وات به ترتیب ۹۹، ۹۵ و ۹۳ درصد و عیار ۲۱، ۱۳ و ۱۰ درصد است. این کاهش در عیار و بازیابی، به دلیل اکسیداسیون سطحی کانی‌های سولفیدی مس در اثر تابش امواج ماکرو است.



شکل (۷) عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس سرچشمه در توان ۶۰ وات (تابش امواج ماکرو پس از آسیابگری)



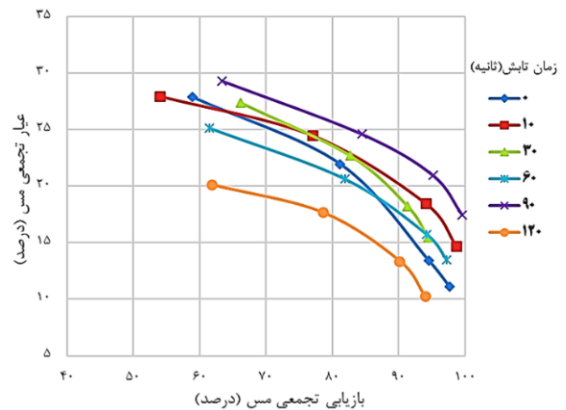
وات است، می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر زمان و توان تابش، کانی شناسی نمونه نیز اهمیت زیادی دارد. در توان ۵۵۰ وات و در زمان ۹۰ ثانیه عیار و بازیابی نمونه مس سرچشمه افزایش قابل توجهی یافته در صورتی که عیار و بازیابی نمونه مس پلنگی به شدت کاهش یافته است. این تفاوت در رفتار دو کانسنگ سرچشمه و پلنگی، ناشی از تفاوت در کانی شناسی آنها است. افزایش عیار و بازیابی نمونه مس سرچشمه در ۹۰ ثانیه به دلیل ایجاد شکاف در مرز کانی‌ها و همچنین اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی مزاحم مانند پیریت است. اما کاهش عیار و بازیابی در نمونه مس پلنگی به دلیل عدم وجود کانی‌های سولفیدی مزاحم در نمونه و در نتیجه عدم اکسیداسیون آن‌ها و اکسیداسیون سطحی کانی‌های سولفیدی مس است که در آنالیزهای FTIR قابل مشاهده است.

در نمونه مس سرچشمه، کالکوپریت که کانی جاذب امواج ماکرو است در تماس با کانی‌های کوارتز و مسکوویت قرار دارد که کانی‌های شفاف در برابر تابش امواج ماکرو هستند و اختلاف آن‌ها با کالکوپریت از نظر جذب امواج ماکرو زیاد است، به همین دلیل میزان گرادیان گرمایی و تنش‌های کششی ناشی از آن و در نتیجه میزان درزه و شکاف‌های ایجاد شده در مرز کانی‌ها زیاد است. اما در نمونه مس پلنگی -های کالکوسیت و بورنیت با جذب بالای امواج ماکرو در تماس با کانی‌های مالاکیت، هماتیت و انستاتیت قرار دارند که به میزان کمی جاذب امواج ماکرو هستند، به همین دلیل گرادیان گرمایی ایجاد شده در اثر تابش امواج ماکرو بین کانی‌های سولفیدی مس و گانگ در نمونه مس پلنگی کمتر از نمونه مس سرچشمه است و در نتیجه میزان تنش‌های کششی و شکاف‌های ناشی از آن در نمونه مس پلنگی کمتر است. این امر باعث می‌شود که تاثیر مثبت ایجاد شکاف‌ها در افزایش عیار و بازیابی، نتواند بر تاثیر منفی اکسیداسیون سطحی کانی‌های سولفیدی مس غلبه کند.

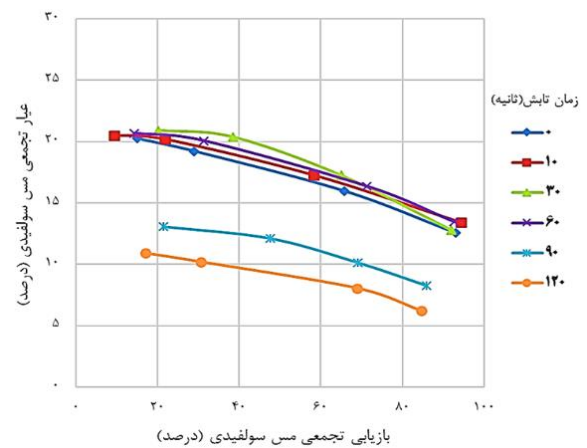
نتایج آنالیزهای FTIR تعدادی از کنسانتره‌های مس سرچشمه و پلنگی پس از تابش امواج ماکرو، به منظور بررسی تأثیر پیش عمل آوری امواج ماکرو بر شیمی سطح و میزان جذب کلکتور، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

