

هیدرومتالورژی

اصول و کاربردها

و ماسر ها و ایک

مترجم:

دکتر علی اکبر رحمانی

عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

سرشناسه : هاولیک، توماس Havlik, Tomas

عنوان و نام پدیدآور : هیدرومتالورژی : اصول و کاربردها/ توماس هاولیک؛ مترجم علی اکبر رحمانی.

مشخصات نشر : تهران: آفتاب اندیشه، ۱۳۹۱.

موضوعات ظاهری : ۲۷صص.؛ مصور، جدول، نمودار.

شابک : ۱۸۵۰۰۰ریال 978-964-7541-54-1

سببیت فهرست نویسی : فیبا

یادداشت : عنوان اصلی : Hydrometallurgy : principles and applications, 2008.

یادداشت : موضوع : هیدرومتالورژی آبی

شناسه افزوده : رحمانی، علی اکبر، -، مترجم

رده بندی کنگره : ۱۳۹۱/۸۸۸ TN /۵۲۳ رده بندی دیویی : ۶۶۹/۲۸۳ شماره کتابشناسی ملی : ۲۷۴۹۶۲۴

عنوان : هیدرومتالورژی : اصول و کاربردها

مترجم : علی اکبر رحمانی

ویراستار : شهره کریمی

طراح جلد : مهندس کمیل رحمانی

ناشر : آفتاب اندیشه

چاپ اول : ۱۳۹۱/چاپ سعیدی - قم

تیراژ : ۱۰۰۰ نسخه

قیمت : ۱۸۵۰۰۰ریال

شابک : 978-964-7541-54-1

بسم رب الشهداء والصدّیقین

تقدیم به:

تمام دانش آموزان شهید و به ویژه:

شهید سهام خیام

شهید زهرا کرکمن

شهید خدیجه باری

شهید حسین شهید

شهید محمود ناظری

شهید مرحمت بالا زاده

شهید محمد تکبیری

شهید عبدالمهدی پیرحیاتی

شهید عبدالرحیم بزرگی مقدم

شهید رحمان پایدار

شهید لطیف پناهی کله جویی

شهید لطیف برزگار

شهید سید لقمان باز یار

شهید بهنام محمدی

شهید مهدی بازیگر

شهید محمد بهروزه

شهید سیامک میلانی

شهید پرویز بابیری

شهید علی اصغر بزرگانی

شهید علی اصغر بسطامی

شهید رضا عباس بهمنی

شهید صالح الدین بختیاری

شهید عباس امیری

شهید صیدنور اکبری

شهید مسلم احمدی

دیگر آثار مترجم:

- ۱- کانه آرای (دو جلدی)، ترجمه، انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، ۱۳۸۳.
- ۲- واژگان فنی، تألیف، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران ۱۳۸۳.
- ۳- یزشک قلب خود باشیم، انتشارات سایه گستر، ۱۳۸۳.
- ۴- هیدروسیکلون‌ها، ترجمه، انتشارات سایه گستر، ۱۳۸۴.
- ۵- شناسازی کفی (فلوتاسیون)، ترجمه، انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، ۱۳۸۴.
- ۶- فزون‌ها، ترجمه، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- ۷- واژگان حفاری و آتشیاری، تألیف، انتشارات جهاد دانشگاهی امیر کبیر، ۱۳۸۵.
- ۸- فروشویی (معدن‌کاری انحلالی)، ترجمه، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۸.
- ۹- فرهنگ واژگان نفت و گاز (جلدی)، تألیف، انتشارات آبنوس، ۱۳۸۸.
- ۱۰- زمین‌شیمی و زمین‌شناسی نفت، ترجمه، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۸۸.
- ۱۱- فیزیک سنگ، ترجمه، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۸۹.
- ۱۲- فرهنگ واژگان مهندسی شیمی (جلدی)، تألیف، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۸۹.
- ۱۳- پرتوشیمی، ترجمه،
- ۱۴- نانوشیمی، ترجمه،
- ۱۵- مدارهای خردایش کانی‌ها (عملیات و بهینه‌سازی)، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۹۱.
- ۱۶- الکتروشیمی شناورسازی کانی‌های سولفیدی، ترجمه،
- ۱۷- نانولوله‌های کربنی و نانوسیم‌ها،
- ۱۸- فرمول‌ها و محاسبات برای عملیات حفاری، ترجمه، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۹۱.
- ۱۹- مواد معدنی: منافع و مضرات بر بدن انسان، گردآوری،
- ۲۰- زمین‌آمار و زمین‌شناسی نفت، ترجمه، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۹۱.
- ۲۱- سنگها و کانی‌های صنعتی، تألیف، در دست اقدام
- ۲۲- فرهنگ انگلیسی-فارسی اصطلاحات و عبارات مرکب، در دست اقدام
- ۲۳- فرهنگ واژگان نانوذرات، در دست اقدام

