



شناخت فلزات صنعتی

دکتر سید محمد موسوی خویی

«عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر»

دکتر غلامرضا خلیج

«عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی»

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه ملی، که یک واجب دینی است.^۱

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه مطالعه هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	یازده
فصل اول: استخراج و تصفیه فلزات	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
مقدمه	۱
۱-۱ چگونگی پیدایش معادن	۳
۲-۱ تهیه و تغلیظ مواد معدنی (کانه‌آرایی)	۴
۱-۲-۱ خردکردن سنگ معدن و تفکیک آن	۵
۳-۱ روش‌های تفکیک و جداسازی کانی‌ها از یکدیگر (پرعیارکردن ماده معدنی)	۶
۴-۱ عملیات مقدماتی استخراج فلزات	۷
۱-۴-۱ خشک کردن	۸
۲-۴-۱ تکلیس	۸
۳-۴-۱ تشویه	۸
۴-۴-۱ آگلومراسیون	۹
۵-۱ احیا و استخراج فلزات	۹
۱-۵-۱ پیرومتالورژی	۱۰
۲-۵-۱ هیدرومتالورژی	۱۱
۳-۵-۱ الکترومتالورژی	۱۲
خلاصه فصل اول	۱۳
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول	۱۴
خودآزمایی تشریحی فصل اول	۱۵
فصل دوم: استخراج آهن و تولید فولاد و چدن	۱۷
هدف کلی	۱۷

۱۷	هدف‌های یادگیری
۱۷	مقدمه
۲۰	۱-۲ استخراج آهن به روش غیرمستقیم
۲۷	۲-۲ استخراج آهن به روش مستقیم
۳۱	۳-۲ تولید فولاد از آهن خام
۳۲	۱-۳-۲ روش توماس - بسمر
۳۳	۲-۳-۲ روش زیمنس - مارتین
۳۵	۲-۳-۳ روش کوره دمش اکسیژن (L-D)
۳۶	۲-۳-۴ کوره قوس الکتریکی
۳۸	۲-۴ تولید چدن از آهن خام
۴۰	خلاصه فصل دوم
۴۱	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۴۲	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۴۳	فصل سوم: فولادها
۴۳	هدف کلی
۴۳	هدف‌های یادگیری
۴۳	مقدمه
۴۴	۱-۳ انواع فولادها
۴۴	۲-۳ فولادهای ساده کربنی
۴۷	۳-۳ فولادهای آلیاژی
۵۵	۴-۳ فولادهای ابزار
۵۹	۵-۳ فولادهای زنگ‌زن
۶۰	۳-۵-۱ فولاد زنگ‌زن آستیتی
۶۳	۳-۵-۲ فولادهای زنگ‌زن فریتی
۶۴	۳-۵-۳ فولاد زنگ‌زن مارتنزیتی
۶۵	۳-۵-۴ فولاد زنگ‌زن دوپلکس
۶۶	۳-۵-۵ فولادهای زنگ‌زن رسوب سخت‌شونده
۶۸	خلاصه فصل سوم
۶۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۷۰	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۷۱	فصل چهارم: چدن‌ها
۷۱	هدف کلی
۷۱	هدف‌های یادگیری
۷۱	مقدمه
۷۲	۱-۴ مشخصات چدن‌ها

۷۵	۲-۴ انواع چدن‌ها
۷۶	۱-۲-۴ چدن سفید
۷۷	۲-۲-۴ چدن خاکستری
۸۱	۳-۲-۴ چدن چکش خوار (مالیل)
۸۳	۴-۲-۴ چدن نشکن
۸۷	۵-۲-۴ چدن با گرافیت فشرده
۸۸	خلاصه فصل چهارم
۸۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۹۰	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۹۱	فصل پنجم: آلومینیوم و آلیاژهای آلومینیوم
۹۱	هدف کلی
۹۱	هدف‌های یادگیری
۹۱	مقدمه
۹۳	۱-۵ خواص و کاربردهای آلومینیوم
۹۶	۲-۵ استخراج آلومینیوم
۹۶	۱-۲-۵ فرایند بایر برای تولید اکسید آلومینیوم خالص
۹۸	۲-۲-۵ الکترولیز (احیا و ذوب)
۹۹	۳-۵ آلیاژهای آلومینیوم
۹۹	۱-۳-۵ آلومینیوم خالص تجاری
۱۰۰	۲-۳-۵ آلومینیوم - مس
۱۰۱	۳-۳-۵ آلومینیوم - سیلیسیم
۱۰۲	۴-۳-۵ آلومینیوم - سیلیسیم - مس
۱۰۳	۵-۳-۵ آلومینیوم - منیزیم
۱۰۳	۴-۵ استانداردهای آلیاژهای آلومینیوم
۱۰۷	۱-۴-۵ پسوندهای نام‌گذاری
۱۰۹	۵-۵ خواص و کاربرد آلیاژهای کارپذیر و ریختگی آلومینیوم
۱۰۹	۱-۵-۵ آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم
۱۱۱	۲-۵-۵ آلیاژهای ریختگی آلومینیوم
۱۱۳	خلاصه فصل پنجم
۱۱۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۱۵	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۱۱۷	فصل ششم: مس و آلیاژهای مس
۱۱۷	هدف کلی
۱۱۷	هدف‌های یادگیری
۱۱۷	مقدمه