نمودار FTIR کنسانتره مس سرچشمه نسبتاً ساده است. اولین پیک‌های ظاهر شده در این نمودار در فرکانس‌های ۴۷۱ و ۵۳۱ هستند که به ترتیب مربوط به پیوندهای موجود در کانی‌های سولفیدی مانند S-S و پیوندهای مس و اکسیژن در

شکل (۸) عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس سرچشمه در توان ۱۸۰ وات (تابش امواج ماکرو پس از آسیابکنی)



شکل (۹) عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس سرچشمه در توان ۵۵۰ وات (تابش امواج ماکرو پس از آسیابکنی)



شکل (۱۰) عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس پلنگی در توان ۵۵۰ وات (تابش امواج ماکرو پس از آسیابکنی)

در واقع در زمان ۱۲۰ ثانیه، با افزایش توان تابش، اکسیداسیون سطحی کانی‌های سولفیدی مس افزایش یافته و بر اثر مثبت شکاف‌های ایجاد شده در مرز کانی‌ها، غلبه کرده است.

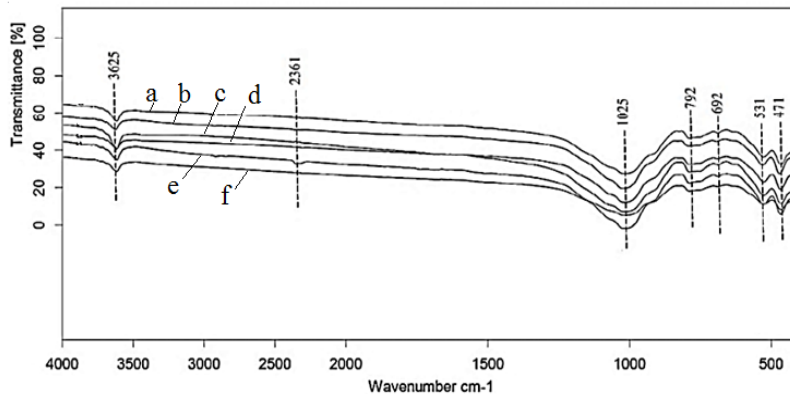
به طور خلاصه می‌توان گفت که بین توان و زمان تابش باید به گونه‌ای تعادل برقرار باشد که انرژی مشخصی به نمونه تابیده شود. مقدار کم انرژی (حدود ۶ کیلوژول برای نمونه مس سرچشمه) تأثیری بر کارایی فلوتاسیون ندارد و مقدار بیش از حد آن (حدود ۶۵ کیلوژول برای نمونه مس سرچشمه) باعث اکسیداسیون کانی‌های هدف می‌شود و با کاهش تأثیر مثبت شکاف‌های ایجاد شده، باعث کاهش عیار و بازیابی می‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ که به ترتیب مربوط به پیش عمل آوری نمونه‌های مس سرچشمه و پلنگی در توان ۵۵۰

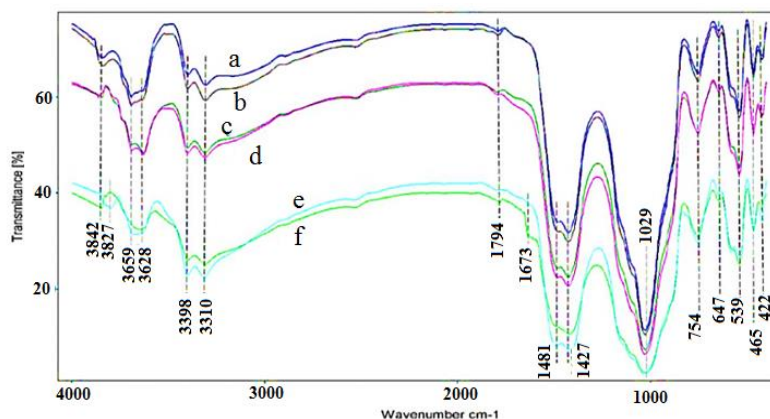
تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس

است. نمودار FTIR کانسنگ مس پلنگی نسبتاً پیچیده و تعداد پیک‌های آن بیشتر است. این نشان دهنده تنوع بیشتر پیوندها در نمونه مس پلنگی است.

کانی‌های اکسیدی مس هستند که نشان دهنده وجود اکسیدها و سولفیدهای مس و آهن در سطح ذرات است [۲۱،۲۰].