عموماً متالورژی استخراجی دستورالعمل‌هایی است که برای فرایندکردن کانی‌های حاوی عناصر فلزی به فلزهای با خلوص موردنظر جهت کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های زیادی، برای این هدف توسعه یافته‌اند و به همین علت تعیین روش بهینه‌ی استخراج فلزات، مشکل می‌باشد. راهنمای مناسب ممکن است مفهوم در اولین جمله باشد، یعنی، خلوص فلزات تولیدشده، اغلب به دستورالعمل‌های مورد استفاده برای فرایندکردن مواد خام اولیه و ثانویه بستگی دارد. بعضی از فرایندها فقط برای تولید فلزات نسبتاً آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرند در حالی که روش‌های دیگر برای تولید فلزات با خلوص تقریبی ۱۰۰٪ کاملاً مناسب می‌باشد.

هر فرایند برای تولید فلزات با محدوده‌ی وسیعی از خلوص، به کار می‌رود. برای درک این که چگونه فرایند خصوصی به استخراج فلزات با ترکیب موردنظر منتهی می‌شود، ضروری است که اصول کنترل کیفیت، سرعت و راندمان واکنش‌های شیمیایی را که در فرایند به وقوع می‌پیوندند، مورد توجه قرار گیرند. روش‌های نامیک حالت نهایی، یعنی تعادل، این واکنش‌ها را تعریف می‌کند و برای مطالعه‌ی این فرایند حالت نهایی با تغییر شرایط معین از قبیل دما، فشار و ترکیب اجزاء گازی، مایع و جامد در سامانه‌ی موردنظر تغییر می‌کنند، به کار می‌رود. از طرف دیگر سینتیک، سرعتی را که در آن تعادل برقرار می‌شود، تعریف می‌کند که زمان لازم واکنش را برای تشخیص و تکمیل این واکنش‌های شیمیایی اساسی را نیز نشان می‌دهد. هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تولید، عامل بسیار مهمی هستند و انتخاب فرایند بهینه را تعیین می‌کنند. فلزات در بازار آزاد به فروش می‌رسند و بنابراین از نقطه‌نظر تجاری تعیین روش بخصوص تولید فلزات با ترکیب معین، با توجه به قیمت هر یک از فرایند تولید ویژه، غیرممکن می‌باشد. علاوه بر این، قیمت‌ها به وسیله‌ی جنبه‌های دیگر، نظیر هزینه‌ی حفاظت از محیط‌زیست، فرایندکردن و بازاریابی محصولات ثانویه، بازگردانی و بازیافت کنترل می‌شوند. این عوامل به طور دینامیکی توسعه پیدا می‌کنند و در بسیاری از حالات پس از سرمایه‌گذاری در کل قیمت فلز، حتی برای آینده‌ی نزدیک، مشکل می‌باشد. در هر حالت، فقط اصول نظری به خوبی هدایت‌شده و کاربردهای اکثر دستاوردهای پیشرفته‌ی علوم جهت فرایندکردن محصولات فلزات و همچنین تمام عملیات دیگر و سازوکارهای این فرایندها به تولید مفید منجر می‌شوند که این امر باعث می‌گردد تولیدکننده در بازار موفق باشد. بنابراین، توجه خاص به پژوهش برای روش‌های جدید و غیرمعمول تولید و فرایندکردن فلزات، یا ترکیبی از این فلزات،

معطوف می‌گردد. روش جایگزین فرایندهای پیرومتالورژیکی، استخراج هیدرومتالورژیکی فلزات غیرآهنی می‌باشد. بعضی از فلزات از قبیل اورانیم، روی، طلا یا اکسید آلومینیم و غیره به طور کامل یا عمدتاً به وسیله‌ی روش هیدرومتالورژیکی استخراج می‌شوند درحالی‌که در روش‌های دیگر، کاربرد آن به دلایل واقعی مشکل‌تر می‌باشد. این مطلب در مورد مس، یکی از مهم‌ترین فلزات غیرآهنی، صحت دارد. بنابراین، کتاب عمدتاً به روش هیدرومتالورژیکی، جهت به‌دست‌آوردن مس از کانی‌های سولفیدی مخصوصاً به یکی از مهم‌ترین مراحل شستشوی آن، می‌پردازد.

فصل‌های جداگانه، مشکلات شستشوی کانی‌های سولفیدی مس را به روش منطقی مورد ارزیابی قرار می‌دهند. پس از معرفی اولیه، فصل‌های بعدی کانی‌های سولفیدی جالب را که در فرایند شستشو به عنوان ماده‌ی خام، محصولات نیمه‌آماده‌شده یا محصول شستشو موجود می‌کنند، بررسی خواهند کرد. این موضوع با توضیح ترمودینامیک شستشوی سولفیدهای مس از جمله نظریه‌ی هم‌چنین با توجه به کاربرد عملی، با استفاده از نمودارهای پتانسیل - pH، ادامه می‌یابد.