۱۱۸	۱-۶ خواص و کاربرد مس
۱۲۰	۲-۶ استخراج مس
۱۲۲	۳-۶ دسته‌بندی آلیاژهای مس
۱۲۳	۱-۳-۶ مس الکترولیز شده
۱۲۳	۲-۳-۶ مس‌های آلیاژی
۱۲۴	۴-۶ برنج‌ها
۱۲۵	۱-۴-۶ دسته‌بندی برنج‌ها
۱۲۸	۵-۶ برنرها
۱۳۲	۶-۶ استاندارد طبقه‌بندی مس و آلیاژهای مس
۱۳۴	خلاصه فصل ششم
۱۳۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۳۶	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۱۳۷	فصل هفتم: سایر فلزات و آلیاژهای صنعتی
۱۳۷	هدف کلی
۱۳۷	هدف‌های یادگیری
۱۳۷	مقدمه
۱۳۹	۱-۷ فلزات اولیه
۱۳۹	۱-۱-۷ نیکل
۱۴۳	۲-۱-۷ روی
۱۴۷	۳-۱-۷ سرب
۱۴۸	۴-۱-۷ قلع
۱۵۰	۲-۷ فلزات ثانویه
۱۵۰	۱-۲-۷ جیوه
۱۵۱	۳-۷ فلزات سبک
۱۵۱	۱-۳-۷ بریلیم
۱۵۲	۲-۳-۷ منیزیم
۱۵۴	۳-۳-۷ تیتانیوم
۱۵۶	۴-۷ فلزات دیرگداز
۱۵۶	۱-۴-۷ وانادیم
۱۵۷	۲-۴-۷ مولیبدن
۱۵۸	۳-۴-۷ تنگستن
۱۵۹	۵-۷ فلزات فروآلیاژ
۱۵۹	۱-۵-۷ کروم
۱۶۰	۲-۵-۷ منگنز
۱۶۱	۶-۷ فلزات گرانبها
۱۶۱	۱-۶-۷ پلاتین

۱۶۲	۷-۶-۲ طلا
۱۶۳	۷-۶-۳ نقره
۱۶۴	خلاصه فصل هفتم
۱۶۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۱۶۶	خودآزمایی تشریحی فصل هفتم
۱۶۹	فصل هشتم: مواد پیشرفته
۱۶۹	هدف کلی
۱۶۹	هدف‌های یادگیری
۱۷۰	مقدمه
۱۷۰	۸-۱ ترکیبات بین فلزی
۱۷۱	۸-۱-۱ تاریخچه
۱۷۴	۸-۱-۲ خواص و کاربردها
۱۷۵	۸-۲ آلیاژهای حافظه‌دار
۱۷۶	۸-۲-۱ تاریخچه
۱۷۷	۸-۲-۲ خواص
۱۸۱	۸-۲-۳ کاربردها
۱۸۷	۸-۲-۴ روش‌های ساخت
۱۸۸	۸-۳ فلز آمورف
۱۸۹	۸-۳-۱ تاریخچه
۱۹۰	۸-۳-۲ خواص
۱۹۲	۸-۳-۳ کاربردها
۱۹۴	۸-۳-۴ روش‌های ساخت
۱۹۶	۸-۴ آلیاژهای انتروپی بالا
۱۹۸	۸-۴-۱ تاریخچه
۲۰۰	۸-۴-۲ خواص و کاربردها
۲۰۲	۸-۴-۳ روش ساخت
۲۰۳	خلاصه فصل هشتم
۲۰۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم
۲۰۶	خودآزمایی تشریحی فصل هشتم
۲۰۷	پاسخنامه
۲۰۸	منابع

پیشگفتار

هر کالایی را که در زندگی روزمره خود از آن استفاده می‌کنیم یا فلزی است و یا برای ساخت و تولید آن از مواد فلزی استفاده شده است. استفاده از قطعات فلزی به‌کاررفته در اسکلت‌های فلزی سازه‌ها و ساختمان‌ها، تجهیزات انتقال برق و نیرو، حمل‌ونقل مانند اتومبیل، قطار، کشتی، هواپیما، خطوط انتقال نفت و گاز، لوازم خانگی و ... همه به نوعی به‌شناسایی خواص و کاربرد فلزات مربوط می‌شوند که در گذشته با عنوان مهندسی متالورژی^۱ شناخته می‌شد. منشأ لغت متالورژی ترکیبی از دو واژه یونانی Metal به معنی فلز و Ourgein به معنی کارکردن است. امروزه این رشته گسترش فراوانی در زمینه‌های مختلف علمی یافته است و با عنوان کلی مهندسی و علم مواد که ترکیبی از مهندسی مواد^۲ و علم مواد^۳ است شناخته می‌شود.

