

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان
دانشکده فنی مهندسی
بخش مهندسی معدن

پایان نامه برای تکمیل دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن
گرایش فرآوری مواد معدنی

تأثیر درجه آزادی، نوع و بافت کانی‌های حاوی مس در عملیات شناورسازی کارخانه فرآوری مجتمع مس سرچشمه

تحقیق و نگارش

حمید رضا ایرانمنش

اساتید راهنما

دکتر صمد بنیسی

دکتر محمد رضا شایسته‌فر

مشاور صنعتی

مینو بهروز

تابستان ۱۳۸۱



دانشگاه شهید باهنر کرمان
دانشکده فنی



جمهوری اسلامی ایران

بسمه تعالی

شماره
تاریخ
پیوست

به نام خدا

این پایان نامه

به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد

به

بخش مهندسی معدن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان
تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مربوطه
شناخته نمی شود.

نام و نام خانوادگی:

دانشجو: حمید رضا ایرانمنش

استاد راهنما:

دکتر دکتر صمد بنیسی

دکتر محمد رضا شایسته فر

استاد مشاور صنعتی:

سرکار خانم بهروز

داور ۱: دکتر حسن حاج امین شیرازی

داور ۲: دکتر عباس سام

حق چاپ محفوظ و مخصوص مولف است.



تقدیم به پدر و مادرم که تمام وجودم از آنهاست

و

تقدیم به آنانی که برای سربلندی نام ایران و تمدن ایرانی کوشیدند

تقدیر و تشکر

پیشبرد یک تحقیق بدون کمک و همفکری دیگران امری بسیار مشکل می‌باشد. در انجام این تحقیق افراد بسیاری حتی خارج از وظایف خود همیاری نموده‌اند که نام بردن از آنها تنها گوشه‌ای از لطف و محبت آنها را جبران می‌کند.

اساتید راهنمای محترم، جناب آقای دکتر بنیسی و آقای دکتر شایسته فر که کمکهای فکری این عزیزان پیشبرد این تحقیق را امکان‌پذیر ساخت.

جناب آقایان دکتر سید حسن خوشرو و دکتر حجت ا... رنجبر، ریاست محترم بخش معدن، که شرایط انجام مطالعات میکروسکپی را در دانشگاه فراهم آوردند.

مشاور صنعتی محترم، سرکار خانم بهروز، که تلاش بسیاری نمودند تا شرایط مناسب برای اجرای پروژه فراهم گردد.

سرپرست واحد کنترل کیفی کارخانه پرعیار کنی مجتمع مس سرچشمه، جناب آقای مهندس ابراهیمی، که با حسن نیت کامل نسبت به تهیه نمونه‌های ماهیانه، اینجانب را یاری نموده‌اند.

ریاست محترم تحقیقات معدنی و فرآوری مواد، جناب آقای مهندس رضائیان و مدیر محترم امور مطالعات و تحقیقات، سرکار خانم مهندس پرتوآذر، که شرایط و امکانات شروع انجام پروژه، با مساعدت و همکاری آنها فراهم گردیده است.

مدیریت قبلی امور مطالعات و تحقیقات، جناب آقای مهندس نویری، که همیشه نسبت به تحقیق و تحقیقات نظر مساعد داشتند.

و افراد دیگری که همکاری آنها به نوعی در انجام این تحقیق مؤثر بوده است، همگی جزو کسانی هستند که اینجانب را مرهون لطف و عنایت خود قرار داده‌اند.