آنگاه توجه به سلیک‌ها می‌شود، باز از نقطه‌نظر کلی و با توجه به کاربردهای ویژه در شستشوی سولفیدی معطوف می‌گردد.

کاربردها و وضعیت فعلی مشکل شستشوی سولفیدهای مس، در بخش‌های بعدی کتاب مدنظر قرار گرفته‌اند. رفتار سوگرد فرایند شستشو، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده‌ی فرایند، به طور خاصی مورد توجه قرار گرفته است. بخش‌های نهایی، روش‌های فنی جالبی را توضیح می‌دهند که در طرح‌های نیمه‌صنعتی و در مقیاس تولید، مورد استفاده قرار گرفته و چشم‌اندازها برای آینده نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند.

کتاب بر آثار چاپی بنیادی و مستندات تکیه می‌کند. اگرچه اطلاعات پایه‌ی شیمی معدنی و فیزیکی، اساسی است ولی همراه با معلومات نظریه‌ی فرایندهای متالورژیکی، کتاب نظریه‌های عمده را تا حدی که بتواند به عنوان کتاب درسی برای دانشجویان تمام مراحل متالورژی و علوم مربوطه مورد استفاده قرار گیرد، پوشش می‌دهد.

این کتاب نه تنها برای دانشجویان بلکه برای محدوده‌ی وسیعی از متخصصانی که در هیدرومتالورژی فلزات غیرآهنی کار می‌کنند نیز مفید خواهد بود، و ضروری طراحی شده که نتیجه‌گیری‌های کلی ممکن است در خصوص فرایندهای مشابه در متالورژی شیمی کاربردی نیز قابل استفاده باشند. اگر چنین امری به وقوع پیوندد، مایه‌ی خوشحالی مؤلف خواهد بود.

توماس هاولیک

هیدرومتالورژی از دو کلمه‌ی هیدرو (hydro) به معنی آب و متالورژی (metallurgy) به معنی فلزگری تشکیل شده است. هیدرومتالورژی استخراج فلزات از کانه‌ها، کنسانتره‌ها و انواع مختلفی از محصولات باطله با استفاده از محلول‌های آبی حاوی مواد شیمیایی می‌باشد.

اولین بار در سال ۱۷۶۳ لومونوسو (M. V. Lomonosov)، یکی از پژوهشگران روسی، امکان استفاده از فرایند هیدرومتالورژیکی برای استخراج فلزات از کانه‌ها را مورد توجه قرار داد. باگراشن (P. R. Bagration) پژوهشگر روسی دیگر، در سال ۱۸۴۳ نظریه‌ی استخراج طلا به وسیله‌ی سولفوریک اسید و انور را به صورت فرمول ارائه نمود. در شروع قرن ۲۰، از نظر صنعتی هیدرومتالورژی یکی از مهم‌ترین روش‌های فلز، تهیه‌ی محلول‌ها، ترسیب فلزات و فرایند مجدد (عملیات) بسیار از فلزات دیگر توسعه یافتند.

هیدرومتالورژی شامل تعدادی عملیات اصلی فنی می‌شود که در توالی‌های ثابتی صورت می‌گیرند و موارد زیر را شامل می‌گردند: فرایند مکانیکی کانه، دگرسانی ترکیب شیمیایی کانه، شستشو، جداسازی محلول روی فلز، تهیه‌ی محلول‌ها، ترسیب فلزات و فرایند مجدد (عملیات ثانویه).

فرایند مکانیکی کانه، شامل خردایش آن به منظور نمایان ساختن کامل یا جزئی دانه‌های کانی‌های حاوی فلزی که باید استخراج شوند می‌باشد. دگرسانی ترکیب شیمیایی کانه یا کنسانتره جهت آماده‌سازی آن برای شستشو شامل کلرزنی، اکسایش و سولفاتی کردن می‌باشد یا جهت تشویه و کلوخه‌سازی به وسیله‌ی احیا به کار می‌رود. هدف، شکستن ترکیبات شیمیایی فلزی که باید استخراج شود و تبدیل آن‌ها به شکل قابل حمل می‌باشد. منظور از شستشو (یا فروشویی)، تبدیل فلزی که باید استخراج شود، به محلول آبی می‌باشد. این عملیات گاهی همراه با فرایند خردایش تر (در آسیاها و کلاسیک‌ها) یا در دستگاه مخصوصی (ظروف شستشو یا اوتوکلاوها) صورت می‌گیرد. جداسازی محلول حاوی فلز از ماده‌ی خردشده، با جداسازی به وسیله‌ی آب و شستشو در تیکرها به وسیله‌ی مایع حاصل می‌شود. محلول‌هایی که برای جداکردن ترکیبات یا فلزات، مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر اثر جداکردن ذرات معلق (صاف‌سازی) یا به وسیله‌ی ترسیب شیمیایی فلزات و مخلوط‌های عملیات تهیه می‌شوند. فلزات یا ترکیبات آنها از محلول‌ها با برقکافت (مس، روی و فلزات دیگر) توسط سمانتاسیون، که احیا به وسیله‌ی فلزات الکترونگاتیوتر (نظیر مس، نقره یا طلا) می‌باشد، به وسیله‌ی جذب، با استفاده از رزین‌های تعویض یونی یا کربن و با استخراج توسط مایع ترکیبات

