

پیشرفت‌های اخیر در پخت مغناطیسی سنگ‌های آهن دیرگداز: مروری فناورانه بر دهه گذشته

چکیده:

بهبود بهره‌وری از منابع سنگ‌آهن دیرگداز یک موضوع رایج برای توسعه پایدار صنعت فولاد و آهن جهان است. پخت مغناطیسی به عنوان یک روش مؤثر و نمونه برای بهره‌برداری از سنگ‌آهن‌های دیرگداز در نظر گرفته می‌شود. پس از پخت مغناطیسی، مواد معدنی ضعیف مغناطیسی آهن مانند هماتیت، لیمونیت و سیدریت به‌طور انتخابی به مگنتیت فرومغناطیسی احیا یا اکسید می‌شوند که در مقایسه با سایر فرآیندها، جداسازی مغناطیسی آن‌ها پس از آزادسازی آسان‌تر است. روش‌های اصلی پخت مغناطیسی شامل پخت در کوره عمودی، کوره دوار، بستر سیال‌شده و پخت با کمک مایکروویو هستند. این مقاله مروری بر پیشرفت‌های اخیر در زمینه پخت مغناطیسی سنگ‌آهن‌های دشوار و دیرگداز، شامل این روش‌ها، به ویژه بستر سیال‌شده و پخت با مایکروویو دارد که به عنوان روش‌های کارآمدتر و امیدوارکننده‌تر در نظر گرفته شده‌اند. در همین راستا، این مقاله به بررسی روندهای آینده در فناوری‌های پخت مغناطیسی می‌پردازد.

کلمات کلیدی: سنگ‌های آهن دیرگداز، پخت مغناطیسی، کوره عمودی، کوره دوار، بستر سیال‌شده، مایکروویو

۱. مقدمه

انواع اصلی صنعتی مواد معدنی آهن دار شامل هماتیت، مگنتیت، لیمونیت و سیدریت هستند. با این حال، این مواد بدون انجام فرآوری اولیه به دلیل عیار پایین، نمی‌توانند در صنعت آهن و فولاد استفاده شوند. انتخاب یک تکنیک فرآوری کارآمد برای جداسازی سنگ‌آهن بر اساس ترکیب معدنی و خواص فیزیکی آن اهمیت زیادی دارد. مگنتیت یک ماده معدنی فرومغناطیسی است و می‌توان آن را به راحتی با جداسازی مغناطیسی از مواد غیرآهنی سنگ‌های کوارتزی مغناطیسی جدا کرد. با این حال، ذخایر سنگ‌آهن مگنتیتی در حال اتمام هستند. هماتیت، لیمونیت و سیدریت ضعیف مغناطیسی هستند و به همین دلیل تولید کنسانتره آهن با کیفیت با استفاده از جداسازی مغناطیسی تنها دشوار است.

در حال حاضر، سنگ‌های هماتیتی عمدتاً با استفاده از یک فرآیند ترکیبی از جداسازی مغناطیسی و فلوتاسیون یا جداسازی ثقلی فرآوری می‌شوند. نرخ بازیابی آهن کمتر از ۸۰ درصد است. برای سنگ‌های لیمونیتی و سیدریتی، به دلیل پخش ریزدانه‌های مواد معدنی آهن و شباهت خواص آن‌ها با مواد غیرآهنی، دستیابی به نتایج رضایت‌بخش با روش‌های متعارف فرآوری مانند جداسازی مغناطیسی، غلظت ثقلی و فلوتاسیون دشوار است. اگرچه از فرآیند ترکیبی غلظت ثقلی، جداسازی مغناطیسی و فلوتاسیون استفاده می‌شود، اما لیمونیت و سیدریت به سختی از مواد غیرآهنی جدا می‌شوند که آن‌ها را به سنگ‌های آهن دیرگداز تبدیل می‌کند.

از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی، جداسازی مغناطیسی مؤثرترین روش برای بازیابی اکسیدهای آهن است، اما این فرآیند نیازمند تغییر خواص مغناطیسی سنگ‌آهن‌های ضعیف مغناطیسی است. افزایش حساسیت مغناطیسی هماتیت، سیدریت یا لیمونیت با تغییر فاز ناشی از پخت امکان‌پذیر است. این پخت‌ها شامل پخت در کوره عمودی، پخت در کوره دوار، پخت بستر سیال‌شده و پخت با کمک مایکروویو می‌باشد. به عبارت دیگر، اکسیدهای آهن ضعیف مغناطیسی مانند هماتیت [Fe₂O₃]

لیمونیت $[FeO(OH) \times nH_2O]$ و سیدریت $[FeCO_3]$ می‌توانند از طریق واکنش شیمیایی به مگنتیت فرومغناطیسی $[Fe_3O_4]$ تبدیل شوند. سپس اکسیدهای آهن به راحتی و با موفقیت از مواد غیرآهنی با استفاده از جداسازی مغناطیسی جدا می‌شوند. محصول واکنش، مگنتیت فرومغناطیسی است، بنابراین این فرآیند تبدیل شیمیایی حرارتی، به نام پخت مغناطیسی شناخته می‌شود.

(پریستلی ۱۹۵۷؛ ایواساگی و پراساد ۱۹۸۹؛ اوادیل ۱۹۹۲؛ رن و یو ۲۰۰۵) پخت مغناطیسی اختلاف مغناطیسی بین اکسیدهای آهن و مواد غیرآهنی را افزایش می‌دهد و در نتیجه قابلیت جداسازی سنگ آهن‌ها را بهبود می‌بخشد. اگرچه پخت به انرژی نیاز دارد، پخت مغناطیسی می‌تواند مزایای خود را داشته باشد، چرا که جداسازی مغناطیسی ساده‌تر و انتخابی‌تر از سایر روش‌های جداسازی (مانند فلوتاسیون) است. علاوه بر این، شکنندگی سنگ پخته شده افزایش می‌یابد، که به کاهش هزینه‌های خردایش در مراحل بعدی کمک می‌کند (ژو و همکاران ۲۰۱۰؛ هوانگ و همکاران ۲۰۱۰).

مطالعه پخت مغناطیسی سنگ آهن‌ها از دهه ۱۹۰۰ آغاز شد و بیش از ۱۰۰ سال است که ادامه دارد. بر اساس نوع راکتور پخت، پخت مغناطیسی به چهار دسته تقسیم می‌شود: پخت در کوره عمودی، پخت در کوره دوار، پخت در بستر سیال شده و پخت با کمک مایکروویو. در سال‌های اخیر، فناوری‌های پخت مغناطیسی با استفاده از بستر سیال شده به دلیل مزایای بارز خود از جمله راندمان بالای انتقال حرارت و جرم به یکی از موضوعات پرطرفدار در تحقیقات تبدیل شده‌اند و پخت با استفاده از انرژی مایکروویو به عنوان یک زمینه جدید پژوهشی در پخت مغناطیسی سنگ آهن‌ها شناخته می‌شود. این دو جنبه باید برجسته شوند تا پیشرفت‌های بیشتری در پخت مغناطیسی سنگ آهن حاصل شود.

۲. مرور ادبیات

۲.۱. پخت در کوره عمودی

کوره عمودی که برای پخت سنگ‌های هماتیت به کار می‌رود، یک کوره صنعتی بزرگ است که به عنوان تجهیزات حرارتی طبقه‌بندی می‌شود. این کوره برای تبدیل مواد معدنی ضعیف مغناطیسی به مواد معدنی مغناطیسی قوی از طریق یک فرآیند فنی به نام پخت مغناطیسی استفاده می‌شود. فرآیند پخت مغناطیسی سنگ‌های هماتیت یا اسپیکولاریت در داخل کوره عمودی به چهار مرحله تقسیم می‌شود: تغذیه سنگ، پیش‌گرمایش سنگ، گرمایش، کاهش و خنک‌سازی و تخلیه. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است (یان و همکاران، ۲۰۱۲؛ لو و همکاران، ۲۰۱۵).

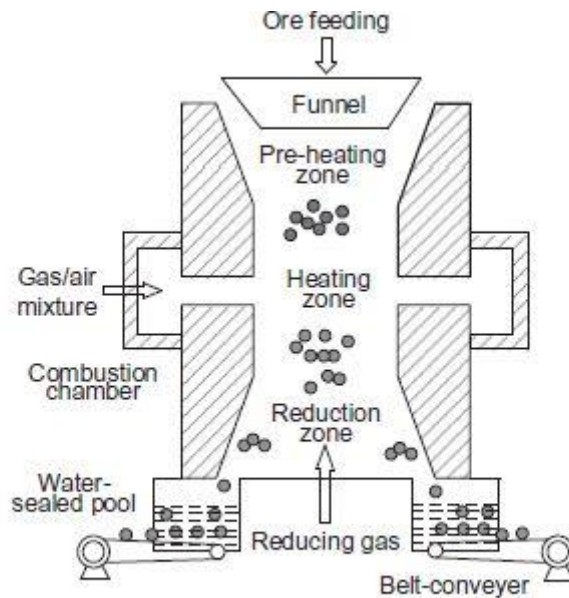


Figure 1. Process and material flows diagram of shaft furnace roasting process.