باتوجه به اهمیت بسیار زیاد و نقش پررنگی که مواد در شکل‌گیری تمدن‌ها داشته‌اند، باستان‌شناسان و محققان دوره‌های خاص تمدن بشری را براساس موادی که بیشترین استفاده را از آن‌ها برده شده است نام‌گذاری کرده‌اند. برای مثال عصر سنگی، عصر برنز، عصر آهن و ... که به نوعی بیانگر قدمت و اهمیت این رشته در طول تاریخ بشری است. تا همین اواخر قدرت و ارزش مواد وابسته به تکنیک‌های تجربی‌ای بود که در علم کیمیاگری مورد استفاده قرار می‌گرفت. در قرن نوزدهم و بیستم بود که تحقیقات منسجم صورت گرفته منجر به ایجاد یک زمینه مطالعاتی بین‌رشته‌ای شد که در نهایت به نام علم مواد

1. Metallurgy
2. Materials Engineering
3. Materials Science

نام‌گذاری شد. به‌طور کلی موضوع علم مواد مرتبط با کشف و تحقیق بر روی خواصی مواد مانند چگالی، هدایت الکتریکی، استحکام، ترکیب شیمیایی و... است و موضوع مهندسی مواد بهره‌گیری از علم مواد برای بهبود کارایی قطعات مهندسی و توسعه آن‌ها با در نظر گرفتن خواص مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی مشخص است. مهندسی و علم مواد یک حوزه میان رشته‌ای است که در آن ارتباط بین ساختار مواد، روش ساخت آن‌ها، خواص و عملکرد آن‌ها به‌منظور طراحی مواد جدید برای پاسخ‌گویی به نیازهای روزافزون صنعتی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. امروزه با افزایش تحقیقات در زمینه مواد مرکب، مواد نانو و مواد پزشکی، نیمه‌هادی‌ها، مواد مغناطیسی، مواد فوتونی و... مهندسی مواد به یکی از رشته‌های پیشرو در عرصه دانش بدل شده است.

همان‌طور که بیان شد، مواد موجب پیشرفت بشر از آغاز آفرینش بوده‌اند؛ در نتیجه، دوره‌های مختلف زندگی بشر براساس ماده‌ای که در آن روزگار مورد استفاده قرار می‌گرفته است، نام‌گذاری شده است. در ادامه این سیر تاریخی مرور می‌شود.

عصر سنگ: ابزار و سلاح‌هایی که در ماقبل تاریخ، ۳۰۰۰۰۰ قبل و پیش از آن، از سنگ و استخوان حیوانات ساخته شده‌اند، یافت شده است.

عصر مس: طلا، نقره و مس تنها فلزاتی هستند که به‌صورت خالص در طبیعت یافت می‌شوند و از زمان‌های قدیم شناخته شده بودند. اما کاربرد آن‌ها به‌صورت کار شده و شکل‌یافته در ۵۵۰۰ سال قبل از میلاد اتفاق افتاد. در ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد روش ذوب و ریخته‌گری این فلزات پدید آمد. با افزایش دمای کاری کوره‌ها در ۳۵۰۰ سال قبل از میلاد و پس از استخراج مس و قلع از سنگ‌معدن آن‌ها، عصر برنز آغاز می‌شود.

عصر آهن: با کشف روش احیای اکسید آهن در حدود ۱۴۵۰ سال قبل از میلاد، عصر آهن آغاز می‌شود. سه‌هزار سال بعد، در ۱۵۰۰ بعد از میلاد، کوره بلند توسعه یافت و چدن‌ها به‌طور گسترده‌ای در ساخت پل‌ها و ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

عصر فولاد: در سال ۱۸۵۶ فولاد به‌روش بسمر از آهن تولید شد. خواص ویژه فولاد موجب پیدایش نقش اساسی در ساختمان‌سازی شد که تاکنون هم ادامه دارد.

عصر پلیمر: لاستیک در سال ۱۵۵۰ میلادی و پس از کشف قاره آمریکا، به اروپا وارد شد اما عصر پلیمر از ابتدای قرن بیستم آغاز می‌شود. با گسترش علم پلیمر در سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۰ میلادی، انواع مختلفی از پلیمرها ساخته شدند و در محصولات

خانگی، خودروسازی و صنایع هوایی مورد استفاده قرار گرفتند. مقدار تولید سالیانه پلیمرها با مقدار تولید فولاد قابل مقایسه است.