فلزی با به کارگیری حلال‌های آلی، که با استخراج مجدد بعدی به درون محلول آبکی و ته‌نشین‌سازی فلز خالص از آن یا ترکیب شیمیایی‌اش دنبال شده، ته‌نشین می‌شوند. فرایند مجدد ماده‌ی ته‌نشین شده، که برای خالص‌سازی ترکیب مجزاً یا فلز خام جهت به‌دست آوردن مستقیم فلزی که از نظر تجاری مناسب می‌باشد، ممکن است به روش‌های زیر صورت گیرد: تبلور مجدد، تبخیر، تشویه، ذوب و برقکافت محیط آبکی یا مذاب.

در اندرکنش شیمیایی فلز با حلال، اتم خنثای فلز به صورت یونی درمی‌آید و ترکیب حل شده را تشکیل می‌دهد. فرایند انحلالی از این قبیل در حین شستشوی کانه‌ها یا کنسانتره‌هایی که در آن‌ها فلز به صورت اکسیدی (یونی) موجود می‌باشد، پیشرفت می‌کند. مثال‌ها شامل کانه‌های مس اکسیدی و اورانیم، کنسانتره‌های روی تشویه شده و محصولات تشویه کلردهی می‌باشند. در حالات معینی، استخراج فلز به وسیله‌ی یک حلال، اکسایش اولیه یا عملیات به وسیله‌ی اکسیدکننده‌های دیگر (برای مثال، در شستشوی کانه‌ها به وسیله‌ی کربنات سدیم یا نای اورانیم ۴ ظرفیتی، به منظور احیاء آخری به ۶ ظرفیتی را شامل می‌نماید. در انحلال حرارت (آبی یا احیاء شده) و تبدیل آنها به یون‌ها، اکسیدی کردن ضروری می‌باشد. اکسایش یک مرحله‌ی همراه با یونش همزمان عامل اکسیدکننده (برای مثال، اکسیژن مولکولی حل شده در آب) به خورد فلز تحریک‌تر، فقط با افت انرژی، که برای مثال ممکن است در حین تشکیل یون کمپلکس (فرایند سینتوری طلا و نقره، شستشوی آمونیاکی مس و نیکل فلزی) به دست‌آید، ممکن می‌باشد.

انحلال کانی‌ها با انواع مختلف از یوندها، شیمیایی در شبکه‌های بلوری (کووالانسی، فلزی، یونی) ویژه‌ی شستشوی سولفیدها، اکسیدها و تلوریدها می‌باشد. انحلال این کانی‌ها، اگر تشویه‌ی اکسندگی اولیه اجرا نشود، در اکثر موارد به اکسیدکردن در پالپ، برای مثال، در شستشوی آمونیاکی کانه‌های سولفید مس - نیکل در یک وتوکلاو تحت فشار اکسیژن یا هوا احتیاج دارد. انتقال حلال و حذف محصولات واکنش در محلول به وسیله‌ی همرفت (نفوذ مغشوش) رخ می‌دهد در حالی که در لایه‌ی نزدیک به کانی، آن به وسیله‌ی نفوذ مولکولی (حرارت) صورت می‌گیرد. معمولاً، واکنش که در حین استخراج به درون متالورژیکی به وقوع می‌پیوندد در ناحیه‌ی نفوذ رخ می‌دهد؛ عامل تعیین‌کننده، سرعت همرفت می‌باشد. این عامل، مسیر واکنش را محدود می‌کند. افزایشی در سرعت انحلال کانی، تحت یک سطح نسبی آن بزرگ می‌شود (یعنی، درجه‌ی خردایش) و هم‌چنین وقتی که فرایند آمیزش تدریجی می‌گردد و دما افزایش می‌یابد رخ می‌دهد.