حمید رضا ایرانمنش

تابستان ۱۳۸۱

چکیده

بازیابی کانیهای با ارزش به چندین عامل بستگی دارد. همراه با کاهش ابعاد سنگ معدن، کانیهای با ارزش بصورت آزاد نمایان می‌شوند. در عمل آزادسازی کامل کانیها به ندرت حاصل می‌شود حتی اگر سنگ معدن به اندازه ابعاد دانه‌های کانی مد نظر خرد شود. بنابراین تعیین درجه‌آزادی کانیهای با ارزش سنگ معدن آسیا شده، برای مشخص کردن کارائی مرحله نرم‌کنی و عملکرد فرآیند جدایش در فرآوری مواد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

از آنجائیکه در فرآیندهای پرعیارسازی مواد، برخی از ذرات با ارزش به باطله راه پیدا می‌کنند، می‌توان فرار این نوع ذرات را به هر یک از عملیاتهای خردایش و جداسازی نسبت داد. درجه‌آزادی و توزیع نوع قفل شدگی ذرات با ارزش در خوراک و باطله فرآیندهای پرعیارکنی به عملکرد فرآیندها وابسته می‌باشد. در این ارتباط، عملکرد کارخانه پرعیارکنی مجتمع مس سرچشمه از بدترین تا بهترین وضعیت بازیابی عنصر مس سولفوری، در ۵ ماه کاری، در نظر گرفته شد.

در مطالعات میکروسکپی انجام شده، شکل قفل‌شدگی ذرات با ارزش با گانگ، به هشت نوع متفاوت دسته بندی شد و جهت کمینه کردن خطای اندازه‌گیری درجه‌آزادی به روش مطالعه میکروسکپی مقاطع صیقلی، نسبت وزنی $\frac{E}{11}$ ، نمونه سنگ معدن آسیا شده به پودر

قالب‌گیری برای تهیه قرص مقاطع صیقلی، مناسب تشخیص داده شد.

با توجه به داده‌های بدست آمده، درجه‌آزادی مناسب برای کانیهای با ارزش در خوراک ورودی سلولهای پرعیارکنی اولیه، $1/4 \pm 57/11\%$ مناسب تشخیص داده شد و مشخص گردید که با افزایش $2/2\%$ بازیابی، میزان ذرات با ارزش آزاد در باطله 15% کاهش می‌یابد که در ابعاد ذرات کوچکتر از 400 مش، با افزایش $2/2\%$ بازیابی، میزان ذرات با ارزش آزاد در باطله 28% کاهش می‌یابد خصوصاً برای کانی کالکوسیت که این کاهش به 72% می‌رسد. همچنین مشخص گردید که شکل قفل‌شدگی ذرات حاوی کانیهای مس، تأثیری در افزایش بازیابی ایجاد نکرده و روند فراوانی آنها در خوراک و باطله در محدوده‌های ابعادی مورد نظر، مشابه یکدیگر می‌باشد.

فهرست مطالب

صفحه

موضوع

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- آزادسازی بین دانه‌ای ۲
۲-۱- آزادسازی درون دانه‌ای ۳

فصل دوم: آزادشدگی با کاهش ابعاد ذرات

- ۱-۲- ذرات حاوی دو کانی با اندازه‌های یکسان ۷
۲-۲- ذرات حاوی دو کانی با اندازه‌های مختلف ۸
۳-۲- رفتار ذرات قفل شده ۱۱
۱-۳-۲- رفتار ذرات از جنبه میزان قفل شدگی ۱۱
۲-۳-۲- رفتار ذرات از جنبه شکل قفل شدگی ۱۲

فصل سوم: آنالیز آزادشدگی

- ۱-۳- محاسبه آزادشدگی با استفاده از عیارسنجی کنسانتره ۱۴
۲-۳- محاسبه درجه آزادی با مطالعه میکروسکوپی مقاطع صیقلی ۱۸
۱-۲-۳- آنالیز تصاویر چشمی توسط شمارش خطی دانه‌ها ۱۹
۲-۲-۳- آنالیز تصاویر چشمی توسط شمارش سطحی دانه‌ها ۱۹
۳-۲-۳- آنالیز تصاویر دیجیتالی سطوح ذرات برای محاسبه درجه آزادی ۲۰
۳-۳- آماده سازی نمونه جهت مطالعه میکروسکوپی ۲۲
۱-۳-۳- ریز نمونه برداری ۲۲
۲-۳-۳- دانه بندی ۲۲
۳-۳-۳- قالب گیری ذرات ۲۳
۴-۳-۳- صیقل دادن ۲۳
۴-۳- خطای بُعد سوم ۲۴
۱-۴-۳- تأثیر خطای بُعد سوم ۲۴
۲-۴-۳- تصحیح خطای بُعد سوم ۲۴