با وجود اینکه کامپوزیت‌ها سال‌های زیادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند، اما کاربرد کامپوزیت‌های مهندسی به سال ۱۹۴۰ برمی‌گردد. با تقویت پلیمر با الیاف شیشه، کامپوزیت فایبرگلاس تولید شد که استحکامی برابر آلیاژهای آلومینیوم داشت. مواد کامپوزیتی کاربرد وسیعی در صنایع هوایی، خودروسازی، لوازم ورزشی و ساختمان‌سازی دارند. عصر حاضر، عصر پلیمرها و کامپوزیت‌ها است.

سیلیکون در ۱۸۲۳ به صورت عنصر کشف شد اما در سال ۱۹۴۷ و با اختراع ترانزیستور کاربرد گسترده‌ای یافت. عصر پلیمرها و کامپوزیت‌ها مقارن با کاربرد وسیع سیلیکون در الکترونیک، ذخیره اطلاعات و رایانه‌ها است که از آن به عصر اطلاعات یاد می‌شود. عصر نانو: در اواخر قرن بیستم، با درک تغییر رفتار ماده با کاهش ابعاد در حد نانومتر، علم نانو پدید آمد. امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه نانو صورت می‌گیرد و ما در آغاز عصر نانو قرار داریم.

با مروری بر زمان‌های تحول در پیدایش و کاربرد مواد؛ سه دوره اصلی روم باستان، اواخر قرن هجدهم و سال‌های حدود ۱۹۴۰ مشخص هستند.

خط سیر مواد در تاریخ		
عصر	تاریخ	ماده
عصر سنگ	۱۰۰۰۰۰ قبل از میلاد	سنگ چوب
عصر برنز عصر مس	۱۰۰۰۰ قبل از میلاد	طلا (۲۰۰۰ ق م) مس طبیعی (۷۰۰۰ ق م) نقره (۴۰۰۰ ق م)؛ مس ذوب شده (۵۰۰۰ ق م)
	۱۰۰۰ قبل از میلاد	برنز (۳۵۰۰ ق م) قلع (۳۵۰۰ ق م) آهن (۱۴۰۰ ق م)
	میلاد مسیح	
	۵۰۰ میلادی	
عصر آهن		

ذوب آهن (۱۵۰۰) روی* (۱۷۴۶) نیکل* (۱۷۵۱)، تنگستن (۱۷۸۳) تیتانیوم* (۱۷۹۱)، آلومینیوم*، منیزیم* (۱۸۰۸)	۱۰۰۰ میلادی	
	۱۵۰۰ میلادی	
	۱۸۰۰ میلادی	
فولاد بسمر (۱۸۵۶) رشته‌های شیشه (۱۸۸۰) تولید آلومینیوم (۱۸۹۰) فولاد زنگ‌زن (۱۹۱۲)	۱۸۵۰ میلادی	عصر فولاد
	۱۹۰۰ میلادی	
	۱۹۲۰ میلادی	
کامپوزیت‌های تقویت‌شده با گرافیت (۱۹۴۲) سوپرآلیاژها (۱۹۴۷) آلیاژهای حافظه‌دار (۱۹۶۱) رشته‌های کربنی، کامپوزیت‌های کربنی (۱۹۶۲)	۱۹۴۰ میلادی	عصر پلیمرها و کامپوزیت‌ها
	۱۹۶۰ میلادی	
	۱۹۸۰ میلادی	
مواد نانو (۱۹۸۰ تاکنون)	۲۰۰۰ میلادی	عصر ملکولی

توجه کنید که مقیاس زمانی در هر عصر یکسان نیست و روند تغییرات در ۲۰۰ سال گذشته بسیار سریع است. علامت ستاره (*) مشخص‌کننده اولین شناسایی عنصر و سایر اطلاعات برای اهمیت کاربردی مواد داده شده است.

فصل اول

استخراج و تصفیه فلزات

هدف کلی

آشنایی با استخراج و تصفیه فلزات.

هدف‌های یادگیری

انتظار می‌رود پس از مطالعه این فصل یادگیرنده بتواند:

۱. موادمعدنی و چگونگی تشکیل آن‌ها را توضیح دهد.
۲. کانسارهای دگرگونی را شرح دهد.
۳. روش‌های تفکیک و جداسازی موادمعدنی را توضیح دهد.
۴. عملیات تهیه و تغلیظ موادمعدنی را توضیح دهد.
۵. عملیات مقدماتی استخراج فلزات را توضیح دهد.
۶. روش‌های استخراج فلزات را شرح دهد.
۷. فرایند پیرومتالورژی را توضیح دهد.
۸. فرایند هیدرومتالورژی را شرح دهد.
۹. فرایند الکترومتالورژی را توضیح دهد.

مقدمه

همه ما بر روی کره زمین زندگی می‌کنیم و تمامی احتیاجات خود را به‌طریقی از آن به‌دست می‌آوریم. این نیازمندی‌ها هرچه باشند ما را بر آن می‌دارد تا زمین را که منبع تامین احتیاجات ماست به‌خوبی بشناسیم و از ثروت‌های نهفته در آن آگاه شویم.