شکل سطح و اندازه‌ی ذره‌ی کانی حل شده، وابستگی عاملی کمیّت فلز حل شده در تماس آن با محلول را تعیین می‌کند. بنابراین، آنها درجه‌ی خردایش و ظرفیت دستگاه مورد استفاده برای شستشو را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

آب‌گیری و شستشو در تیکتورها (از نوع پارویی با مکانیزم‌های رانش مرکزی یا محیطی و همچنین انواع چندمرحله‌ای) و در صافی‌ها (صافی‌های خلا و صافی‌های فشاری که به طور پیوسته یا چرخه‌های دوره‌ای عملیات می‌کنند)، عملی می‌شود. رسوب از محلول‌ها در دستگاه با طراحی‌هایی که به عامل رسوب‌دهنده‌ی مورد استفاده بستگی دارد، صورت می‌گیرد. واکنشگرها و صافی‌ها برای عوامل رسوب‌دهنده‌ی شیمیایی (قابل حل)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. عوامل رسوب‌دهنده‌ی پودری شکل (روی، گرد آلومینیم) به درون مخازن همزن‌دار حلالی محلول، وارد می‌شوند؛ آنگاه رسوب ممکن است در درون پمپ پیستونی، در سرتاسر خط لوله‌ی اصلی و از طریق لایه‌ای از عامل رسوب‌دهنده در یک صافی ادامه پیدا کند.

یک فلز یا ترکیبات آن می‌تواند در خود پالپ (برای مثال، به وسیله‌ی فروبردن سبدهای شبکه‌ای یا تبادل گرهای یونی به درون گلاب) رسوب داده شود. عوامل رسوب‌دهنده‌ی نوع پیری، پس از تماس با محلول، به وسیله‌ی شناورسازی می‌توانند جدا شوند. ته‌نشینی به وسیله‌ی عوامل رسوب‌دهنده به شکل کلوخه‌ای (آهن برای تراشه‌های مس و روی یا کربن برای طلا) در طشت‌ها یا ظروف مجهز به تقسیم‌کننده برای حرکت زیگزاگی محلول در بالا و پایین از طریق لایه‌ی عامل رسوب‌دهنده صورت می‌گیرد. امکان جداکردن آلیاژها (برای مثال، آلیاژهای آهن) به وسیله‌ی آبکافت از محلول تصفیه‌شده با به‌دست آوردن بعدی فلز اصلی (برای مثال، روی) توسط رسوب‌دهی بر روی یک کاند، با استفاده از برقکافت با آندهای غیرقابل حل وجود دارد.

کتاب حاضر، جنبه‌های مختلف شستشوی کانی‌های سولفیدی را به طور مناسبی پوشش داده است که خواننده خود به جست‌وجوی انواع پی خواهد برد. به علاقمندانی که تمایل دارند هیدرومتالورژی را به طور عمیق مورد بررسی قرار دهند توصیه می‌گردد قبل از پرداختن به موضوع، کتاب معدنکاری انحلالی (فروشوی رجا) آقای رابرت دبلیو بارتلت (Robert W. Bartlett, ۱۹۹۸) را که توسط اینجانب به فارسی ترجمه شده است (ناشر: مرکز دانشگاهی) مورد مطالعه قرار دهند. بدون شک این دو، مجموعه‌ی فنی‌ی غراهند بود که در اختیار خوانندگان محترم قرار دارند.

از تمام کسانی که در به ثمر رسیدن این کتاب مرا یاری نمودند، به ویژه همسر عزیزم که ویراستاری ادبی را عهده‌دار شدند، سرکار خانم حمیده پیردهقان، آقای بهرادر جیبی و سرکار خانم سودابه احمدی که کار صفحه‌آرایی را متقبل گردیدند کمال تشکر را دارم.