شکل (۱۱) آنالیز FTIR نمونه مس سرچشمه در زمان‌های مختلف تابش (a) ۳۰ (b) ۶۰ (c) ۹۰ (d) ۱۰ (e) ۶۰ (f) ۱۲۰ ثانیه



شکل (۱۲) آنالیز FTIR نمونه مس پلنگی در زمان‌های مختلف تابش (a) ۳۰ (b) ۶۰ (c) ۹۰ (d) ۱۰ (e) ۶۰ (f) ۱۲۰ ثانیه

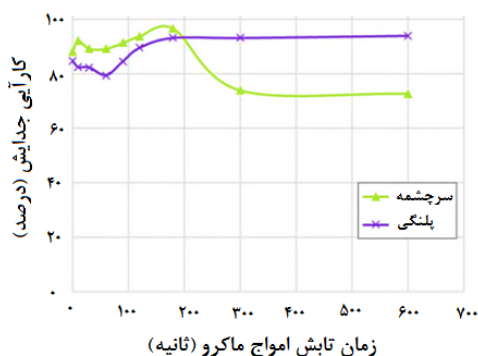
پیک‌های ظاهر شده در فرکانس‌های ۴۲۲، ۴۶۵ و ۵۳۹ به ترتیب نشان دهنده اکسیدهای آهن (پیوند Fe-O)، اکسید و سولفات مس و سولفیدهای مس در سطح ذرات است [۳۰،۲۹].

پس از آن پیک‌های ۶۴۷ و ۷۵۴ به ترتیب به پیوندهای C-H و CH در ترکیبات آروماتیک نسبت داده می‌شوند. پیک فرکانس ۱۰۲۹ مربوط به پیوند C=S در گزنتات‌ها است و نشان دهنده جذب دی گزنتوژن در سطح ذرات است [۲۷،۲۶]. پیک‌های ۱۴۲۷ و ۱۴۸۱ نیز به ترتیب نشان دهنده سولفات‌ها و کربنات‌ها است [۳۲،۳۱]. پیک ظاهر شده در فرکانس ۱۶۷۳ مربوط به پیوند O-C-S در ترکیب گزنتات است [۳۳،۳۲،۳۱]. پیک‌های ۱۷۹۴، ۳۳۱۰ و ۳۳۹۸ نیز مربوط به پیوندهای C=O در آلدهیدها و C=CH در الکل‌ها هستند. دو پیک ۳۶۲۸ و ۳۸۴۲ را می‌توان به پیوند O-H در الکل‌ها نسبت داد.

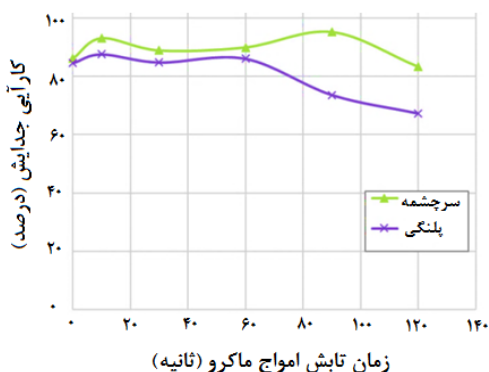
پس از آن پیک ظاهر شده در فرکانس ۶۹۲ مربوط به هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن و سولفات مس است و نشان دهنده اکسیداسیون سطحی کانی‌های آهن مانند پیریت است [۲۴،۲۳،۲۲].

۷۹۲، ۱۰۲۵ و ۳۶۲۵ به ترتیب به پیوندهای C-H در ترکیبات آروماتیک، C=S در دی گزنتوژن و O-H در الکل‌ها مربوط می‌شوند که در این نمونه نشان دهنده وجود کلکتور اتیل گزنتات و تشکیل دی گزنتوژن در سطح نمونه هستند [۲۸،۲۷،۲۶،۲۵]. مطابق شکل بیشترین جذب گزنتات مربوط به زمان تابش ۹۰ ثانیه است و کمترین میزان اکسیدهای مس و آهن مربوط به نمونه بدون تابش امواج ماکرو است که این با نتایج نمودارهای عیار و بازیابی مطابقت دارد. نمودارهای FTIR سایر زمان‌های تابش تقریباً یکسان است و پس از تابش امواج ماکرو فاز جدیدی تشکیل نشده

افزایش زمان تابش تا ۹۰ ثانیه، کارایی جدایش نمونه مس سرچشمه و مس پلنگی به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.