کمابیش اغلب ما به مصارف متعدد موادمعدنی، که درواقع برخی از کانی‌های مفید و سازنده پوسته زمین هستند، آگاهی داریم. زغال‌سنگ، نفت‌خام، سنگ‌معدن آهن و موادی نظیر آهک، گچ، نمک، گوگرد و امثال آن‌ها را عموماً می‌شناسیم. این مواد همگی از قسمت‌های مختلف زمین استخراج می‌شوند.

کانی‌ها ترکیبات طبیعی همگن، جامد و متبلوری هستند که بخش جامد پوسته زمین را تشکیل می‌دهند و ترکیب شیمیایی به‌نسبت ثابت و تاحدودی متغیر دارند. سنگ‌ها از اجتماع کانی‌های مختلف به‌وجود می‌آیند. درواقع تشکیل کانی‌ها و سنگ‌ها فرایند واحدی است. تاکنون درحدود ۱۵۰۰ نوع کانی مختلف شناخته شده است که البته همه آن‌ها اهمیت یکسانی ندارند، ولی بیشتر آن‌ها کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند و روزبه‌روز دامنه نیاز به آن‌ها گسترده‌تر می‌شود. ازاین جهت بشر باید همواره درصدد یافتن معادن جدیدی باشد تا ازطریق آن‌ها بتواند احتیاجات خود را تأمین کند. هنگام تجسس و اکتشاف معادن، اطلاع از فرایندها و تحولات زمین‌شناسی که درگذشته‌های بسیار دور در تشکیل معادن دخالت داشته‌اند اهمیت زیادی دارد. پس چنین شناختی در جستجوی معادن جدید و تعیین ارزش مقدار کانی‌ها و اهمیت عملی آن‌ها راهگشا خواهد بود.

تمام سنگ‌ها و موادمعدنی که پوسته زمین از آن‌ها تشکیل شده است طی فرایندهای گسترده زمین‌شناختی و در مدت زمانی بسیار طولانی به‌وجود آمده‌اند. ذخایری که بدین ترتیب بر اثر فرایندهای طبیعی جمع شده‌اند محدودند و تولید آن‌ها به‌میزانی که اهمیت عملی داشته باشد تجدید و تکرار نمی‌شود. البته امروزه نیز ممکن است معادنی درحال تشکیل باشند، ولی مقدارشان به‌قدری ناچیز است که درعمل نمی‌توان آن‌ها را به‌حساب آورد.

محل پیدایش طبیعی کانی‌ها و سنگ‌هایی که از لحاظ حجم و محتوای خود دارای ارزش اقتصادی باشند در اصطلاح «کانسار» نامیده می‌شود. به‌عبارت دیگر کانسار محلی است که در آن یک یا چند ماده معدنی تمرکز دارد و توده‌های قابل استفاده‌ای از موادمعدنی اعم از فلزی یا غیرفلزی را شامل می‌شود.

برای پی‌بردن به‌نحوه به‌وجود آمدن کانسارها و تجمع موادمعدنی در آن‌ها ابتدا لازم است زمین و ساختار آن را به‌طور مختصر بشناسیم.

۱-۱ چگونگی پیدایش معادن

سنگ‌های مذاب موجود در اعماق زمین را که درواقع حالت خمیری شکل دارند «ماگما» می‌نامند. ماگما درواقع حامل کلیه عناصر شیمیایی و کانی‌های تشکیل‌دهنده پوسته زمین است و از آن انواع بسیار زیادی از سنگ‌های معدنی به‌وجود آمده‌اند.

ماگما نه‌تنها حاوی مواد کانی است بلکه دارای مقداری آب به‌شکل بخار و گازهای دیگر نیز هست. ماگما انواع مختلفی دارد که عناصر و کانی‌های گوناگونی را شامل می‌شود. به‌طورکلی ماگما از ذوب قسمتی از پوسته یا لایه‌های درونی زمین به‌وجود می‌آید ولی پس از تشکیل در جای خود باقی نمی‌ماند و بر اثر عوامل مختلف به‌سمت بالا حرکت می‌کند. ضمن حرکت ماگما به‌سمت بالا تغییراتی در آن به‌وجود می‌آید، ازجمله به‌علت سردشدن، بخشی از آن منجمد و جدا می‌شود. از جمع‌شدن کانی‌های که دارای نقطه ذوب بالایی هستند و در اولین مراحل سردشدن از ماگما خارج می‌شوند و همچنین کانی‌های که در آخرین مراحل انجماد ماگما و درحین عبور آن از فضای خالی و شکاف سنگ‌ها برجا می‌مانند، کانسارهای فلزی مهمی نظیر طلا، نقره، مس، سرب و روی، کرومیت، قلع و جیوه به‌وجود می‌آید. به‌علاوه کانسارهای غیرفلزی مانند فلوئورین، باریت و پنبه نسوز نیز به همین طریق تشکیل می‌شوند. در برخی موارد بر اثر پدیده‌های مختلفی مثل حرکات پوسته و فرسایش زمین کانسارهای فوق‌درحالی سطح زمین ظاهر می‌شوند و تحت‌تأثیر عوامل جوی مانند یخبندان، برف و باران، باد و تابش خورشید کانی‌های موجود به انواع پایدارتری تبدیل می‌شوند و سپس در مراحل بعدی در یک محل جدید متمرکز شده و کانسارهایی را، که به آن‌ها کانسارهای ثانویه می‌گویند به‌وجود می‌آورند. معادن بوکسیت یا سنگ‌معدن آلومینیوم به این طریق تشکیل شده‌اند.