سنگ‌های خام هماتیت یا اسپیکولاریت از طریق یک شیار سنگ ذخیره و یک قیف مربعی در بالای کوره به داخل کوره می‌افتند. در منطقه پیش‌گرمایش، دمای سنگ‌ها ابتدا با تماس با گاز داغ صعودی به ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در منطقه گرمایش، هوای گرمایشی و گاز گرمایشی در اتاق‌های احتراق مخلوط می‌شوند و می‌سوزند و دمای آن معمولاً در محدوده ۱۰۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کنترل می‌شود. گرمای حاصل از اتاق احتراق می‌تواند دمای سنگ‌های در حال سقوط را از طریق انتقال گرما، تابش و رسانش به ۷۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. در منطقه کاهش، سنگ‌های داغ شده که حاوی ماده Fe_2O_3 هستند، با گاز احیاکننده‌ای که دمای اتاق دارد تماس پیدا می‌کنند و توسط CO یا H_2 به محصول Fe_3O_4 (مگنتیت) در حدود ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابند، همان‌طور که در معادلات (۱) و (۲) نشان داده شده است. در عین حال، انرژی آزاد گیبس این واکنش‌ها در دمای ۸۴۳ کلوین (۵۷۰ درجه سانتی‌گراد) بسیار منفی است که نشان‌دهنده سهولت وقوع این واکنش‌ها است. خنک‌سازی و تخلیه مرحله نهایی است که در آن سنگ‌های پخته شده با ریختن در یک استخر مهر و موم شده با آب خنک می‌شوند. سپس سنگ‌های اکسید زدایی شده توسط دو دستگاه تسمه نقاله به کارگاه خردایش و جداسازی مغناطیسی منتقل می‌شوند (یان و همکاران، ۲۰۰۸؛ چای و همکاران، ۲۰۱۱).



در اوایل سال ۱۹۲۶، تولید صنعتی پخت مغناطیسی سنگ آهن با کوره عمودی در منطقه آنشان چین آغاز شد. پخت مغناطیسی با کوره عمودی و جداسازی مغناطیسی به عنوان روش اصلی بهره‌برداری از سنگ‌های هماتیت و اسپیکولاریت دیرگداز به کار گرفته می‌شد. تاکنون، تنها شرکت JISCO به استفاده از ۴۴ کوره عمودی (مدل: ۱۰۰ متر مکعب) برای پخت سنگ‌های اسپیکولاریت دیرگداز (با محتوای ۳۵٪ آهن) ادامه می‌دهد. در این فرآیند از گاز کوره بلند) حاوی ۲۹٪ CO و ۳٪ H_2 به عنوان ماده احیاکننده استفاده می‌شود. پس از پخت در کوره عمودی، کنسانتره آهنی با ۵۹.۷٪ آهن و نرخ بازیابی ۷۷.۶٪ توسط جداسازی مغناطیسی حاصل می‌شود (ژانگ، ۲۰۱۵).

با این حال، کاربردهای عملی متعدد نشان داده‌اند که کوره عمودی تنها می‌تواند سنگ‌های توده‌ای با اندازه ۱۵ تا ۷۵ میلی‌متر را پردازش کند تا از نفوذپذیری کوره عمودی اطمینان حاصل شود. ظرفیت تولید یک کوره عمودی حدود ۲۵ تن در ساعت است و مدت زمان باقی ماندن سنگ در کوره عمودی بین ۶ تا ۱۰ ساعت است. بزرگترین عیب این فرآیند این است که سنگ‌های اکسیدزدایی شده به‌صورت شیمیایی ناهمگن هستند که همین موضوع باعث کاهش نرخ بازیابی آهن می‌شود. به عنوان مثال، زمانی که ماده مفید Fe_2O_3 در ذرات درشت (مانند ۷۵ میلی‌متر) به Fe_3O_4 کاهش می‌یابد، ماده Fe_2O_3 در ذرات نسبتاً ریز (مانند ۱۵ میلی‌متر) به راحتی به FeO ضعیف مغناطیسی کاهش می‌یابد. در حالی که ماده Fe_2O_3 در ذرات ریز (۱۵ میلی‌متر) با موفقیت به Fe_3O_4 کاهش می‌یابد، Fe_2O_3 در ذرات درشت (۷۵ میلی‌متر) تنها به‌طور جزئی به Fe_3O_4 تبدیل می‌شود که تأثیر منفی بر بازیابی آهن دارد. از این رو، فرآیند پخت در کوره عمودی به تدریج با فرآیند ترکیبی جداسازی مغناطیسی و سپس غلظت ثقلی یا فلوتاسیون جایگزین شده است.

۲.۲. پخت در کوره دوار

کوره دوار معمولاً سنگ‌های آهن با اندازه کمتر از ۲۵ میلی‌متر را پردازش می‌کند و فرآیند پخت مغناطیسی سنگ آهن در یک کوره دوار به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

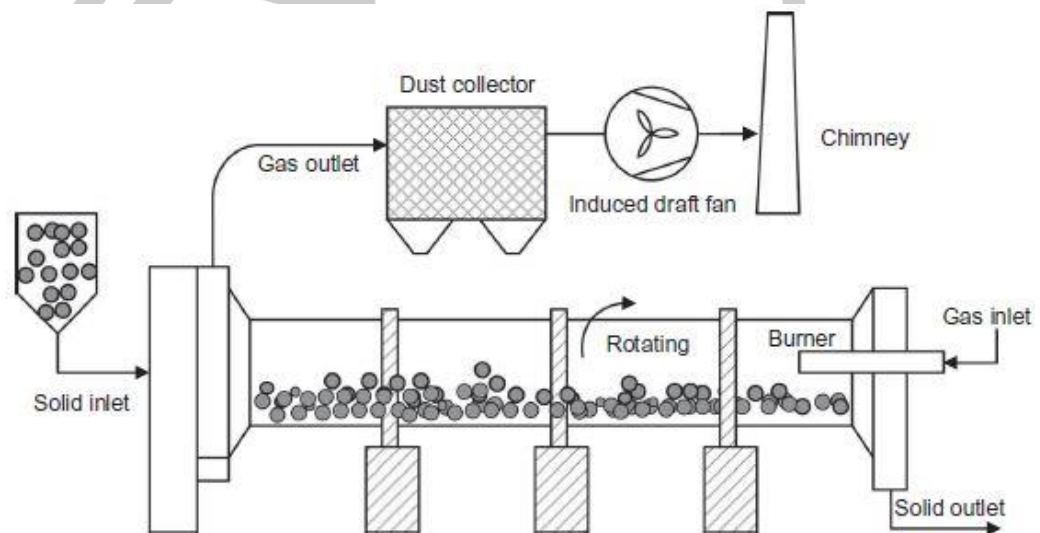
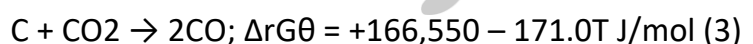


Figure 2. Magnetization roasting process of iron ores in the rotary kiln.

با چرخش آهسته (۰.۴ تا ۱.۰ دور در دقیقه) کوره دوار، هماتیت یا اسپیکولاریت در سنگ آهن‌ها ابتدا در خلاف جهت گاز داغ خروجی از مشعل گرم می‌شود و سپس توسط گاز احیاکننده CO که از واکنش بودوار تولید می‌شود به مگنتیت تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر، زمانی که از مواد احیاکننده جامد (مانند زغال سنگ) استفاده می‌شود، CO_2 تولید شده در واکنش‌های احیا با کربن جامد واکنش می‌دهد تا CO بیشتری تولید شود (فلاویو، ۱۹۹۲). واکنش‌های کاهش مربوطه در معادلات (۱) و (۳) ارائه شده‌اند. مطابق معادله (۳)، واکنش بودوار یک واکنش گرماگیر است، به این معنی که افزایش دما باعث می‌شود واکنش بودوار به سرعت رخ دهد و در نتیجه فشار جزئی CO بالا رود و کاهش مغناطیسی هماتیت یا اسپیکولاریت تسریع شود. بنابراین، دمای پخت در کوره دوار معمولاً بین ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است.



شرکت JISCO یک کوره دوار صنعتی) مدل $\phi 3.6$ متر \times ۵۰ متر (با ظرفیت ۳۲ تن در ساعت برای پخت سنگ اسپکولاریت (TFe 37.8%) با اندازه کمتر از ۱۰ میلی‌متر ساخته بود. پس از پخت در دمای ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، کنسانتره آهنی با ۵۸.۲٪ آهن و نرخ بازیابی ۸۴.۵٪ توسط جداسازی مغناطیسی به‌دست آمد (ژو و لی، ۲۰۱۴). با این حال، به دلیل مصرف زیاد انرژی و هزینه‌های تولید بالا، این فرآیند متوقف شد.