شکل (۱۳) تأثیر امواج ماکرو پیش از آسیابکاری بر کارایی فلوتاسیون



شکل (۱۴) تأثیر امواج ماکرو پس از آسیابکاری بر کارایی فلوتاسیون

تفاوت کارایی جدایش دو نمونه در زمان ۹۰ ثانیه، به دلیل تفاوت کانی شناسی دو نمونه است. اما با افزایش زمان تابش تا ۱۲۰ ثانیه، کارایی جدایش هر دو نمونه کاهش می‌یابد و به کمترین میزان می‌رسد. میزان کاهش کارایی جدایش در دو نمونه متفاوت است. در نمونه مس سرچشمه این کاهش ناچیز است اما در نمونه مس پلنگی کارایی جدایش پس از ۱۲۰ ثانیه تابش از ۸۲ درصد به ۶۸ درصد رسیده است. در نتیجه در آزمایش‌هایی که تابش امواج ماکرو پس از آسیابکاری انجام می‌شود، تابش امواج ماکرو نه تنها تأثیر مثبت قابل توجهی بر کارایی دو نمونه ندارد، بلکه در زمان‌های تابش بالاتر باعث کاهش کارایی جدایش نیز می‌شود.

۳-۴- تأثیر امواج ماکرو بر ثابت نرخ فلوتاسیون

اندازه ذرات، درجه آزادی و شیمی سطح از عوامل مؤثر بر ثابت نرخ فلوتاسیون هستند. به دلیل این که اندازه ذرات در تمام آزمایش‌ها یکسان و کوچک‌تر از ۷۵ میکرون بود، پس تغییر

همچنین پیک‌های ظاهر شده در فرکانس‌های ۳۸۴۲ و ۳۸۲۷ نیز مربوط به پیوند هیدروژنی O-H هستند [۳۲،۳۰،۲۱].

اگر میزان جذب کلکتور در سطح نمونه با شدت پیک‌های ترکیبات آلی موجود در نمونه به خصوص پیک‌های ۳۶۲۸ و ۷۵۴،۱۰۲۹ تعیین شود، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار جذب کلکتور در سطح نمونه بدون تابش و نمونه تابش یافته در ۱۰ ثانیه است و کمترین میزان جذب کلکتور نیز در زمان ۱۲۰ ثانیه رخ داده است.

میزان کانی‌های اکسیدی، کربناتی و سولفاتی در نمونه بدون تابش امواج ماکرو و نمونه‌های تابش یافته در زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه تقریباً یکسان است، اما در زمان ۹۰ ثانیه افزایش یافته است. شدت پیک‌های مربوط به پیریت و سولفیدهای مس در نمونه‌های بدون تابش و تابش یافته در زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه تقریباً یکسان است اما در نمونه تابش یافته در زمان ۹۰ ثانیه از شدت این پیک‌ها کاسته شده است و برای نمونه تابش یافته در زمان ۱۲۰ ثانیه به حداقل رسیده است.

علاوه بر این با توجه به پیک‌های ظاهر شده در فرکانس‌های ۳۸۴۲ و ۳۸۲۷ که پیوند هیدروژنی O-H را نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که در زمان ۱۲۰ ثانیه بر شدت این پیک‌ها افزوده شده که نشان دهنده اکسیداسیون و آبدوست شدن سطح نمونه است. نتایج مطابقت خوبی با نمودارهای عیار و بازیابی دارد.

۳-۳- تأثیر تابش امواج ماکرو بر کارایی فلوتاسیون

تأثیر تابش امواج ماکرو پیش از آسیابکاری بر کارایی فلوتاسیون هر دو کانسنگ بررسی شد (شکل ۱۳). با افزایش زمان تابش تا ۱۸۰ ثانیه، کارایی جدایش دو کانسنگ بطور مشابه افزایش یافته است، اما با افزایش زمان تابش از ۱۸۰ تا ۶۰۰ ثانیه، دو کانسنگ رفتارهای متفاوتی دارند.

در نمونه مس پلنگی در زمان‌های تابش امواج ماکرو بیش از ۱۸۰ ثانیه، کارایی جدایش تقریباً ثابت است اما در نمونه مس سرچشمه با افزایش زمان تابش، کارایی جدایش کاهش می‌یابد. در نتیجه در آزمایش‌هایی که تابش امواج ماکرو پیش از آسیابکاری است، بیشترین کارایی جدایش دو نمونه پس از ۱۸۰ ثانیه تابش امواج ماکرو با توان ۵۵۰ وات است.