الحمد لله رب العالمین

خرداد ۱۳۹۰

مقدمه‌ی مؤلف

مقدمه‌ی مترجم

فصل اول: وضعیت فعلی تولید مس	۱
۱-۱. هیدرومتالورژی مس	۱۰
فصل دوم: کانه‌ها	۱۷
فصل سوم: تعادل فازي سولفیدهای مس و آهن	۲۹
۳-۱. سامانه‌های تک‌جزئی	۲۹
۳-۱-۱. گوگرد	۲۹
۳-۱-۳. سیستم‌ات دگروار گوگرد جامد	۳۴
۳-۲. سامانه‌های چندجزئی	۳۸
۳-۲-۳. سامانه‌های تعادل فازي مس - گوگرد	۳۸
۳-۲-۳. سامانه‌های تعادل فازي آهن - گوگرد	۴۳
۳-۲-۳. سامانه‌های تعادل فازي مس - آهن - گوگرد	۴۷
فصل چهارم: تعادل در محلول مس بکی	۵۷
۴-۱. فعالیت‌های یونی	۶۲
۴-۱-۱. نظریه‌ی دیبای - هاکل	۶۲
۴-۱-۱-۱. توسعه به محلول‌های غلیظ	۶۶
۴-۱-۱-۲. توسعه به الکترولیت‌های آمیخته	۶۸
۴-۱-۲. روش پیتزر	۶۸
۴-۱-۲-۱. محاسبه‌ی ϕ برای نمک‌ها در الکترولیت‌های آمیخته	۷۱
۴-۱-۲-۲. محاسبه‌ی γ برای نمک‌ها در الکترولیت‌های آمیخته	۷۳
۴-۱-۲-۳. محاسبه‌ی γ برای یون‌های تکی	۷۴
۴-۱-۲-۴. مطالعات درباره‌ی سامانه‌های کمپلکس	۷۴
۴-۲. تشکیل کمپلکس‌های فلزی و ثابت تعادل	۷۴
۴-۳. ترمودینامیک ثابت‌های تعادل	۷۴
۴-۳-۱. انتخاب مقادیر ثابت‌های تعادل	۷۴

فصل پنجم: مطالعات ترمودینامیکی سامانه‌های ناهمگن در محیط آبیکی ۸۹

۱-۵	اصول نظری نمودارهای E-pH	۹۲
۱-۱-۵	pH و اصول آن	۹۵
۲-۱-۵	پتانسیل E و اصول آن	۹۷
۲-۵	محاسبه و ساخت نمودارهای E-pH	۱۰۵
۱-۲-۵	نمودارهای E-pH در دماهای بالا	۱۰۸
۳-۵	نمودارهای E-pH در شستشوی سولفیدهای مس	۱۱۸
۱-۳-۵	سامانه‌ی تعادل S-H ₂ O	۱۲۰
۱-۱-۳-۵	تأثیر دما و غلظت بر روی حلالیت اکسیژن در آب	۱۳۰
۲-۱-۳-۵	تشکیل گوگرد عنصری	۱۳۱
۱-۱-۳-۵	ویژگی آب در نمودار E-pH در ۲۵ °C	۱۳۲
۲-۵	سامانه‌ی تعادل Cu-S-H ₂ O	۱۳۴
۳-۵	سامانه‌ی تعادل Fe-S-H ₂ O	۱۴۲
۴-۳-۵	سامانه‌ی تعادل Cu-Fe-S-H ₂ O	۱۴۳
۵-۳-۵	سامانه‌ی تعادل Cu-S-Cl-H ₂ O	۱۴۵
۶-۳-۵	سامانه‌ی تعادل Fe-S-Cl-H ₂ O	۱۴۸
۷-۳-۵	نمودار تعادل سامانه‌ی Cu-Fe-S-Cl-H ₂ O	۱۵۱
۴-۵	نمودارهای گونه‌ها	۱۵۴

فصل ششم: نرم‌افزارها و پایگاه‌ها برای محاسبات ترمودینامیکی ۱۶۱

فصل هفتم: سینتیک واکنش‌های ناهمگن فرایندهای شستشو ۱۷۳

۱-۷	تأثیر متغیرها بر روی سینتیک واکنش ناهمگن	۱۷۸
۱-۱-۷	انتقال جرم در واکنش ناهمگن	۱۷۹
۲-۱-۷	مساحت و هندسه‌ی سطح مشترک	۱۸۶
۳-۱-۷	جذب (سطحی) و دفع	۱۹۰
۴-۱-۷	هسته‌زایی	۱۹۱
۵-۱-۷	تأثیر دما بر روی سرعت واکنش	۱۹۳
۶-۱-۷	تأثیر غلظت واکنش‌دهنده‌ها	۱۹۵
۷-۱-۷	تأثیر ساخت ناقص و ناخالصی‌ها	۱۹۶

۱۹۸.....	پدیده‌های بنیادی در سطح مشترک.....	۲-۷
۲۰۱.....	انتقال جرم در بین سطح جامد و مایع.....	۱-۲-۷
۲۰۱.....	نفوذ مایع از درون منافذ در جامد.....	۲-۲-۷
۲۰۲.....	سینتیک ذاتی و واکنش‌های ناهمگن بر روی سطوح جامد.....	۳-۲-۷
۲۰۲.....	سینتیک فرایندهای شستشوی یک ذره‌ی جامد.....	۱-۳-۲-۷
۲۰۳.....	واکنش یک ذره‌ی تکی نامتخلخل.....	۲-۳-۲-۷
۲۰۴.....	واکنش‌هایی که در آن‌ها لایه‌ای از محصول جامد تشکیل نمی‌شود.....	۳-۳-۲-۷
۲۰۷.....	واکنش‌هایی که در آن‌ها محصول جامد تشکیل می‌شود.....	۴-۳-۲-۷
۲۱۰.....	تغییر اندازه‌ی ذره در حین واکنش.....	۵-۳-۲-۷
۲۱۱.....	واکنش ذره‌ی متخلخل تکی.....	۶-۳-۲-۷
۲۱۱.....	واکنش‌هایی که در آن‌ها محصول جامد واکنش تشکیل نمی‌شود.....	۷-۳-۲-۷
۲۱۳.....	واکنش‌هایی که در آن‌ها محصول جامد تشکیل می‌شود.....	۸-۳-۲-۷
۲۱۵.....	سینتیک فرایندهای شستشو در سامانه‌های چندذره‌ای.....	۴-۲-۷
۲۲۰.....	تعیین تغییرهای شستشوی سامانه‌ی چندذره‌ای و تحلیل.....	۱-۴-۲-۷