Xue و همکاران از یک کوره دوار بزرگ ($\phi 4$) متر \times ۶۰ متر (برای فرآوری سنگ لیمونیتی از منطقه شین‌جیانگ چین استفاده کردند. سنگ در شرایط بهینه پخت، یعنی دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، ظرفیت فرآوری ۵۰ تن در ساعت و نسبت زغال‌سنگ به سنگ ۶٪ پخته شد و پس از جداسازی مغناطیسی با شدت پایین، کنسانتره آهن با عیار ۶۲٪ و بازیابی ۹۰٪ به‌دست آمد. بنابراین، در سال ۲۰۱۰ یک خط فرآوری صنعتی با ظرفیت سالانه ۲ میلیون تن سنگ لیمونیتی ساخته و به بهره‌برداری رسید (Xue) و همکاران، ۲۰۱۱).

Wang و همکاران نیز از یک کوره دوار بزرگ ($\phi 4$) متر \times ۶۰ متر (برای فرآوری سنگ لیمونیتی از استان یون‌نان چین استفاده کردند. نتایج نشان داد که لیمونیت تقریباً به‌طور کامل توسط ۸٪ زغال‌سنگ در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد طی ۸۰ دقیقه به مگنتیت تبدیل شد و مقدار مناسب فرآوری ۴۵ تن در ساعت بود. تحت شرایط بهینه، کنسانتره مغناطیسی با عیار ۵۸.۴٪ آهن و نرخ بازیابی آهن ۹۳.۹٪ تولید شد (Wang) و همکاران، ۲۰۱۲. Xiao (و Zhang پخت مغناطیسی یک سنگ هماتیت اولیتی (TFe 39.4%) از استان سیچوان چین را در مقیاس پیلوت با استفاده از کوره دوار $\phi 0.8$) متر \times ۹ متر (انجام دادند. پس از پخت مغناطیسی با کاهش در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه با ۸٪ زغال‌سنگ، جداسازی مغناطیسی با شدت پایین کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۵.۹٪ آهن و بازیابی ۷۸.۹٪ آهن را به‌دست آورد (Xiao) و Zhang، ۲۰۱۲. (در مطالعه‌ای دیگر، Luo و همکاران پخت مغناطیسی سنگ سیدریتی Daxigou (با محتوای آهن ۲۶.۸٪ آهن) را در کوره دوار $\phi 1.3$) متر \times ۲۴ متر (انجام دادند. تحت دمای پخت ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پخت ۸۰ دقیقه در جو خنثی، سنگ پخته‌شده تا ۹۵.۶٪ عبور از ۰.۰۴۵ میلی‌متر آسیاب شد و سپس در شدت میدان مغناطیسی ۱۲۰ kA/m توسط لوله مغناطیسی جداسازی شد. عیار آهن کنسانتره مغناطیسی و بازیابی آن به‌ترتیب ۵۹.۸٪ و ۸۶.۴٪ بود (Luo) و همکاران، ۲۰۰۶).

در حقیقت، معمولاً از کوره‌های مافل آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی اثر پخت در کوره دوار صنعتی استفاده می‌شود (Peng) و همکاران به بررسی تغییر فاز و جداسازی مغناطیسی یک سنگ هماتیت اولیتی با استفاده از زغال‌سنگ پودر شده به‌عنوان احیاکننده در کوره مافل پرداختند. نتایج نشان داد که هماتیت با موفقیت به مگنتیت تبدیل شده است و پس از جداسازی مغناطیسی سنگ پخته‌شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ دقیقه با ۲۰٪ زغال‌سنگ، کنسانتره آهن با عیار ۵۵.۶٪ و بازیابی ۸۳.۸٪ به‌دست آمد (Peng) و همکاران، ۲۰۱۷).

Faris و همکاران عواملی که بر تبدیل گوتیت به مگنتیت در طی پخت کاهش مغناطیسی یک سنگ آهن غنی از عناصر کمیاب نادر با استفاده از زغال‌سنگ به‌عنوان احیاکننده تأثیر می‌گذارند را بررسی کردند. شرایط بهینه پخت به دمای پخت ۶۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزودن ۱۰ تا ۲۰ درصد زغال‌سنگ و زمان پخت ۹۰ دقیقه منتج شد که باعث تبدیل کامل گوتیت به مگنتیت شد (Faris) و همکاران، ۲۰۱۷. Rath (و همکاران به مطالعه پخت کاهش مغناطیسی یک سنگ آهن با عیار ۵۱.۶ درصد آهن با استفاده از زغال‌سنگ فعال پرداختند. نتایج نشان داد که مواد معدنی هماتیت و گوتیت به فاز مگنتیت تبدیل شده‌اند و پس از پخت در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان ۵۳ دقیقه و غلظت احیاکننده ۳ درصد، کنسانتره آهن با عیار ۶۴ درصد و بازیابی ۷۶ درصد به‌دست آمد (Rath) و همکاران، ۲۰۱۴).

Jena و همکاران از فرآیند پخت کاهش مغناطیسی و سپس جداسازی مغناطیسی برای فرآوری سنگ تیتانومگنتیت با عیار ۵۲.۴ درصد آهن استفاده کردند. پس از پخت کاهش سنگ در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و سپس جداسازی مغناطیسی، کنسانتره‌ای با عیار ۶۵.۷ درصد آهن و بازده ۶۱.۲ درصد با بازیابی ۷۸ درصد آهن به‌دست آمد (Jena) و همکاران، ۲۰۱۵). Yu و همکاران از فرآیند پخت کاهش مغناطیسی و سپس جداسازی مغناطیسی برای جداسازی و بازیابی آهن از سنگ آهن کم‌عیار حاوی کربنات استفاده کردند و هماتیت و سیدریت درون سنگ تقریباً به‌طور کامل توسط ۸ درصد زغال‌سنگ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۸ دقیقه به مگنتیت تبدیل شدند. بنابراین، کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۵.۴ درصد آهن و بازیابی ۹۲.۷ درصد به‌دست آمد (Yu) و همکاران، ۲۰۱۷). (در مطالعه‌ای دیگر، از فرآیند پخت کاهش مغناطیسی و سپس جداسازی مغناطیسی برای بازیافت آهن از باطله سنگ آهن استفاده شد. پس از پخت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با ۱ درصد زغال‌سنگ برای مدت ۳۰ دقیقه، کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۱.۳ درصد آهن و نرخ بازیابی ۸۸.۲ درصد به‌دست آمد (Yu) و همکاران، ۲۰۱۷). b)

Lei و همکاران دریافتند که استفاده از روش پخت کاهش مغناطیسی و جداسازی مغناطیسی برای بازیافت آهن از باطله سرب-روی روشی مؤثر است. بیشتر آهن موجود در باطله‌های پخته شده از Fe2O3 به Fe3O4 با ۷ درصد زغال‌سنگ در دمای ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد تبدیل شد. بنابراین، بازیابی آهن به ۸۲.۲ درصد رسید و محتوای آهن در کنسانتره مغناطیسی به ۶۲.۱ درصد افزایش یافت (Li) و همکاران، ۲۰۱۰).

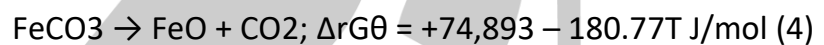
Rath و همکاران فرآیند پخت کاهش و جداسازی مغناطیسی همزمان گرد و غبار کوره بلند (Fe 32%) و یک سنگ آهن نواری کم‌عیار (Fe 47.2%) را بدون استفاده از احیاکننده اضافی بررسی کردند و یک کنسانتره سنگ آهن با عیار ۶۳ درصد آهن و بازیابی ۶۸ درصد تحت شرایط بهینه آماری مانند دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۹۰ دقیقه و نسبت گرد و غبار کوره بلند به سنگ آهن ۰.۴ به‌دست آوردند (Rath) و همکاران، ۲۰۱۸).

Sun و همکاران یک فرآیند پخت مغناطیسی سبز را با استفاده از سیدریت (FeCO3) به‌عنوان احیاکننده پیشنهاد دادند. تأثیر دوز سیدریت، دمای پخت و زمان پخت بر فرآیند پخت مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه پخت به دوز ۴۰ درصد سیدریت با دمای پخت ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پخت ۱۰ دقیقه منجر شد. تحت شرایط بهینه، یک کنسانتره آهن با عیار ۶۶.۷ درصد و بازیابی ۹۸.۰۵ درصد توسط جداسازی مغناطیسی به‌دست آمد. در مطالعه دیگری، Ponomar و همکاران پودر مگنتیت خالص را از مخلوطی از سیدریت طبیعی و هماتیت با گرم کردن در هوا تهیه کردند. سیدریت و هماتیت هر دو به مگنتیت تبدیل شدند و حداکثر مغناطیس‌پذیری اشباع ۷۰ Am²/kg برای مخلوطی با نسبت ۱:۱ هماتیت به سیدریت پس از گرم کردن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه به‌دست آمد که با یافته‌های Sun مطابقت داشت (Lei) و همکاران، ۲۰۱۷).