تعداد دیگری از کانسارها مانند نمک و گچ نیز بر اثر تبخیر آب دریا تشکیل می‌شوند. کانسارهای دگرگونی: هنگامی که بخش‌های مختلف ماگما از اعماق زمین به‌طرف بالا به حرکت درمی‌آید با سنگ‌های اطراف مسیر خود در تماس قرار می‌گیرد و بر اثر درجه حرارت و فشار زیادی که دارد سنگ‌های اطراف را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، به‌طوری‌که آن‌ها را دگرگون می‌کند و کانی‌های آن‌ها را تغییر می‌دهد و به کانی دگرگونی تبدیل می‌کند درحین دگرگون‌شدن، یون‌های کانی‌ها طوری تجدید آرایش می‌کنند که جای کمتری را اشغال کنند و به‌طبع سنگ حاصل از آن‌ها متراکم‌تر می‌شود چنین دگرگونی را دگرگونی مجاورتی گویند.

گاهی نیز دگرگونی بدون وجود ماگما صورت می‌گیرد. به این ترتیب که رسوبات قطوری که گاهی تا چند هزار متر ضخامت دارند در یک منطقه جمع می‌شوند و بر اثر وزن زیاد رسوبات شروع به فرونشستن می‌کنند و قسمت ته آن‌ها هرچه بیشتر در پوسته زمین فرو می‌رود. در این حال در آن قسمت فشار و حرارت افزایش می‌یابد و سنگ‌های این منطقه را دگرگون می‌کند. این نوع دگرگونی را ناحیه‌ای می‌گویند.

کانسارهای دگرگونی خود انواع مختلفی دارند. بعضی از آن‌ها از تبدیل کانسارهای قبلی به وجود می‌آیند و بدون آنکه ترکیب شیمیایی سنگ‌های اولیه را تغییر بدهند تغییراتی در شکل کانسار و عیار سنگ معدن به وجود می‌آورند. در نوع دیگر این کانسارها، ماده معدنی مستقیماً از سنگ‌ها مشتق می‌شود، مثلاً در نتیجه دگرگونی سنگ‌های حاوی سیلیکات‌های آلومینیوم و بوکسیت ممکن است کانسار یاقوت که سنگ قیمتی و گران‌بهای است به وجود آید. کانسارهای نظیر گرافیت و مرمَر نیز به همین ترتیب از دگرگونی زغال سنگ و سنگ آهک به وجود می‌آید که مصارف مختلفی دارد.

پس از استخراج موادمعدنی، این مواد باید برای جداسازی مواد با ارزش معدنی از سنگ‌ها و مواد باطله به کارخانه کانه‌آرایی منتقل شود. حمل موادمعدنی به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است.

۱-۲ تهیه و تغلیظ موادمعدنی (کانه‌آرایی)

از آنجایی که مواد و سنگ‌های استخراج‌شده از معادن، عمده از مواد باطله تشکیل شده‌اند و کانی‌های مفید فقط درصد خیلی کمی از آن‌ها را تشکیل داده است، ضروری است که اقداماتی به عمل آید تا مواد باطله (کانی‌ها و سنگ‌های غیرلازم) از مواد استخراجی جدا شوند و درجه خلوص موادمعدنی تا حد ممکن بالا رود. این عملیات را تغلیظ مواد یا آرایش موادمعدنی (کانه‌آرایی) می‌گویند. عملیات کانه‌آرایی در کارخانه‌های مجهزی که معمولاً دور از معدن به این منظور بنا شده‌اند صورت می‌گیرد.