تأثیر تابش امواج ماکرو پس از آسیابکاری بر کارایی فلوتاسیون هر دو کانسنگ بررسی شد (شکل ۱۴). تا زمان تابش ۶۰ ثانیه، کارایی جدایش هر دو نمونه مشابه و تقریباً ثابت است. با

تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس

ثابت نرخ فلوتاسیون نمونه مس پلنگی با شیب یکسانی نسبت به پیش عمل آوری امواج ماکرو پس از آسیابگری افزایش یافته است و این افزایش در ثابت نرخ فلوتاسیون تا زمان تابش ۶۰۰ ثانیه ادامه دارد، اما ثابت نرخ فلوتاسیون نمونه مس سرچشمه تا زمان تابش ۱۸۰ ثانیه افزایش و پس از آن تا زمان تابش ۶۰۰ ثانیه کاهش یافته است. این نتایج با نمودارهای عیار-بازیابی مطابقت دارد و نشان می‌دهد که تابش امواج ماکرو تا ۱۸۰ ثانیه بر ثابت نرخ فلوتاسیون مس سرچشمه تأثیر مثبت دارد و در زمان‌های بیشتر، تابش امواج ماکرو به دلیل اکسیداسیون سطحی کالکوپیریت و کاهش قابلیت فلوتاسیون مس، باعث کاهش ثابت نرخ فلوتاسیون می‌شود.

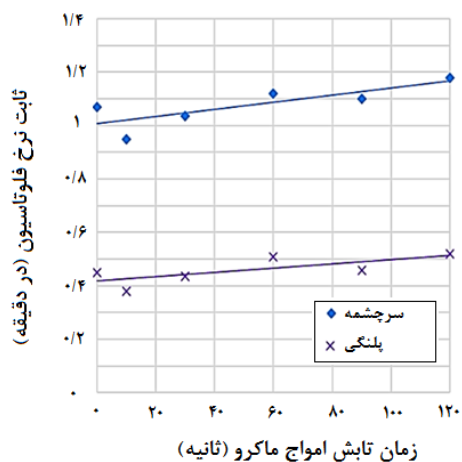
۳-۵- تأثیر دانه‌بندی نمونه بر عمل آوری با امواج ماکرو

ابعاد بار ورودی فلوتاسیون تا این مرحله، کوچک‌تر از ۷۵ میکرون بود. بنابراین در آزمایش‌های فلوتاسیونی که به منظور بررسی تأثیر دانه‌بندی بار ورودی بر عمل آوری امواج ماکرو انجام شد، از نمونه مس سرچشمه با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۵ میکرون استفاده شد.

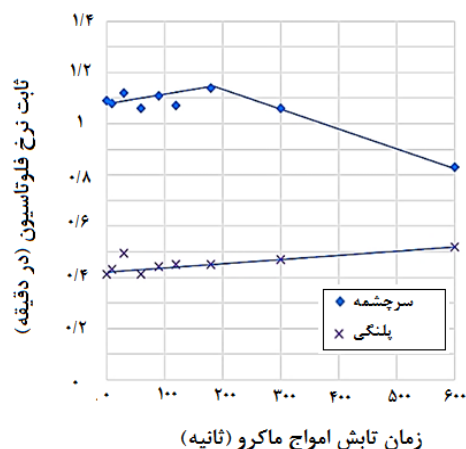
پیش عمل آوری بار ورودی پیش از آسیابگری و با توان ۵۵۰ وات انجام شد. طبق شکل ۱۷، تابش امواج ماکرو در زمان‌های کمتر از ۳۰۰ ثانیه تأثیر چندانی بر عیار نهایی نداشته اما بازیابی کاهش یافته است و در زمان‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه نیز تأثیر چندانی بر عیار نداشته اما بازیابی افزایش یافته است. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۱۷ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دانه‌بندی بار ورودی فلوتاسیون، میزان تأثیر تابش امواج ماکرو بر عیار و بازیابی مس کاهش می‌یابد. در واقع با کاهش دانه‌بندی میزان جذب امواج ماکرو افزایش می‌یابد زیرا با کاهش ابعاد ذرات، میزان سطح در معرض تابش و دانسیته مخلوط ذره-هوا افزایش می‌یابد.

ثابت دی الکتریک به مقدار جرم در تعامل با میدان‌های الکتریکی بستگی دارد و دانسیته بر خواص دی الکتریک نمونه‌های پودری موثر است. در نتیجه هر چه درصد حجم بخشی که دارای ثابت دی الکتریک بالاتری است (ذرات کالکوپیریت) نسبت به حجم کل افزایش یابد، ثابت دی الکتریک مخلوط افزایش می‌یابد.