به‌منظور فراهم کردن پایه نظری بهتر برای استفاده از منابع سیدریت در شین‌جیانگ چین، Luo و همکاران رفتار تجزیه حرارتی آن را در جوهای خنثی و اکسید کننده مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که سیدریت در شرایط کنترل شده دارای ویژگی‌های خودمغناطیس‌شوندگی است و فرآیند تغییر فاز در جو ضعیف اکسید کننده از مراحل $\gamma\text{-FeCO}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد پیروی می‌کند و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، فرآیند $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ رخ می‌دهد (Luo) و همکاران، ۲۰۱۶). (در جو خنثی، مسیر تجزیه به $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ در دمای زیر ۷۳۳ درجه سانتی‌گراد و $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$ در دمای بالای ۷۳۳

درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. همچنین Chun و همکاران دریافتند که پخت همزمان و جداسازی مغناطیسی روشی مؤثر برای فرآوری سنگ‌های هماتیت و سیدریت بدون افزودن هیچ احیاکننده‌ای است. زمانی که مخلوط با نسبت جرمی ۸۰:۲۰ سیدریت به هماتیت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه پخته شد، یک کنسانتره آهن با عیار ۶۱.۶ درصد آهن و بازیابی ۹۱.۱ درصد پس از جداسازی مغناطیسی تولید شد (Chun) و همکاران، ۲۰۱۵. تجزیه حرارتی سیدریت به‌طور کلی پیچیده است و به جو پخت بستگی دارد. محصول نهایی معمولاً در جو اکسید کننده (O₂) یا هوا (هماتیت (Fe₂O₃))، در جو CO₂ مگنتیت (Fe₃O₄) و در جو خنثی، مگنتیت و وستیت (FeO) است (Chang و Ahmad؛ Dhube و Gokarn و 1990). در جو خنثی، وستیت به‌عنوان یک فاز میانی تشکیل می‌شود و در نهایت به مگنتیت تبدیل می‌شود (Kissinger) و همکاران، ۱۹۵۶؛ Sun و همکاران، ۲۰۱۹).

واکنش‌ها به این صورت ارائه می‌شوند:



از آنجا که وستیت یک فاز میانی است، تجزیه سیدریت (FeCO₃) در جو خنثی را می‌توان با معادله (۶) توصیف کرد:



در طول فرآیند پخت همزمان سیدریت و هماتیت در جو خنثی، سیدریت به همراه تولید CO به مگنتیت تبدیل می‌شود (طبق معادله (6)) و هماتیت برای کاهش به مگنتیت به CO نیاز دارد (طبق معادله (1)). بنابراین، پخت همزمان یک فرآیند اقتصادی برای فرآوری سنگ‌های کم‌عیار هماتیت و سیدریت است و همچنین میزان انتشار CO₂ را کاهش می‌دهد، چرا که هیچ احیاکننده‌ای به آن اضافه نمی‌شود. علاوه بر این، واکنش هم‌پخت هماتیت و سیدریت در معادله (۷) خلاصه شده است. انرژی آزاد گیبس این واکنش در دماهای بالای ۲۹۰ کلوین منفی است و نشان می‌دهد که این واکنش به راحتی رخ می‌دهد.



در برخی موارد، از زیست‌توده به جای کک یا زغال‌سنگ به‌عنوان احیاکننده در طول پخت مغناطیسی سنگ‌های آهن دیرگداز استفاده می‌شود Wu. و همکاران از خاکاره کاج به‌عنوان عامل احیاکننده استفاده کرده و اثرات دمای کاهش، زمان واکنش و دوز خاکاره کاج را بر مغناطیس سنگ گوتیتی در کوره مافل بررسی کردند. مغناطیس‌پذیری در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه با ۲۰٪ خاکاره کاج ۳۰ برابر افزایش یافت و درصد فرومغناطیسی بیش از ۹۶٪ بود که به یک مغناطیس‌سازی خوب دست یافتند (Wu) و همکاران، ۲۰۱۲).

Zhang و همکاران از یک زیست‌توده حاوی ۱۳.۴٪ کربن ثابت به‌عنوان عامل احیاکننده برای پخت سنگ لیمونیت کم‌عیار (TFe 33.58%) از بائوتو در کوره مافل استفاده کردند و دریافتند که لیمونیت ابتدا در دمای بالا به α-Fe₂O₃ دهیدراته شده و سپس توسط زیست‌توده به Fe₃O₄ کاهش یافته است. بیشترین مغناطیس‌پذیری اشباع در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه با ۱۵٪ زیست‌توده به ۶۰.۱۳٪ اموا/گرم رسید و منجر به تولید کنسانتره مغناطیسی با عیار ۵۸٪ آهن و بازیابی ۷۲٪ شد (Zhang) و همکاران، ۲۰۱۷).

در مقایسه با کوره عمودی، عملکرد پخت و جداسازی سنگ در کوره دوار بهتر است. با این حال، میانگین مصرف انرژی مرتبط با پخت در کوره دوار تا ۶۰ کیلوگرم زغال سنگ استاندارد به ازای هر تن سنگ خام است که ۴۲ درصد بیشتر از پخت در کوره عمودی است (Xue) و همکاران، ۲۰۱۱. (بدتر از آن، تشکیل حلقه کلینکر ناشی از تشکیل برخی مواد با نقطه ذوب پایین مانند فایالیت در طول فرآیند پخت باعث تأثیر منفی بر بازده منابع آهن می‌شود. در حال حاضر، طولانی‌ترین دوره عملکرد بدون وقفه برای یک کوره دوار تنها ۳۰ تا ۷۵ روز است. بنابراین، مصرف بالای انرژی پخت و تشکیل حلقه کلینکر همچنان از مشکلات اصلی است که باید برای پخت مغناطیسی در کوره دوار حل شوند.

۲.۳. پخت در بستر سیال شده

در کوره بستر سیال شده، مواد جامد مورد نظر برای پخت با جریان گاز بالارونده‌ای که ذرات مجزا را در حالت تعلیق نگه می‌دارد، به لرزه در می‌آیند. تنظیم دقیق سرعت گاز نسبت به اندازه دانه‌ها و وزن مخصوص مواد مورد پخت، این امکان را فراهم می‌کند که مخلوطی از گاز و جامدات شناور ایجاد شود که تقریباً مانند یک مایع رفتار می‌کند. این فرآیند نسبت به سایر تکنیک‌های پخت مزایای زیر را داراست: سهولت در کنترل به دلیل نبود قطعات متحرک درون راکتور، یکنواختی محصولات تخلیه، قابلیت پردازش ذرات ریز (کمتر از ۰.۸ میلی‌متر) و کارایی بالای انتقال حرارت و جرم (Uwadiale)، ۱۹۹۲. (از دهه ۱۹۵۰ تاکنون، پخت سیال شده در زمینه پخت مغناطیسی سنگ‌های آهن به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. در حال حاضر، پخت مغناطیسی در بستر سیال شده به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین رویکردها برای فرآوری سنگ‌های آهن ضعیف مغناطیسی و دیرگداز در نظر گرفته شده و به یکی از موضوعات داغ تحقیقات تبدیل شده است.

Yu و همکاران یک فرآیند جدید پخت مغناطیسی سریع برای سنگ‌های آهن دیرگداز (کمتر از ۰.۵ میلی‌متر) اختراع کردند. این تکنیک دارای دمای کاهش بالا (۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد)، غلظت پایین CO (۰ تا ۵ درصد حجمی) و زمان پخت کوتاه (۰ تا ۶۰ ثانیه) بود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، پودر سنگ آهن با استفاده از گاز داغ خروجی از راکتور از طریق سه مرحله سیکلون به‌صورت مخالف پیش‌گرم شد. گاز داغ احتراق (حدود ۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) که حاوی ۰ تا ۵ درصد حجمی CO بود و توسط احتراق زغال سنگ تولید می‌شد، هماتیت، لیمونیت یا سیدریت موجود در سنگ را به سرعت به مگنتیت تبدیل کرد و زمان ماندگاری پودر سنگ در راکتور حدود ۵ تا ۶۰ ثانیه تخمین زده شد (Yu و Chen، ۲۰۱۰؛ Qi و Yu، ۲۰۱۱؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۷؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۷). (با این حال، هم‌گرمایش و هم‌کاهش سنگ به‌طور هم‌زمان در راکتور انجام شد. از این رو، جو احیایی درون راکتور به سختی قابل کنترل بود. بدتر از آن، ذرات ریز سنگ آهن در دماهای بالا (۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) تمایل به پختن دارند که منجر به پوسته‌سازی در دیواره داخلی راکتور و عدم عملکرد صحیح تولید می‌شود.