معمولاً در سنگ‌های معدنی کانی‌های مفید و غیرمفید به شکل ذرات چسبیده به هم و مخلوطی از مواد مفید و مواد زائد و باطله هستند. بنابراین برای جداکردن کانی‌های مفید ابتدا سنگ‌های معدن را خرد می‌کنند. سپس دانه‌های عاری از کانی‌های مفید توسط روش‌های گوناگونی جدا می‌شوند. هرچه دانه‌های خردشده ریزتر باشند امکان جداسازی کانی‌های غیرمفید بیشتر می‌شود. با جداکردن سنگ‌های باطله، درصد یا عیار کانی‌های مفید در

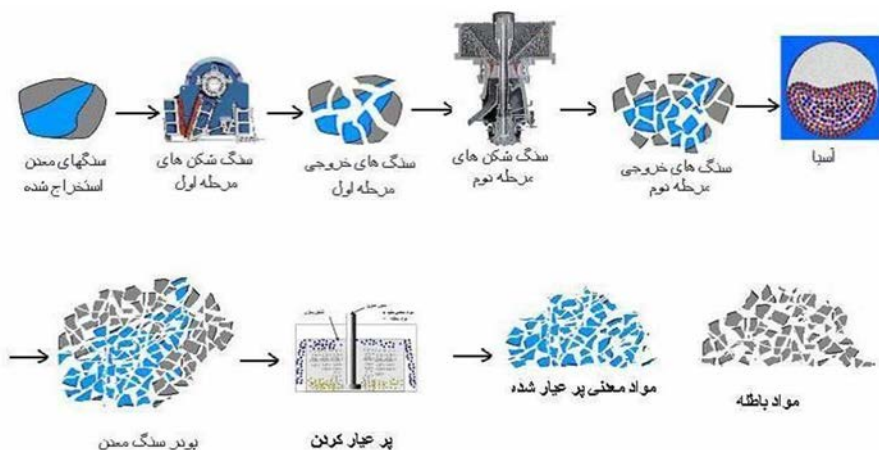
سنگ معدن زیاد خواهد شد. سنگ معدن پرعیار شده سپس برای استخراج فلزات موردنظر به کارخانجات مربوط فرستاده می شوند.

۱-۲-۱ خرد کردن سنگ معدن و تفکیک آن

به منظور کانه آرای سنگ های استخراج شده، ابتدا توسط سنگ شکن ها خرد و سپس سنگ های خرد شده توسط آسیاها پودر می شوند. عمل خرد کردن که در دستگاه هایی به نام سنگ شکن صورت می گیرد، معمولاً در دو مرحله انجام می گیرد. در مرحله اول خرد کردن، سنگ ها به ابعاد حدود ۴-۶ سانتی متر و در مرحله دوم به ابعاد ریزتری مثلاً تا حدود یک سانتی متر می رسند.

پس از آنکه سنگ ها به وسیله سنگ شکن خرد شدند لازم است که دانه بندی شوند، یعنی دانه های ریز و درشت از یکدیگر جدا شوند. برحسب مورد مصرف، گاهی دانه های ریز و زمانی هم دانه های درشت مورد استفاده قرار می گیرند. برای دانه بندی از انواع غربال ها نظیر سرندهای ثابت، لرزان و گردان استفاده می شود. در مرحله آخر برای ریزتر و پودر کردن سنگ ها از آسیا استفاده می کنند (شکل ۱-۱).

به طور کلی می توان برای تفکیک (جداسازی) کانی ها از مشخصات فیزیکی، مکانیکی و یا شیمیایی آن ها استفاده کرد. حال کانی های پرعیار شده در اختیار ما است و بایستی به روشی فلز موردنظر را از کانی استخراج کنیم.



شکل ۱-۱. کانه آرای سنگ معدن

۳-۱ روش‌های تفکیک و جداسازی کانی‌ها از یکدیگر (پرعیارکردن ماده معدنی)

براساس مشخصات فیزیکی و مکانیکی و شیمیایی کانی مفید و موادباطله همراه آن، روش‌های مختلفی برای جداسازی و در نتیجه تغلیظ ماده معدنی به کار برده می‌شود. گاهی فقط اختلاف مقاومت مکانیکی آن‌ها برای جداکردن کافی است، و زمانی اختلاف رنگ به جداسازی کمک می‌کند. پرعیارکردن به روش سنگجوری دستی و سنگجوری اتوماتیک بهترین مثال است. در روش سنگجوری مواد معدنی و باطله روی نوار نقاله ریخته می‌شود و در حین حرکت آن با استفاده از خاصیت اختلاف رنگ چشم کارگر یا سلول‌های فتوالکتریک حساس به رنگ، مواد مفید و غیرمفید را از یکدیگر جدا می‌کند.

یکی دیگر از روش‌های عمده آرایش مواد معدنی استفاده از اختلاف وزن مخصوص است. با ریختن مخلوط کانی مفید و موادباطله در محلول یا مایعی که وزن مخصوصی مابین آن دو دارد یکی از آن‌ها در عمق مایع فرو می‌رود و دیگری در سطح شناور می‌شود. به این ترتیب این دو از یکدیگر جدا می‌شوند. در دستگاه‌های به نام جیگ^۱ و همین‌طور میزهای تغلیظ با استفاده از اختلاف سرعت سقوط یا حرکت دانه‌های با وزن مخصوص مختلف در آب آن‌ها را از هم جدا می‌کنند.