در نرخ فلوتاسیون را می‌توان به تغییر در درجه آزادی ذرات و شیمی سطح آن‌ها نسبت داد. مطابق شکل ۱۵ در پیش عمل آوری امواج ماکرو پس از آسیابگری، ثابت نرخ فلوتاسیون هر دو کانسنگ افزایش یافته است اما این افزایش در کانسنگ مس پلنگی حدود ۰/۱ در دقیقه و در کانسنگ مس سرچشمه حدود ۰/۲ در دقیقه بوده است. در واقع اختلاف کانی‌های با ارزش و باطله از نظر میزان جذب امواج ماکرو در نمونه مس سرچشمه بیشتر از نمونه مس پلنگی است در نتیجه گرادیان گرمایی ایجاد شده در نمونه مس سرچشمه بیشتر از گرادیان گرمایی ایجاد شده در نمونه مس پلنگی است و باعث تأثیر بیشتر تابش امواج ماکرو بر نمونه مس سرچشمه شده است. شکل ۱۶، تأثیر امواج ماکرو پیش از آسیابگری بر ثابت نرخ فلوتاسیون دو نمونه مس سرچشمه و پلنگی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵) تأثیر امواج ماکرو پس از آسیابگری بر ثابت نرخ فلوتاسیون

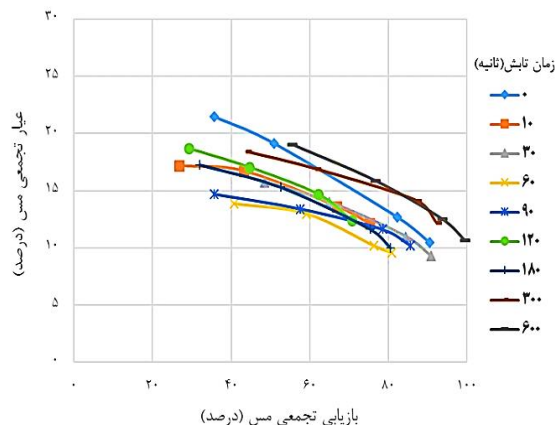


شکل (۱۶) تأثیر امواج ماکرو پیش از آسیابگری بر ثابت نرخ فلوتاسیون

پلنگی با افزایش زمان تابش امواج ماکرو تا ۱۲۰ ثانیه، به ترتیب به میزان ۰/۲ و ۰/۱ بر دقیقه، افزایش یافت. بررسی تأثیر دانه‌بندی نمونه بر پیش عمل آوری امواج ماکرو نشان داد که افزایش دانه‌بندی بار ورودی فلوتاسیون، باعث کاهش در تأثیر امواج ماکرو بر عیار و بازیابی می‌شود.

مراجع

- [۱] سید محمد جواد کلینی، مرتضی میرسرخ، (۱۳۹۲)، "تأثیر تابش ماکروویو بر خواص کاربردی کانی‌ها در فرآوری مواد معدنی"، نشریه توسعه معادن، شماره ۴۴.
- [۲] امید سلمانی نوری، اکبر مهدیلو، مهدی ایران نژاد، سالار علیزاده، (۱۳۹۲)، "بررسی تأثیر تابش ماکروویو در فلوتاسیون ایلمنیت در حضور گانگ‌های مختلف"، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین.
- [۳] کیانوش بارانی، (۱۳۸۹)، "بررسی تأثیر عمل آوری کانه آهن با ماکروویو بر فرآیند خردایش و خواص مغناطیسی آن"، رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس.
- [4] W.H. Sutton, M.H. Brooks and Chabinsky; (1988); "Microwave Processing of Materials". Pittsburgh, PA (USA); Materials Research Society.
- [5] G. Scott; (2006); "performance microwave pretreatment of low grade copper ore to enhance milling and liberation", Thesis for the degree of Master of Science in chemical engineering, university of Stellenbosch.
- [6] S. Kingman, N. Rowson; (1998); "Microwave treatment of minerals- a review", Minerals Engineering, 11, 1081-1087.
- [7] K. Haque; (1999); "Microwave energy for mineral treatment processes- a brief review", Int. J. Miner process, 57, 1-24.
- [8] S.W. Kingman, K. Jackson, S.M. Bradshaw, N.A. Rowson and R. Greenwood; (2004); "An Investigation into the Influence of Microwave Treatment on Mineral Ore Comminution", Powder technology, 146, 176-184.
- [9] S.W. Kingman, W. Vorster, (2000), "The effect of microwave radiation on the processing of Palabora copper ore", The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, May/June, 197-204.
- [10] N.M. Can, I. Bayraktar, (2007), "Effect of microwave treatment on the flotation and magnetic separation properties of pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerte", Minerals and Metallurgical processing, 24, 185-192.
- [11] W. Worster, N. Rowson, S. Kingman, (2001), "The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore", Int. J. Miner. Process, 63, 29-44.
- [12] A. Orumwense, T. Negeri, (2004), "Impact of microwave irradiation on the processing of a sulfide ore", Miner. Metall. Process, 21, 44-51.
- [13] C. Sahyoun, N. Rowson, S. Kingman, L. Groves, S. Bradshaw, (2005), "The influence of microwave pretreatment on copper flotation", The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- [14] E. Kaya, (2010), "Effect of Microwave Radiation on the Flotation of Copper Sulfide Ores", Asian Journal of Chemistry, 22, 7874-7882.
- [15] J. Kobushes, (2010), "Microwave enhanced processing of ores". PhD thesis, University of Nottingham, UK.