جدول ۱ نتایج جداسازی مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهن دیرگداز پس از پخت مغناطیسی سریع را نشان می‌دهد. برای این سنگ‌ها، عیار آهن تنها می‌تواند با روش‌های مرسوم فرآوری شامل جداسازی مغناطیسی، جداسازی ثقلی و فلوتاسیون به ۴۰ تا ۵۰ درصد با بازیابی ۵۰ تا ۶۰ درصد ارتقا یابد.

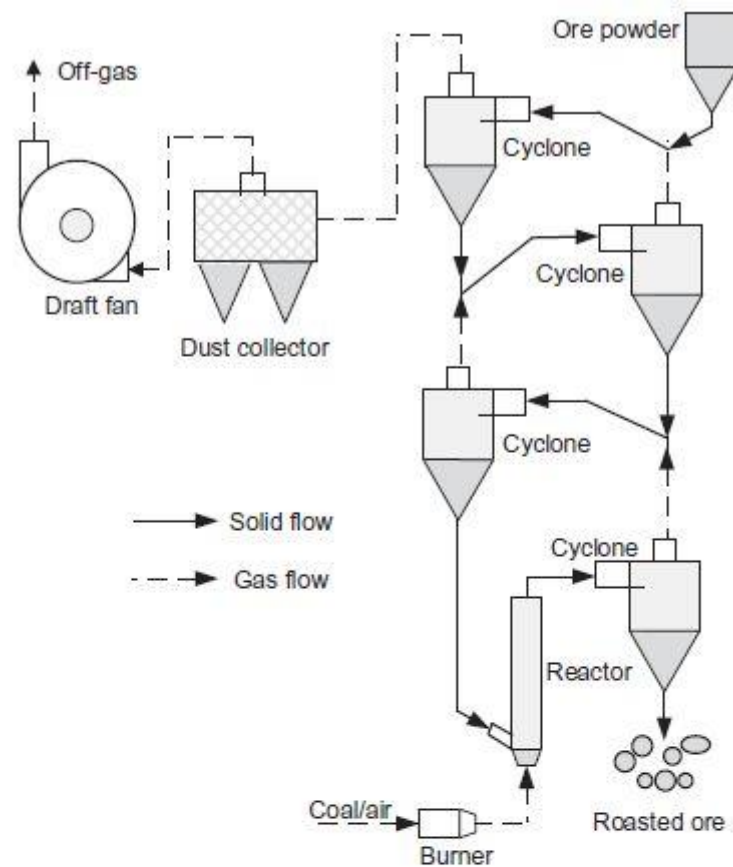


Figure 3. Sketch of the flash magnetization roasting process.

Table 1. Magnetic separation results of typical refractory iron ores after flash magnetization roasting.

Ore type	Product	Weight %	Fe %	Recovery %
Limonite ore from Jiangxi	Concentrate	61.9	60.3	94.3
	Tailing	38.1	5.9	5.7
	Roasted ore	100	39.6	100
Siderite ore from Shanxi	Concentrate	40	56.8	84
	Tailing	60	7.2	16
	Roasted ore	100	27.1	100
Siderite ore from Kunming	Concentrate	59.6	57.1	90.7
	Tailing	40.4	8.6	9.3
	Roasted ore	100	37.5	100
Oolitic hematite ore from Hubei	Concentrate	64.4	56.5	82.2
	Tailing	35.6	22.1	17.8
	Roasted ore	100	44.3	100
Limonite ore from Hubei	Concentrate	50.9	60.7	94.5
	Tailing	49.1	3.7	5.5
	Roasted ore	100	32.7	100

Zhang و همکاران یک آزمایش نیمه صنعتی پخت مغناطیسی سریع بر روی سنگ باطله سیدریتی (TFe 15.1%) از معدن آهن داکسیگو انجام دادند. پس از پخت در دمای ۷۴۰ درجه سانتی گراد با ۱۰ درصد حجمی اکسیژن، عیار آهن سنگ می تواند به ۵۳.۳ درصد با بازیابی ۷۰.۵ درصد پس از جداسازی مغناطیسی ارتقا یابد (Zhang, Yao ۲۰۱۱). و

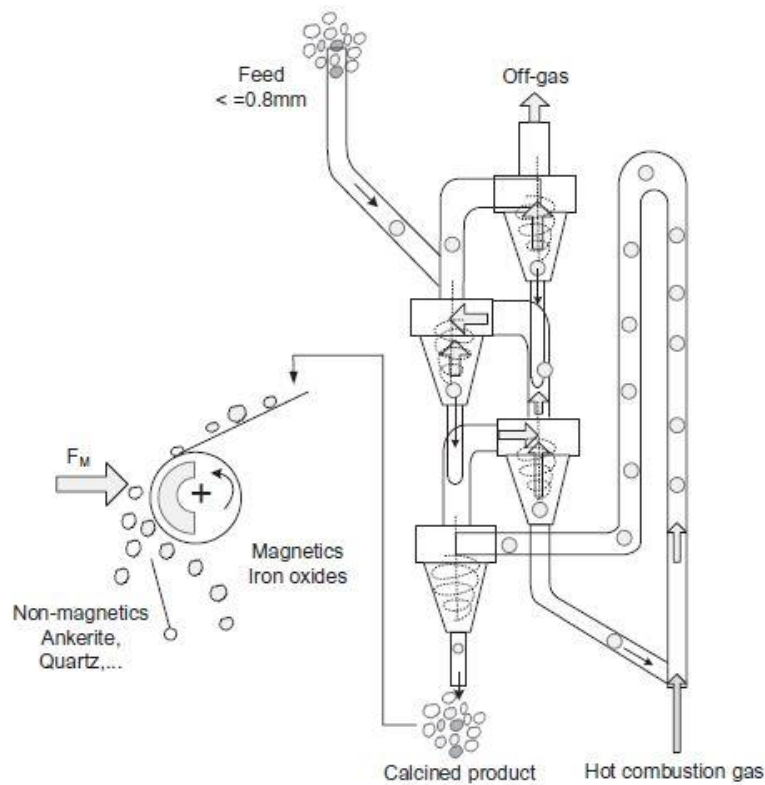


Figure 4. Schematic of the calcination system by means of cyclone preheater and calcination loop followed by low intensity magnetic separation.

همکاران یک آزمایش در مقیاس پیلوت از پخت مغناطیسی سریع برای فرآوری باطله سیانیدی (TFe 27.3%) انجام دادند و دریافتند که کنسانتره مغناطیسی می‌تواند به ۵۵.۶ درصد با نرخ بازیابی آهن ۸۱.۹ درصد پس از پخت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با ۱.۰ درصد حجمی مونوکسید کربن افزایش یابد (Yao, ۲۰۱۲). در مطالعه‌ای دیگر، Boehm و همکاران از یک دستگاه نشان داده‌شده در شکل ۴ برای بررسی پخت مغناطیسی سریع انتخابی مواد معدنی سنگ سیدریتی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که پخت سریع در یک جو ضعیف اکسید کننده (۱۲ درصد حجمی O_2) برای بهبود جداسازی مغناطیسی ضعیف سیدریت از آنکریت و سایر مواد باطله درون سنگ با موفقیت آزمایش شد و پس از پخت، کنسانتره مغناطیسی خشک با ۵۶ درصد آهن و بازیابی ۸۰ درصد به‌دست آمد (Boehm و همکاران، ۲۰۱۴).

Li و Zhu یک فرآیند پخت مغناطیسی در بستر سیال چندمرحله‌ای چرخشی را برای فرآوری سنگ‌های آهن ضعیف مغناطیسی توسعه دادند. این تکنیک دارای دمای پخت پایین (حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) و پخت کاهش چندمرحله‌ای سیال شده بود. آن‌ها یک آزمایش پیلوت چندمرحله‌ای از پخت مغناطیسی سیال شده برای فرآوری سنگ لیمونیتی با عیار ۳۳ درصد آهن از یون‌نان انجام دادند. پس از پخت و جداسازی مغناطیسی، عیار آهن سنگ به ۵۷ درصد با نرخ بازیابی ۹۵ درصد ارتقا یافت. علاوه بر این، مصرف انرژی پخت تنها ۳۶ کیلوگرم زغال سنگ استاندارد به ازای هر تن سنگ خام بود (Li و Zhu، ۲۰۱۴).