- ۳-۵- تصحیح داده‌های بدست آمده از مطالعات آزادشدگی دو بعدی ۲۵
- ۳-۵-۱- توسعه یک مدل ریاضی برای تصحیح اطلاعات دو بعدی ۲۵
- ۳-۵-۲- تعیین ماتریس مقطع‌گیری (S) ۲۶
- ۳-۵-۳- بازسازی ساختار ذرات با استفاده از داده‌های مقطع‌گیری ۲۹

فصل چهارم: روش تعیین درجه آزادی و درصد وزنی کانیه‌های حاوی مس

- ۴-۱- مقدمه ۳۳
- ۴-۲- روش تهیه قرص نمونه ۳۳
- ۴-۳- مطالعه میکروسکوپی ۳۵
- ۴-۴- محاسبه درصد وزنی کانیه‌های حاوی مس به روش شمارش خطی ۳۵
- ۴-۵- محاسبه درجه آزادی کانیه‌های حاوی مس ۳۷

فصل پنجم: روش کار و تحقیق

- ۵-۱- تعیین خطای اندازه‌گیری درجه آزادی و تهیه نمونه مناسب ۴۰
- ۵-۲- انواع قفل شدگی ۴۰
- ۵-۳- نوع نمونه ۴۴

فصل ششم: ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

- ۶-۱- تعیین خطای اندازه‌گیری درجه آزادی و معرفی نمونه مناسب ۴۵
- ۶-۲- آنالیز ابعادی نمونه‌های ماهیانه خوراک سلولهای پرعیارکنی اولیه و باطله نهایی ۴۹
- ۶-۳- رابطه بازیابی و مقدار ذرات آزاد در خوراک سلولهای پرعیارکنی اولیه و باطله نهایی ۴۹
- ۶-۴- رابطه درجه آزادی کانیه‌های با ارزش و ابعاد ذرات ۵۱
- ۶-۵- فرآوانی شکل قفل‌شدگی کانیه‌های با ارزش بر حسب بازیابی کانیه‌های سولفورس ۵۴
- ۶-۵-۱- توزیع فرآوانی اشکال قفل‌شدگی ذرات در ابعاد ۲۰۰+ مش ۵۵
- ۶-۵-۲- توزیع فرآوانی اشکال قفل‌شدگی در محدوده ابعاد ۲۰۰-۴۰۰+ مش ۵۷
- ۶-۵-۳- توزیع فرآوانی اشکال قفل‌شدگی ذرات در ابعاد ۴۰۰- مش ۵۸

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۶۱.....	۱-۷- نتیجه گیری
۶۲.....	۲-۷- پیشنهادها
۶۳.....	کتابنگاری

پیوست‌ها

۶۵.....	I پیوست
۶۹.....	II پیوست
۷۰.....	III پیوست
۷۲.....	IV پیوست
۷۴.....	V پیوست