فصل هشتم: شستشو در محیط‌های پیوسته..... ۲۲۷

۲۲۸.....	جوانب اصلی شستشوی میکوپور.....	۱-۸
۲۲۸.....	انحلال پذیری کلیت.....	۱-۱-۸
۲۲۹.....	پتانسیل اکسایش.....	۲-۱-۸
۲۳۲.....	تشکیل کمپلکس‌های کلر.....	۳-۱-۸
۲۳۳.....	شستشوی سولفیدهای مس.....	۴-۱-۸
۲۳۶.....	بازسازی عامل شستشو.....	۵-۱-۸

فصل نهم: استخراج فلزات از محلول‌ها..... ۲۳۹

۲۴۰.....	سمانتاسیون (جانشینی).....	۱-۹
۲۴۱.....	سمانتاسیون ملغمه‌ها.....	۲-۹
۲۴۵.....	احیا با هیدروژن گازی.....	۳-۹
۲۴۷.....	استخراج با مایع.....	۴-۹
۲۴۸.....	تبادل یون.....	۵-۹
۲۵۳.....	ته‌نشین‌سازی ترکیبات جزئی قابل حل.....	۶-۹

تأثیر یون‌های همانند.....	۱-۶-۹
۲۵۴.....	
تأثیر غلظت یون‌های هیدروژن.....	۲-۶-۹
۲۵۴.....	
تأثیر هیدرولیز کاتیون.....	۳-۶-۹
۲۵۶.....	
تأثیر تشکیل کمپلکس‌ها.....	۴-۶-۹
۲۵۷.....	
تبلور.....	۷-۹
۲۵۸.....	
الکترولیز و تصفیه‌ی الکترولیتی.....	۸-۹
۲۶۰.....	
برقکافت فلزات.....	۱-۸-۹
۲۶۱.....	
الکترولیز از محلول‌های آبی.....	۱-۱-۸-۹
۲۶۱.....	
الکترولیز فلزات از محلول‌های آبی در عمل.....	۲-۱-۸-۹
۲۷۰.....	
تصفیه (پالایش) الکترولیتی.....	۲-۸-۹
۲۷۱.....	

فصل دهم: تأثیر ساختار الکترونیکی بر روی شستشوی

نیمه‌رسانای سولفیدی.....	
۲۷۷.....	
نظریه نیمه‌رسانای نواری.....	۱-۱۰
۲۷۸.....	
سطح‌های سطح انرژی یون‌ها در محلول.....	۲-۱۰
۲۷۸.....	
سطح مشترک نیمه‌رسانا - محلول.....	۳-۱۰
۲۸۰.....	
انتقال بین نیمه‌رسانا و محلول.....	۴-۱۰
۲۸۰.....	
خوردگی آندی نیمه‌رساناها.....	۵-۱۰
۲۸۱.....	
سینتیک شستشو و الکتروشیمی سولفیدها.....	۶-۱۰
۲۸۳.....	
شستشوی کالکوپیریت.....	۱-۶-۱۰
۲۸۴.....	
تشکیل یک لایه بر روی سطح کالکوپیریت در شستشو.....	۲-۶-۱۰
۲۸۶.....	
اندرکنش‌های گالوانی در حین شستشو.....	۳-۶-۱۰
۲۸۸.....	

فصل یازدهم: روش‌های تحقیق در مورد فرایندهای هیدرومتالورژی

تعیین ثابت سرعت و درجه‌ی واکنش.....	۱-۱۱
۲۹۲.....	
تعیین انرژی فعال‌سازی.....	۲-۱۱
۲۹۵.....	
روش‌های عملی بررسی فرایندهای شستشو.....	۳-۱۱
۲۹۷.....	
تجهیزات شستشو.....	۱-۳-۱۱
۲۹۸.....	
دستور کار آزمایش.....	۴-۱۱
۳۰۰.....	
تأثیر آمیزش.....	۱-۴-۱۱
۳۰۴.....	