Zhou و همکاران عملکرد مغناطیسی سنگ هماتیت اولیتی (TFe 44.6%) از یون‌نان را از طریق یک راکتور آزمایشگاهی بستر سیال بررسی کردند و دریافتند که کنسانتره مغناطیسی تنها می‌تواند به ۵۵ درصد با نرخ بازیابی آهن ۷۰ درصد پس از پخت مستقیم بستر سیال ارتقا یابد. با این حال، با یک فرآیند پیش‌کلسیناسیون پیش از پخت مغناطیسی، یک کنسانتره آهن با عیار ۶۰.۲ درصد و بازیابی ۸۵.۹ درصد با موفقیت تولید شد (Zhou و همکاران، ۲۰۰۹).

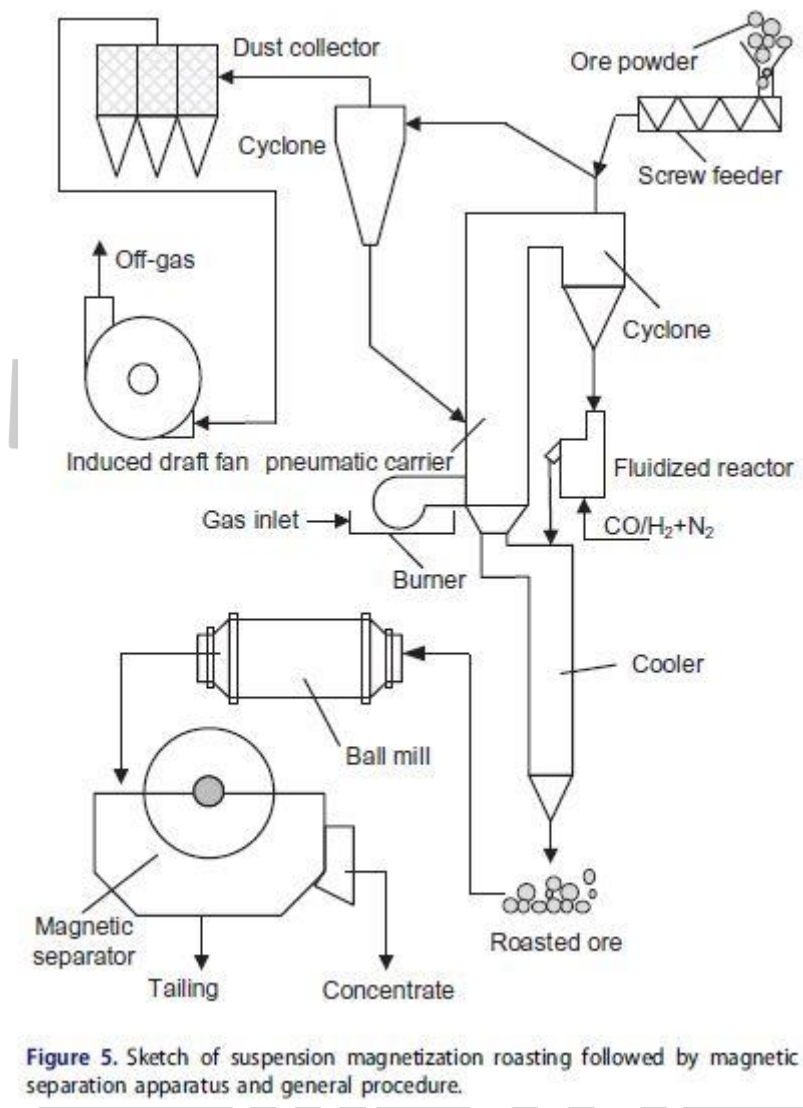
Yu و همکاران یک آزمایش پخت مغناطیسی در مقیاس آزمایشگاهی از طریق یک راکتور بستر سیال آزمایشگاهی برای فرآوری سنگ هماتیت نوع آنشان (TFe 41.6%) انجام دادند. پودر سنگ (۷۰ درصد عبور از ۰.۰۷۴ میلی‌متر) در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد با جریان ۳.۲ متر مکعب در ساعت H₂ و ۴.۸ متر مکعب در ساعت N₂ به مدت ۱۵ ثانیه پخته شد که نتیجه آن یک کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۵.۴ درصد آهن و بازیابی ۸۸.۱ درصد در یک میدان مغناطیسی ۸۰ کیلوآمپر بر متر بود (Yu و همکاران، ۲۰۱۸). Zhao و همکاران به مطالعه فرآوری ریزدانه‌های سیدریتی حاوی کربنات بالا با استفاده از فرآیند ترکیبی پخت مغناطیسی بستر سیال پرداختند. سیدریت تقریباً به‌طور کامل تحت شرایط بهینه پیش‌گرمایش در ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳۰ ثانیه و به دنبال آن پخت کاهش مغناطیسی در ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۶۰ ثانیه با سرعت جریان گاز ۰.۵ متر بر ثانیه در جوی با ۱۳.۳٪ CO + 6.7% H₂ + 80% N₂ به مگنتیت تبدیل شد. بنابراین، کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۲.۶ درصد آهن و نرخ بازیابی ۸۹.۲ درصد به‌دست آمد (Zhao و همکاران، ۲۰۱۹).

Zhu و Li قابلیت جداسازی یک سنگ هماتیت کم‌عیار از تانگشان را از طریق پخت مغناطیسی بستر سیال آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. بهترین نتایج جداسازی زمانی حاصل شد که میدان مغناطیسی اعمال شده ۱۲۰ کیلوآمپر بر متر و اندازه ذرات کمتر از ۰.۰۴۸ میلی‌متر بود، که در این شرایط عیار کنسانتره آهن ۶۲.۵ درصد و نرخ بازیابی ۹۱.۱ درصد بود (Li و Zhu، ۲۰۱۲). Li و همکاران تغییر فاز سنگ هماتیت اولیه در طول پخت کاهش بستر سیال را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که هماتیت درون سنگ تقریباً به‌طور کامل توسط H₂ در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مگنتیت کاهش یافته است. دمای بالاتر می‌تواند منجر به کاهش بیش از حد مگنتیت و تشکیل و ستیت ضعیف مغناطیسی شود. بنابراین، بالاترین محتوای آهن ۵۸.۷ درصد و نرخ بازیابی آهن ۸۴.۰ درصد با جداسازی مغناطیسی در دمای پخت ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد (Li و همکاران، ۲۰۱۵).

Li و همکاران از باطله‌های معدن آنشان با استفاده از پخت مغناطیسی بستر سیال آزمایشگاهی و جداسازی مغناطیسی با شدت پایین فرآوری کردند. نتایج نشان داد که یک کنسانتره آهن با عیار ۶۵.۳ درصد و بازیابی ۸۵.۸ درصد تحت شرایط جریان گاز ۸ متر مکعب در ساعت، غلظت H₂ 50 درصد و پخت مغناطیسی سیال‌شده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۰ ثانیه تولید شد. هماتیت و لیمونیت درون باطله‌ها طی فرآیند پخت مغناطیسی سیال‌شده به مگنتیت تبدیل شدند و در نتیجه به‌راحتی توسط جداسازی مغناطیسی از مواد غیرآهنی جدا شدند (Li و همکاران، ۲۰۱۹).

یک فرآیند نوآورانه پخت تعلیقی (سیال‌شده) برای مغناطیسی کردن سنگ‌های آهن دیرگداز بر اساس مسیر فنی پیش‌گرمایش و سپس کاهش حرارت حفظ‌شده و اکسیداسیون مجدد توسط پروفیسور Han و تیم علمی او توسعه یافت (Gao و همکاران، ۲۰۱۸؛ Yu و همکاران، ۲۰۱۸a، ۲۰۱۸b). همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، پودر سنگ‌آهن (کمتر از ۰.۸ میلی‌متر) توسط گاز داغ خروجی از مشعل پیش‌گرم شد و سپس وارد حامل پنوماتیکی از طریق

گروه‌ها



یک سیکلون شد. گازهای داغ (حدود ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) تولیدشده توسط احتراق گاز طبیعی هم‌زمان سنگ‌آهن را گرم و به آن منتقل کردند تا به جداکننده گاز-جامد (سیکلون دوم) برسد که در آن سیدریت (FeCO_3) و لیمونیت ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) درون سنگ به هماتیت (Fe_2O_3) اکسید یا تجزیه شدند. هماتیت گرم‌شده درون سنگ به داخل راکتور افتاد و در دمای ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با گاز احیاکننده CO یا H_2 در دمای محیط واکنش داد تا به مگنتیت تبدیل شود. پس از پخت کاهش مغناطیسی، گاز مخلوط، پودر سنگ‌آهن را به سردکننده منتقل کرد که در آن بخشی از مگنتیت مصنوعی (Fe_3O_4) در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد توسط هوا به مگهمیت فرومغناطیسی ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) اکسید مجدد شد. در همین حال، هوای پیش‌گرم‌شده با CO یا H_2 باقی‌مانده وارد کوره گرم‌کننده شد و برای گرمایش سنگ سوخته شد. در نهایت، اکسیدهای آهن درون سنگ پخته‌شده می‌توانند پس از آزادسازی از مواد غیرآهنی به‌طور موفقیت‌آمیز توسط جداسازی مغناطیسی بازیابی شوند.