امروزه استفاده از خاصیت مغناطیسی بعضی از کانی‌ها، از جمله بعضی از کانی‌های آهن، روش مناسبی برای جداسازی آن‌ها از سایر کانی‌ها است. عمل جداسازی ذرات سنگ معدن از موادباطله به وسیله مغناطیس در مجاورت هوا یا آب انجام می‌شود.

از دیگر خواص فیزیکی که برای جداکردن مواد به کار می‌رود خاصیت الکتریکی آن‌هاست که با ایجاد میدان الکتریکی قوی، کانی‌هایی را که دارای خاصیت هدایت الکتریکی هستند به وسیله سیستم‌های الکتریکی دفع یا جذب می‌کنند و آن‌ها را از موادباطله جدا می‌سازند.

فلوتاسیون یا شناورسازی: شناورسازی یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش‌های جداسازی ماده معدنی و موادباطله و در عین حال از دقیق‌ترین روش‌های پرعیارکردن مواد معدنی است، که علاوه بر اکثر سنگ‌های معدنی فلزی بسیاری از کانی‌های غیرفلزی و زغال‌سنگ را می‌توان به کمک آن پرعیار کرد.

در قسمت شناورسازی مخلوط سنگ معدن آسیاب می شود و مخلوط آن با آب که خمیره نامیده می شود داخل سلول های هوادهنده می شود. در این سلول ها خمیره به هم زده شده، هوا در آن دمیده می شود و مقدار قابل توجهی کف در سطح خمیره تشکیل می شود. عمل تولید کف در سلول های فلوتاسیون توسط چرخش سریع یک پروانه در درون آن انجام می گیرد، در هر صورت حباب های کف مقدار زیادی از ذرات سنگ معدن را که به آن ها چسبیده اند با خود به سطح می آورند و ذرات مواد باطله که نمی توانند به حباب های هوا بچسبند به پایین فرومی روند.

کف هایی که در سطح مایع ظاهر می شوند به وسیله پاروهای مکانیکی به طور مرتب از بالای سلول برداشته می شود و در داخل جویی که در کنار سلول ها قرار دارد می ریزد. کف های حاصله از سرریز که حاوی مقدار زیادی ماده معدنی است پس از شستشوی کف به صورت لجن رسوب می کند که پس از آبگیری و خشک کردن آن ها برای مراحل بعدی ارسال می شود.

۴-۱ عملیات مقدماتی استخراج فلزات

قبل از آنکه مواد معدنی تغلیظ شده در کارخانجات کانه آرای، وارد کوره های ذوب فلزات شوند؛ می باید عملیاتی را بر روی آن ها انجام داد تا به درجه خلوص بهتری برسند و نیز اختلالی در کار کوره به وجود نیاید، یا آنکه مواد مذکور به شکلی تبدیل شوند که بتوان آن ها را در کوره به کار برد.

در اینجا به طور اختصار به شرح این عملیات که شامل موارد زیر است می پردازیم:

۱. خشک کردن^۱
۲. تکلیس^۲
۳. تشویه^۳
۴. آگلومراسیون^۴

۱-۴-۱ خشک کردن

عبارت است از گرفتن رطوبت و آب تبلور شیمیایی ماده معدنی تا اندازه‌ای که ورود آن به کوره سبب تأخیر عملیات ذوب نشود. ساده‌ترین طریقه خشک کردن به این طریق است که مواد را روی سطحی پهن می‌کنند و از زیر به وسیله جریان هوای داغ یا آتش ملایم آن را حرارت می‌دهند. استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن در انواع مختلف امروزه کاربرد فراوانی پیدا کرده است. انواع این دستگاه‌ها، باتوجه به چگونگی رفتار ماده معدنی و خواص فیزیکی و شیمیایی آن، در کارخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۴-۲ تکلیس

برای جدا کردن دی‌اکسیدکربن از موادمعدنی کربناته عملیاتی به نام تکلیس روی آن‌ها انجام می‌دهند. در این عملیات با حرارت دادن (حرارت‌های بیشتر نسبت به عملیات خشک کردن) ماده معدنی کربناته ابتدا آن را طبق واکنش زیر تجزیه کرده و اجازه خروج گاز CO_2 را از محیط می‌دهند.



(در این واکنش M به جای فلز موردنظر برای استخراج گذاشته شده است). تفاوت عمل خشک کردن با تکلیس در آن است که برای عمل تکلیس از حرارت بیشتری استفاده می‌شود.

۱-۴-۳ تشویه

هنگامی که موادمعدنی حاوی گوگرد، آنتیموان و آرسنیک باشند آن را در کوره‌های ویژه‌ای گرما می‌دهند تا آنکه جسم از حالت سولفور و غیره به اکسید تبدیل شود و ناخالصی‌های مذکور از آن خارج شوند. این عمل را تشویه گویند. انجام عمل مذکور اهمیت زیادی دارد زیرا در غیر این صورت مشکلاتی در عملیات ذوب ماده معدنی به وجود می‌آید و علاوه بر اتلاف، مواد فلزی نیز از بین می‌رود.