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱- قفل شدگی کانی و باطله ۱
- شکل ۲-۱- نمودار فرآوانی داده‌های توزیع ابعاد ذرات ۳
- شکل ۳-۱- روی هم قرار دادن شبکه شکست و شبکه دانه‌ای جهت نشان دادن میزان آزادشدگی ۳
- شکل ۴-۱- مقطعی از ذرات کانسنگ ۴
- شکل ۵-۱- شمای عملیات ارائه شده برای دو مرحله جدایش ۵
- شکل ۱-۲- روی هم قرار گرفتن شبکه خردایش و یک شبکه دانه‌ای ۸
- شکل ۲-۲- روی هم قرار گرفتن سه بعدی شبکه‌های دانه‌ای و خردایش در منشور واحد ۸
- شکل ۳-۲- درصد آزادسازی دو فاز A و B ($B < A$)، تابعی از k ۱۰
- شکل ۴-۲- مقطع یک ذره قفل شده نوع اول ۱۲
- شکل ۵-۲- مقطع ذره قفل شده نوع دوم ۱۲
- شکل ۶-۲- مقطع ذره قفل شده نوع سوم ۱۳
- شکل ۷-۲- مقطع ذره قفل شده نوع چهارم. فروروی دانه‌های فاز با ارزش در باطله ۱۳
- شکل ۱-۳- تقسیم بندی یک ماده دو ترکیبی ۱۵
- شکل ۲-۳- نمودار تابع آزادشدگی برای کانی تنگستن ۱۷
- شکل ۳-۳- تأثیر پارامتر ϕ بر تابع آزادشدگی ۱۸
- شکل ۴-۳- نمونه تصویر چشمی از یک مقطع صیقلی جهت آنالیز درجه‌آزادی ۱۸
- شکل ۵-۳- اندازه‌گیری یک بعد از ذرات در زیر میکروسکپ ۱۹
- شکل ۶-۳- تصویر شاخص از مقاطع ذرات جهت آنالیز تصویری ۲۰
- شکل ۷-۳- تقسیم بندی سیگنال‌های دریافتی ناشی از تابش باریکه الکترونی ۲۱
- شکل ۸-۳- حساسیت شدت الکترون پیش متفرق شده نسبت به متوسط عدد اتمی ۲۱
- شکل ۹-۳- جدایش ذرات در واسطه قالب‌گیری ۲۳
- شکل ۱۰-۳- تأثیر خطای بُعد سوم ۲۴
- شکل ۱۱-۳- ساختار هندسی برای شبیه‌سازی یک ذره ۲۷
- شکل ۱۲-۳- مقاطع ذرات مشاهده شده بر اساس شمارش سطحی ۲۸

- شکل ۳-۱۳- مقاطع ذرات مشاهده شده بر اساس شمارش خطی از ذرات کروی ۲۹
- شکل ۴-۱- نمائی از مقطع دستگاه قالب‌گیری نمونه تحت فشار و حرارت ۳۴
- شکل ۵-۱- قفل‌شدگی نوع با ارزش ۴۱
- شکل ۵-۲- نمونه قفل‌شدگی نوع مرکزی ۴۱
- شکل ۵-۳- نمونه قفل‌شدگی نوع حاشیه‌ای ۴۲
- شکل ۵-۴- نمونه قفل‌شدگی نوع رگه‌ای و چندتایی ۴۲
- شکل ۵-۵- نمونه قفل‌شدگی نوع چندتایی ۴۲
- شکل ۵-۶- نمونه قفل‌شدگی نوع پراکنده درشت دانه ۴۲
- شکل ۵-۷- نمونه قفل‌شدگی نوع پراکنده ریز دانه ۴۳
- شکل ۵-۸- نمونه قفل‌شدگی نوع ساده درشت دانه ۴۳
- شکل ۵-۹- نمونه قفل‌شدگی نوع ساده ریز دانه ۴۳
- شکل ۵-۱۰- مدار فلوتاسیون کارخانه پرعیارکنی صنعتی مجتمع مس سرچشمه ۴۴
- شکل ۶-۱- نمودار انحراف معیار کلی محاسبه شده از مجموع ۱۰ نمونه ۴۵
- شکل ۶-۲- نمودار انحراف معیار پنج نسبت وزنی مورد آزمایش ۴۶
- شکل ۶-۳- نمودار درجه آزادی برحسب تعداد مقاطع مورد مشاهده ۴۷
- شکل ۶-۴- نمودار انحراف معیار درجه آزادی از کل مقاطع ذرات نمونه‌های شمارش شده ۴۸
- شکل ۶-۵- انحراف معیار درجه آزادی پس از شمارش حداقل مقاطع ذرات ۴۸
- شکل ۶-۶- درجه آزادی کل کانیهای حاوی مس در دو سطح بازیابی ۵۰
- شکل ۶-۷- درجه آزادی کانی کالکوسیت در دو سطح بازیابی ۵۱
- شکل ۶-۸- درجه آزادی کانی کالکوپیریت در دو سطح بازیابی ۵۱
- شکل ۶-۹- درجه آزادی کل کانیهای با ارزش در خوراک بر حسب ابعاد ذرات ۵۲
- شکل ۶-۱۰- درجه آزادی کل کانیهای با ارزش در باطله بر حسب ابعاد ذرات ۵۲
- شکل ۶-۱۱- درجه آزادی کانی کالکوسیت در خوراک بر حسب ابعاد ذرات ۵۲
- شکل ۶-۱۲- درجه آزادی کانی کالکوسیت در باطله بر حسب ابعاد ذرات ۵۳
- شکل ۶-۱۳- توزیع فرآوانی انواع قفل‌شدگی ذرات حاوی کانیهای با ارزش در خوراک ۵۴
- شکل ۶-۱۴- توزیع فرآوانی انواع قفل‌شدگی ذرات حاوی کانیهای با ارزش در باطله ۵۵