YU و همکاران از یک سیستم پخت تعلیقی (سیال‌شده) در مقیاس پایلوت با ظرفیت ۱۵۰ کیلوگرم در ساعت برای افزایش خواص مغناطیسی سنگ‌آهن کربناتی هماتیت از کارخانه سینترینگ دونگ‌آنشان استفاده کردند و دریافتند که هماتیت تقریباً به‌طور کامل توسط مخلوط گاز ۴ متر مکعب در ساعت CO و ۱ متر مکعب در ساعت N_2 در دمای پخت ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد

به مگنتیت تبدیل شد. بنابراین، یک کنسانتره با عیار ۶۶.۸ درصد آهن و نرخ بازیابی ۹۱.۲ درصد پس از جداسازی مغناطیسی تولید شد (Yu و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، آن‌ها از همان شرایط پخت برای فرآوری باطله سنگ آهن استفاده کردند و یک کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۱.۴ درصد آهن و نرخ بازیابی ۸۱.۸ درصد به دست آمد (Yu و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، برخی دیگر از سنگ‌های آهن دشوار نیز تحت مطالعه پخت مغناطیسی تعلیقی در مقیاس پایلوت و سپس جداسازی مغناطیسی با شدت پایین قرار گرفتند و عملکرد فرآوری در جدول ۲ نشان داده شده است. برای این سنگ‌ها، عیار آهن می‌تواند به بیش از ۶۰ درصد ارتقا یابد و بازیابی آهن بیش از ۸۵ درصد توسط پخت مغناطیسی تعلیقی و سپس جداسازی مغناطیسی با شدت پایین (SMR-LIMS) باشد (Yu و همکاران، ۲۰۱۸).

Table 2. Beneficiation performance of some difficult to treat iron ores using pilot-scale suspension magnetization roasting followed by magnetic separation.

Ore type	Existing process		SMR-LIMS		Increased by	
	TFe/%	Recovery/%	TFe/%	Recovery/%	TFe/%	Recovery/%
Jingtieshan specularite ore	59 ~ 60	76 ~ 78	60.5	91.36	0.5	13 ~ 15
Shilu hematite ore	62.5	60 ~ 65	65.58	85.56	3	20 ~ 25
Tonkolili limonite ore	56	-	64 ~ 65	95 ~ 98	8 ~ 9	95 ~ 98



Figure 6. Industrial suspension magnetization roasting system with a throughput of 1.65 million t/a for beneficiation of specularite ore in JISCO.

Zhang و همکاران یک آزمایش پایلوت پخت مغناطیسی تعلیقی برای فرآوری سنگ آهن دیرگداز از معدن جینگ‌تیه‌شان انجام دادند. نتایج نشان داد که با شرایط مناسب پخت - دمای پخت ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد، جریان CO 4.0 متر مکعب در ساعت، جریان N₂ 2.0 متر مکعب در ساعت و نرخ تغذیه ۱۰۰ کیلوگرم در ساعت - یک کنسانتره آهن با عیار کل ۶۰.۱ درصد و بازیابی آهن ۹۰.۱ درصد به دست آمد. در مقایسه با فرآیند مرسوم پخت مغناطیسی در کوره عمودی و سپس جداسازی مغناطیسی، تکنیک نوآورانه توسعه یافته در اینجا توانست عیار TFe و بازیابی آهن کنسانتره آهن را به ترتیب ۱۲ تا ۱۴ درصد و ۱۷ تا ۲۲ درصد بهبود دهد. در طول فرآیند پخت مغناطیسی تعلیقی، هماتیت و سیدریت به طور موفقیت آمیز به مگنتیت یا مگهمیت تبدیل شدند که خاصیت مغناطیسی مواد معدنی آهن را افزایش دادند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۹). این فناوری نوآورانه پخت مغناطیسی تعلیقی در شرکت آهن و فولاد جیوکیان (JISCO) به کار گرفته شده است و یک خط تولید صنعتی با ظرفیت ۱.۶۵ میلیون تن در سال برای فرآوری سنگ اسپیکولاریت ساخته شد (شکل ۶ را ببینید) که نمونه‌ای از استفاده کارآمد از منابع سنگ آهن دیرگداز ارائه می‌دهد. در حال حاضر، این خط تولید در مرحله آزمایش‌های صنعتی قرار دارد.

پخت با مایکروویو یک زمینه جدید در پژوهش‌های پخت مغناطیسی است. این روش منحصر به فرد است و با گرمایش معمولی تفاوت دارد. مایکروویو شکلی غیر یونیزه از امواج الکترومغناطیسی است که فرکانس آن بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز متغیر است و می‌تواند توسط دی‌الکتریک‌ها جذب شود (Song و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین، فرآیند پخت با استفاده از تشعشعات مایکروویو به‌عنوان گرمایش دی‌الکتریک نیز شناخته می‌شود. تعامل مواد معدنی دی‌الکتریک (مانند سیدریت، هماتیت، لیمونیت و پیریت) با تشعشعات مایکروویو باعث گرم شدن آن‌ها به دلیل هدایت یونی و چرخش دوقطبی در مواد معدنی دی‌الکتریک می‌شود که در اثر میدان الکترومغناطیسی متناوب مایکروویو ایجاد می‌شود. در مقایسه با تکنیک‌های مرسوم پخت (پخت در کوره عمودی، پخت در کوره دوار و غیره)، پخت با استفاده از تشعشعات مایکروویو ویژگی‌های منحصر به فردی دارد و مزایای متعددی از جمله گرمایش سریع، گرمایش بدون تماس، گرمایش انتخابی مواد، گرمایش حجمی و عدم تولید آلودگی را ارائه می‌دهد (Clark و همکاران، ۲۰۰۰). علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده است که گرمایش با استفاده از مایکروویو تأثیر قابل توجهی بر خواص مغناطیسی سنگ‌های آهنی مانند هماتیت، پیریت، ایلمنیت و سیدریت دارد.

Omran و همکاران یک مطالعه مقایسه‌ای بین سنگ‌های هماتیت اولیتی پخته نشده و پخته شده با مایکروویو انجام دادند. آن‌ها دریافتند که بخشی از Fe_3 در هماتیت پس از تابش مایکروویو به Fe_2 در قالب مگنتیت کاهش می‌یابد که این امر توسط تحلیل‌های XPS و XRD با وضوح بالا تأیید شد. علاوه بر این، عامل احیاکننده برای تبدیل هماتیت به مگنتیت ممکن است کاتولینیت باشد، چرا که قله‌های پراش مشخصه آن در XRD پس از گرمایش با مایکروویو ناپدید شد و مغناطیس اشباع سنگ پس از تابش مایکروویو از ۰.۵۰ به ۲.۴۸ امو/گرم افزایش یافت (Omran و همکاران، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵).

Barani و همکاران اثر پخت با مایکروویو بر خواص مغناطیسی یک نمونه سنگ آهن شامل ۶۴ درصد مگنتیت، ۳۴ درصد هماتیت و ۱ درصد کوارتز را بررسی کردند. نتایج نشان داد که یک دوره طولانی مدت از پخت در میدان مایکروویو تأثیر منفی بر خواص مغناطیسی سنگ‌ها دارد و زمان تابش ۶۰ ثانیه برای مغناطیس‌سازی سنگ کافی است. علاوه بر این، افزایش حساسیت مغناطیسی می‌تواند به تبدیل هماتیت ضعیف مغناطیسی به مگمیت فرومغناطیسی ناشی از تابش مایکروویو نسبت داده شود (Barani و همکاران، ۲۰۱۱).

Znamenáčková و همکاران تأثیر تابش مایکروویو بر تغییر فاز سیدریت را بررسی کردند. با افزایش زمان تابش مایکروویو، سیدریت ابتدا به مگنتیت و سپس به وستیت و در نهایت به آهن فلزی تجزیه شد که این موضوع توسط تحلیل پراش اشعه X و میکروآنالیز محلی تأیید شد. بنابراین، تبدیل انتخابی سیدریت به مگنتیت را می‌توان با کنترل زمان تابش مایکروویو به دست آورد. در همین حال، نتایج نشان داد که یک کنسانتره مغناطیسی حاوی ۴۵.۶ درصد آهن با نرخ بازیابی ۹۷.۶ درصد پس از پخت با مایکروویو و سپس جداسازی مغناطیسی تولید شد (Znamenáčková و همکاران، ۲۰۰۵).