شکل (۱۷) تأثیر امواج ماکرو بر عیار و بازیابی تجمعی فلوتاسیون کانسنگ مس سرچشمه با ابعاد خوراک ۱۰۵ میکرون

با کاهش ابعاد ذرات، دانسیته ظاهری نمونه و درصد حجمی ذرات کانی افزایش می‌یابد که باعث افزایش ثابت دی‌الکتریک مخلوط و در نتیجه افزایش میزان جذب امواج ماکرو می‌شود. به همین دلیل افزایش عیار و بازیابی نمونه مس سرچشمه با ابعاد کوچکتر از ۷۵ میکرون در زمان تابش ۱۸۰ ثانیه رخ داده و در زمان‌های بالاتر، نمونه اکسید شده است. اما در نمونه با ابعاد ۱۰۵ میکرون، تأثیر تابش امواج ماکرو تا زمان ۳۰۰ ثانیه ناچیز بوده است و در زمان‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه نیز افزایش کمی در عیار و بازیابی مشاهده شده است. در نتیجه با افزایش دانه‌بندی، میزان جذب امواج ماکرو کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر تابش امواج ماکرو بر فلوتاسیون کانسنگ مس سرچشمه و مس پلنگی از نظر درجه آزادی و شیمی سطح ذرات بررسی شد. تابش امواج ماکرو باعث افزایش درجه آزادی ذرات می‌شود. انبساط حرارتی نابرابر کانی‌های با ارزش و باطله باعث ایجاد و گسترش میکروتکرک‌ها در مرز کانی‌ها و بهبود آزادشدگی ذرات می‌شود. همچنین تابش امواج ماکرو بر شیمی سطح نمونه نیز موثر است و باعث اکسیداسیون سطحی کانی‌های سولفیدی مس و کاهش قابلیت فلوتاسیون آن‌ها می‌شود. در نتیجه عیار و بازیابی نمونه کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که تابش امواج ماکرو پیش از آسیاب‌کنی، به دلیل ایجاد درزه و شکاف در مرز کانی‌ها و افزایش درجه آزادی، باعث بهبود کارآیی جدایش دو نمونه می‌شود اما تابش امواج ماکرو پس از آسیاب‌کنی، به دلیل اکسیداسیون سطحی کانی‌های سولفیدی مس، کارآیی جدایش را کاهش می‌دهد. همچنین ثابت نرخ فلوتاسیون دو نمونه مس سرچشمه و