شکل ۶-۱۵- توزیع فراوانی انواع قفل شدگی ذرات ۲۰۰+ مش حاوی کانیه‌های با ارزش	در باطله.....	۵۶
شکل ۶-۱۶- توزیع فراوانی انواع قفل شدگی ذرات ۲۰۰+ مش حاوی کانیه‌های با ارزش	در خوراک.....	۵۶
شکل ۶-۱۷- توزیع فراوانی انواع قفل شدگی ذرات ۲۰۰-۴۰۰+ مش حاوی کانیه‌های با ارزش	در باطله.....	۵۷
شکل ۶-۱۸- توزیع فراوانی انواع قفل شدگی ذرات ۲۰۰-۴۰۰+ مش حاوی کانیه‌های با ارزش	در خوراک.....	۵۷
شکل ۶-۱۹- توزیع فراوانی انواع قفل شدگی ذرات ۴۰۰- مش حاوی کانیه‌های با ارزش	در باطله.....	۵۸
شکل ۶-۲۰- توزیع فراوانی انواع قفل شدگی ذرات ۴۰۰- مش حاوی کانیه‌های با ارزش	در خوراک.....	۵۹
شکل ۶-۲۱- مقایسه توزیع انواع قفل شدگی در باطله بر حسب ابعاد ذرات در سطح	بازیابی بالا.....	۵۹
شکل ۶-۲۲- مقایسه توزیع انواع قفل شدگی در باطله بر حسب ابعاد ذرات در سطح	بازیابی پایین.....	۶۰

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

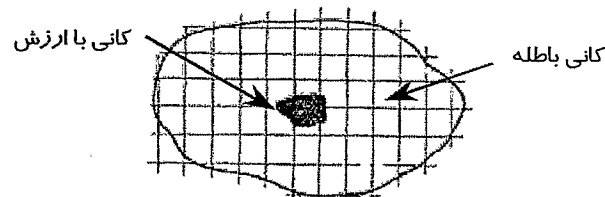
۱۰	جدول ۱-۲- رابطه f و k اندازه دانه به اندازه ذره بزاء فرآوانی نسبی دو فاز ($A>B$)
۱۷	جدول ۱-۳- کانی تنگستن
	جدول ۲-۳- ماتریس مقطع گیری ذرات کروی با فصل مشترک صفحه‌ای توسط شبیه‌سازی کامپیوتری
۲۸	جدول ۳-۳- فرآوانی مقاطع ذرات مشاهده شده و نتایج رابطه عیار/بازیابی
۳۰	جدول ۳-۴- محاسبه ترکیب ذره واقعی از داده‌های مقطع گیری
۳۰	جدول ۳-۵- محاسبه مجدد ساختار ذرات و در نتیجه رابطه عیار/بازیابی تصحیح شده
۳۱	جدول ۳-۶- محاسبه مجدد ترکیب ذره واقعی با استفاده از تخمین سریع
۳۲	جدول ۱-۴- کانیهای مد نظر برای محاسبه درجه آزادی در واحد مینرالوژی مجتمع مس سرچشمه
۳۵	جدول ۲-۴- روش محاسبه درصد وزنی کانی‌های حاوی مس
۳۷	جدول ۱-۵- بازیابی عنصر مس در پنج ماه مورد نظر
۳۹	جدول ۱-۶- نتایج آنالیز سرنندی تر خوراک سلولهای پرعیارکنی اولیه و باطله نهایی
۴۹	