۳۰۵.....	سینتیک فرایند.....	۲-۴-۱۱
۳۰۶.....	تأثیر اندازه‌ی دانه.....	۳-۴-۱۱
۳۰۸.....	تأثیر غلظت اسید.....	۴-۴-۱۱
۳۰۹.....	تأثیر غلظت یون‌های فریک.....	۵-۴-۱۱
۳۱۰.....	تأثیر دما.....	۶-۴-۱۱
۳۱۴.....	تغییرات pH در ارتباط با دما.....	۵-۱۱

فصل دوازدهم: شستشوی سولفیدهای مس..... ۳۱۹

۳۱۹.....	سولفیدهای مس از نوع $Cu_x Fe_y S_z$	۱-۱۲
۳۳۸.....	شستشوی کالکوپریت با سولفات فریک.....	۱-۱-۱۲
۳۴۰.....	شستشوی کالکوپریت با کلرور فریک.....	۲-۱-۱۲
۳۴۲.....	شستشوی کالکوپریت با کلرور فریک با اضافه کردن تتراکلرور کربن.....	۳-۱-۱۲
.....	شستشوی کالکوپریت در اسیدسولفوریک با استفاده از اوزون.....	۴-۱-۱۲
۳۴۴.....	عنوان: معرف اکسایش.....	
۳۵۰.....	شستشوی کالکوپریت در میدان با فرکانس بالا.....	۵-۱-۱۲
۳۵۳.....	شستشوی کالکوپریت در میدان ریزموج.....	۶-۱-۱۲
.....	شستشوی کالکوپریت در حضور کتبه‌ها در اعماق دریا به.....	۷-۱-۱۲
۳۵۸.....	عنوان عامل اکسایش.....	
۳۵۸.....	تأثیر غلظت HCl.....	۱-۷-۱-۱۲
۳۵۸.....	تأثیر دما.....	۲-۷-۱-۱۲
۳۶۱.....	سولفیدهای مس از نوع $Cu_x S$	۲-۱۲
۳۷۰.....	سولفیدهای مس از نوع $Cu_x Me_y S_z$	۳-۱۲

فصل سیزدهم: ریخت‌شناسی و رفتار گوگرد در شستشوی سولفیدها..... ۳۹۳

۳۹۶.....	شستشوی کالکوپریت در کلرید فریک.....	۱-۱۳
۴۰.....	شستشوی کالکوپریت در محلول سولفات فرو.....	۲-۱۳
۴۰۲.....	شستشوی کالکوپریت در اسیدسولفوریک و در حضور اوزون.....	۳-۱۳
۴۰۴.....	شستشوی کالکوپریت در محلول کلرید فریک در حضور تتراکلرور کربن.....	۴-۱۳
۴۰۶.....	شستشوی کالکوپریت در میدانی با فرکانس بالا.....	۵-۱۳
۴۰۹.....	شستشوی کنسانتره‌ی تتراهیدریت و کلسین تتراهیدریت در کلرید فریک.....	۶-۱۳

فصل چهاردهم: مطالعه‌ی ساختار دانه‌ریز	۴۱۵
۱-۱۴. مثال‌هایی از کاربرد پراش‌سنجی اشعه‌ی ایکس در هیدرومتالورژی	۴۱۷

فصل پانزدهم: مکانیزم شستشوی سولفیدهای مس در یک محیط اسیدی	۴۳۷
۱-۱۵. مکانیزم شستشوی کالکوپریت	۴۳۷
۲-۱۵. مکانیزم شستشوی کالکوسیت	۴۴۳
۳-۱۵. مکانیزم شستشوی باکتریایی	۴۴۵
۴-۱۵. مکانیزم تیوسولفات (FeS_2 , MoS_2 , WS_2)	۴۴۵
۵-۱۵. مکانیزم پلی‌ساکارید (ZnS , $CuFeS_2$, $FeAsS$, MnS , etc)	۴۴۵

فصل شانزدهم: حالت فعلی و چشم‌اندازهای فرایندهای هیدرومتالورژی	۴۴۹
۴۴۹. شستشو با استفاده از همزن	۴۴۹
۲-۱۶. شستشوی نفوذی	۴۵۲
۳-۱۶. شستشوی کپه‌ای	۴۵۳
۴-۱۶. شستشوی با	۴۵۴
۵-۱۶. تاریخچه‌ی فرایندهای هیدرومتالورژیکی	۴۵۵
۱-۵-۱۶. فتاوری‌های مهم استفاده در شرایط عادی دما و فشار	۴۵۷
۲-۵-۱۶. استفاده‌ی تجاری هیدرومتالورژی تحت فشار برای سولفیدها	۴۷۹

واژگان انگلیسی - فارسی	۴۹۹
نمایه‌ها	۵۰۳