- [27] S. Mustafa, A. Hamid, A. Naeem, (2004), "Xanthate adsorption studies on chalcopyrite ore", *Int. J. Miner. Process*, 74, 317–325.
- [28] A. Adamou, G. Manos, N. Messios, L. Georgiou, C. Xydas, C. Varotsis, (2016), "Probing the whole ore chalcopyrite–bacteria interactions and jarosite biosynthesis by Raman and FTIR microspectroscopies", *Bioresource Technology*, 214, 852–855.
- [29] Z. Nedjar, M. Bouhenguel and A. Djebaili, (2009), "Synthesis and Structural Characterization of Xanthate (KEX) in Sight of Their Utilization in the Processes of Sulphides Flotation", *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 8, 469-477.
- [30] G. Liua, Y. Huang, X. Qua, J. Xiaoa, X. Yanga, X. Zhenghe, (2016), "Understanding the hydrophobic mechanism of 3-hexyl-4-amino-1,2,4-triazole-5-thione to malachite by ToF-SIMS, XPS, FTIR, contactangle, zeta potential and micro-flotation", *Colloids and Surfaces, Physicochem. Eng. Aspects*, 503, 34-42.
- [31] Z. Nedjar, D. Barkat, (2013), "Electrochemistry of Copper Activation of Sphalerite and Potassium Isobutyl Xanthate (KIBX) Synthesized Collectors Adsorption", *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 10.
- [32] J. Lynn Bowden, (2015), "Voltammetric Investigation of Xanthate Chemisorption on a Chalcopyrite Surface", A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science in Metallurgical Engineering, Montana Tech of the University of Montana, USA.
- [33] Z. Nedjar, D. Barkat, (2015), "Studies of Activation of Galena by Copper and Xanthate (PIPX) Synthesized Collectors Adsorption", *Journal of Engineering Science and Technology*, 10, 932-940.
- [16] A. Batchelor, D. Jones, S. Plint, S.W. Kingman, 2015, "Deriving the ideal ore texture for microwave treatment of metalliferous ores", *Miner. Eng.*, 84, 116–129.
- [17] A. Batchelor, D. Jones, S. Plint, S.W. Kingman, (2016), "Increasing the grind size for effective liberation and flotation of a porphyry copper ore by microwave treatment", *Minerals Engineering*, 94, 61–75.
- [۱۸] بهناز میرشکاری، سید محمد جواد کلینی، بهزاد شهبازی، (۱۳۹۵)، "بررسی اثر تابش ماکروویو بر فلوتاسیون کالکوپیریت"، چهارمین کنگره بین‌المللی معدن و صنایع معدنی ایران به همراه ششمین کنفرانس مهندسی معدن ایران.
- [۱۹] بهناز میرشکاری، سید محمد جواد کلینی، بهزاد شهبازی، (۱۳۹۵)، "اثر تابش ماکروویو بر فلوتاسیون کالکوسیت"، سی و پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- [20] J. Coates, (2000), "Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach", John Wiley & Sons Ltd, Encyclopedia of Analytical Chemistry, 10815-10837.
- [21] J.G. Dunn, C. Muzenda, (2001), "Thermal oxidation of covellite", *Thermochimica Acta* 369, pp 117-123.
- [22] R.K. Rath, S. Subramanian and T. Pradeep, (2000), "Surface Chemical Studies on Pyrite in the Presence of Polysaccharide-Based Flotation Depressants", *Journal of Colloid and Interface Science*, 229, 82-91.
- [23] E.R. Mejia, J.D. Ospina, L. Osorno, M.A. Marquez and A.L. Morales, (2015), "Fourier Transform", Chapter 8: Signal Processing and Physical Sciences, Intec, 197-213.
- [24] Y. Zhang, Z.H. Cao, Y. Cao, C. Sun, (2013), "FTIR studies of xanthate adsorption on chalcopyrite, pentlandite and pyrite surfaces", *Journal of Molecular Structure*, 1048, 434-440.
- [25] Laajalehto K., Leppinen J., Kartio I., Laiho T., 1999, "XPS and FTIR study of the influence of electrode potential on activation of pyrite by copper or lead", *Colloids and Surfaces, Physicochemical and Engineering Aspects*, 154, 193–199.
- [26] Z. Wang, Y. Qian, X. Long-hua, B. Dai, X. Jun-hui, F. Kaibin, (2015), "Selective chalcopyrite flotation from pyrite with glycerine-xanthate as depressant", *Minerals Engineering*, 74, 86–90.

The Effect of Microwave Radiation on Flotation of Copper Sulfide Minerals

Behnaz Mirshekari, S.M. Javad Koleini*, Behzad Shahbazi

Department of Mineral Processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this research, the effect of microwave radiation on the surface chemistry and liberation degree of copper sulfide minerals (Sarcheshmeh and Palangi ores) was investigated. In flotation studies on the effect of microwave radiation on the surface chemistry, after 90 seconds radiation, the concentrate grade and recovery of the Sarcheshmeh samples increased 7 and 2 percent; respectively but the concentrate grade and recovery of the Palangi samples decreased 4 and 8 percent, respectively. Also, in flotation studies on the effect of microwave radiation on the liberation degree, after 180 seconds radiation, the concentrate grade and recovery of the Sarcheshmeh samples increased 4 and 6 percent respectively but for the Palangi samples, a same increase in the grade and recovery was obtained in 600 seconds of microwave radiation. Furthermore, flotation rate constant of the Sarcheshmeh and Palangi samples increased 0.2 and 0.1 per minute respectively, after 120 seconds microwave radiation.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: April 7, 2018

Received in revised form: January 12, 2019

Accepted: February 23, 2019

Key words:

Microwave
Flotation
Copper
Chalcocite
Chalcopyrite

* Corresponding author
koleini@modares.ac.ir

All right reserved.