فصل اول

مقدمه

بازیابی اقتصادی کانیهای با ارزش به چندین عامل عامل بستگی دارد. در خردایش مهمترین عامل، قابلیت خردایش است که خود شامل عملیات سنگ شکنی و نرم کنی می شود. یکی از اهداف این فرآیندها، آزادسازی^۱ یا رهاسازی کانیهای با ارزش از کانیهای باطله در بزرگترین ابعاد ذره ممکن می باشد [۱]. همراه با کاهش ابعاد سنگ معدن، کانیهای با ارزش جدا می شوند که به ذرات آزاد یا آزاد شده معروف می باشند. به کلیه این مراحل، فرآیند آزادسازی گفته می شود.

در عمل، آزادسازی کامل کانیهای با ارزش به ندرت حاصل می شود، حتی اگر سنگ معدن به اندازه ابعاد دانههای کانی مد نظر خرد شود [۲] (شکل ۱-۱). شکل ۱-۱ تکه ای از سنگ معدن را نشان می دهد که به تعدادی از مکعبهایی با حجم و اندازه ای برابر با دانههای کانی مشاهده شده، خرد شده است [۱].



شکل ۱-۱- قفل شدگی کانی با ارزش و گانگ [۱]

- 1- Liberation
- 2- Release

ذراتی که شامل هر دوی کانیهای با ارزش و باطله باشند بعنوان ذرات میانی^۳ یا قفل شده^۴ شناخته می شوند و بیشتر مشکلات جدایش کانی با ارزش، به رفتار این نوع ذرات در فرآیند جدایش مربوط می شود [۳].

درجه آزادی^۵ به درصدی از کانی مد نظر که بصورت ذرات آزاد ظاهر شده است، اطلاق می گردد. در صورت وجود پیوندهای ضعیف بین دانه‌های کانی با ارزش و دانه‌های باطله، درجه آزادی بالا می تواند حاصل شود. در تحقیقات اخیر، جهت افزایش درجه آزادی کانیها، وارد کردن نیرو در مرز مشترک بین دانه‌های کانی با ارزش و گانگ مورد بررسی قرار گرفته است [۳، ۱].

با توجه به مفهوم شکست، دو نوع آزادسازی می تواند وجود داشته باشد. اول، زمانی که فصل مشترک بین دانه‌ها ضعیف است و شکست بین دانه‌های روی می دهد. دوم، زمانی است که شکستگی درون دانه‌های^۶ یا خارج از فصل مشترک اتفاق می افتد. این نوع شکست رایج ترین نوع شکست است [۳].

۱-۱- آزادسازی بین دانه‌ای

در این نوع شکست گسستن پیوندهای بین دانه‌های بیشتر از شکستگی در خود دانه‌ها می باشد. بنابراین آزادسازی تقریباً در اندازه ابعاد دانه‌های کانی مد نظر رخ می دهد؛ اما بخاطر اینکه کانیهای با ارزش محدوده‌ای از ابعاد ذرات را دارا می باشند، کاهش ابعاد باید تا ابعاد کوچکتر از متوسط ابعاد دانه‌های با ارزش ادامه پیدا کند [۳].

اگر در نمودار توزیع فرآوانی ابعاد دانه‌های آنالیز سرندی محصول خرد شده‌ای دو قله نمایان شود، می توان به وجود این نوع شکست پی برد (شکل ۱-۲). یکی از این مقادیر بیشینه (قله) تمایل شکست در پیوندهای بین دانه‌ای را نشان می دهند. شکست تماماً بین دانه‌ای،

3- Middling
4- Locked
5- Degree of liberation
6- Intergranular
7- Transgranular