Wu و همکاران به بررسی تغییر فاز و خواص مغناطیسی یک سنگ لیمونیتی با عیار ۴۰.۱ درصد آهن از طریق پخت مایکروویوی با افزودن لیگنین قلیایی پرداختند و دریافتند که گوتیت و هماتیت موجود در سنگ به‌طور انتخابی در طول فرآیند پخت مایکروویوی با لیگنین قلیایی به مگنتیت کاهش یافته‌اند. توالی کاهش به این صورت بود: $FeOOH/\alpha-Fe_2O_3 \rightarrow \gamma$ $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ ، که این امر منجر به مغناطیس‌سازی مؤثر سنگ لیمونیتی شد (Wu و همکاران، ۲۰۱۷).

Rath و همکاران اثرات پخت با میکروویو و پخت مرسوم را بر جداسازی مغناطیسی یک سنگ هماتیت پیچیده هندی با عیار ۵۷ درصد آهن مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مسیر پخت در کوره (روش مرسوم) منجر به تولید کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۳ تا ۶۴ درصد آهن با بازیابی وزنی ۸۸ تا ۹۰ درصد شد، در حالی که پخت با میکروویو کنسانتره‌ای با عیار ۶۲ تا ۶۳ درصد آهن با بازیابی وزنی ۸۴ تا ۸۵ درصد تولید کرد. با این حال، پخت با میکروویو این پتانسیل را داشت که محصولی با کیفیت مشابه در مدت زمان کوتاه‌تر و با تولید کمتر محصولات ناخواسته مانند فایالیست نسبت به پخت مرسوم تولید کند (Rath و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۲ عملکرد فرآوری برخی از سنگ‌های آهن دشوار با استفاده از پخت مغناطیسی تعلیقی در مقیاس پایلوت و سپس جداسازی مغناطیسی را نشان می‌دهد.

برای این سنگ‌ها، عیار آهن می‌تواند به بیش از ۶۰ درصد افزایش یابد و بازیابی آهن بیش از ۸۵ درصد باشد با استفاده از پخت مغناطیسی تعلیقی و سپس جداسازی مغناطیسی با شدت پایین (SMR-LIMS).

Zhang و همکاران یک آزمایش پایلوت پخت مغناطیسی تعلیقی برای فرآوری سنگ آهن دیرگداز از معدن جینگ‌تیه‌شان انجام دادند. نتایج نشان داد که با شرایط مناسب پخت - دمای پخت ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد، جریان CO 4.0 متر مکعب در ساعت، جریان N₂ 2.0 متر مکعب در ساعت و نرخ تغذیه ۱۰۰ کیلوگرم در ساعت - یک کنسانتره آهن با عیار کل ۶۰.۱ درصد و بازیابی آهن ۹۰.۱ درصد به دست آمد.

در مقایسه با تکنیک‌های مرسوم پخت (پخت در کوره عمودی، پخت در کوره دوار و غیره)، پخت با استفاده از تشعشعات میکروویو ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارد و مزایای متعددی از جمله گرمایش سریع، گرمایش بدون تماس، گرمایش انتخابی مواد، گرمایش حجمی و عدم تولید آلودگی را ارائه می‌دهد (Clark و همکاران، ۲۰۰۰). علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده است که گرمایش با استفاده از میکروویو تأثیر قابل توجهی بر خواص مغناطیسی سنگ‌های آهنی مانند هماتیت، پیریت، ایلمنیت و سیدریت دارد.

Omran و همکاران یک مطالعه مقایسه‌ای بین سنگ‌های هماتیت اولیتی پخته نشده و پخته شده با میکروویو انجام دادند. آن‌ها دریافتند که بخشی از Fe³⁺ در هماتیت پس از تابش میکروویو به Fe²⁺ در قالب مگنتیت کاهش می‌یابد که این امر توسط تحلیل‌های XPS و XRD با وضوح بالا تأیید شد. علاوه بر این، عامل احیاکننده برای تبدیل هماتیت به مگنتیت ممکن است کاتولینیت باشد، چرا که قله‌های پراش مشخصه آن در XRD پس از گرمایش با میکروویو ناپدید شد و مغناطیس اشباع سنگ پس از تابش میکروویو از ۰.۵۰ به ۲.۴۸ مو/گرم افزایش یافت (Omran و همکاران، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵).

Barani و همکاران اثر پخت با میکروویو بر خواص مغناطیسی یک نمونه سنگ آهن شامل ۶۴ درصد مگنتیت، ۳۴ درصد هماتیت و ۱ درصد کوارتز را بررسی کردند. نتایج نشان داد که یک دوره طولانی مدت از پخت در میدان میکروویو تأثیر منفی بر خواص مغناطیسی سنگ‌ها دارد و زمان تابش ۶۰ ثانیه برای مغناطیس‌سازی سنگ کافی است. علاوه بر این، افزایش حساسیت مغناطیسی می‌تواند به تبدیل هماتیت ضعیف مغناطیسی به مگنیت فرومغناطیسی ناشی از تابش میکروویو نسبت داده شود (Barani و همکاران، ۲۰۱۱).

Znamenáčková و همکاران تأثیر تابش میکروویو بر تغییر فاز سیدریت را بررسی کردند. با افزایش زمان تابش میکروویو، سیدریت ابتدا به مگنتیت و سپس به وُستیت و در نهایت به آهن فلزی تجزیه شد که این موضوع توسط تحلیل پراش اشعه X و میکروآنالیز محلی تأیید شد. بنابراین، تبدیل انتخابی سیدریت به مگنتیت را می‌توان با کنترل زمان تابش میکروویو به دست آورد. در همین حال، نتایج نشان داد که یک کنسانتره مغناطیسی حاوی ۴۵.۶ درصد آهن با نرخ بازیابی ۹۷.۶ درصد پس از پخت با میکروویو و سپس جداسازی مغناطیسی تولید شد (Znamenáčková و همکاران، ۲۰۰۵).

Wu و همکاران به بررسی تغییر فاز و خواص مغناطیسی یک سنگ لیمونیتی با عیار ۴۰.۱ درصد آهن از طریق پخت میکروویوی با افزودن لیگنین قلیایی پرداختند و دریافتند که گوتیت و هماتیت موجود در سنگ به‌طور انتخابی در طول فرآیند پخت میکروویوی با لیگنین قلیایی به مگنتیت کاهش یافته‌اند. توالی کاهش به این صورت بود: $\text{FeOOH}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ ، که این امر منجر به مغناطیس‌سازی مؤثر سنگ لیمونیتی شد (Wu و همکاران، ۲۰۱۷).

Rath و همکاران اثرات پخت با میکروویو و پخت مرسوم را بر جداسازی مغناطیسی یک سنگ هماتیت پیچیده هندی با عیار ۵۷ درصد آهن مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مسیر پخت در کوره (روش مرسوم) منجر به تولید کنسانتره مغناطیسی با عیار ۶۳ تا ۶۴ درصد آهن با بازیابی وزنی ۸۸ تا ۹۰ درصد شد، در حالی که پخت با میکروویو کنسانتره‌ای با عیار ۶۲ تا ۶۳ درصد آهن با بازیابی وزنی ۸۴ تا ۸۵ درصد تولید کرد. با این حال، پخت با میکروویو این پتانسیل را داشت که محصولی با کیفیت مشابه در مدت زمان کوتاه‌تر و با تولید کمتر محصولات ناخواسته مانند فایالیت نسبت به پخت مرسوم تولید کند (Rath و همکاران، ۲۰۱۶).

با اینکه هیچ‌یک از این تکنیک‌های پخت با استفاده از میکروویو به‌طور موفقیت‌آمیز در مقیاس نیمه‌صنعتی یا صنعتی پیاده‌سازی نشده است، نیاز به تحقیقات گسترده در مقیاس آزمایشگاهی وجود دارد تا این فرآیندها برای کاربردهای عملی امکان‌پذیر شوند. به‌عنوان یک زمینه جدید در فرآوری سنگ‌آهن، گرمایش با میکروویو منحصر به فرد است و با گرمایش مرسوم تفاوت دارد. مزایای برتر آن شامل گرمایش سریع و انتخابی، کاربرد دوستدار محیط زیست و کارایی بالا است. باید توجه بیشتری به تحقیق در مورد پخت مغناطیسی با میکروویو شود تا پیشرفت‌های بیشتری در این زمینه حاصل شود. به‌ویژه، مشکل مقیاس‌پذیری مهندسی فرآیند پخت مغناطیسی با میکروویو برای بهره‌برداری از سنگ‌های آهن دیرگداز باید حل شود. بر اساس تحلیل و بحث‌های فوق، مزایا و معایب کوره‌های مختلف مورد بحث در جدول ۳ نشان داده شده است و ویژگی‌های برجسته فرآیندهای مختلف پخت مغناطیسی در جدول ۴ خلاصه شده است. در مقایسه با سایر روش‌های پخت مغناطیسی، پخت مغناطیسی بستر سیال شده ممکن است مؤثرترین و امیدوارکننده‌ترین رویکرد برای فرآوری سنگ‌های آهن دیرگداز به دلیل مصرف انرژی کمتر، بازیابی بالاتر آهن و مقیاس فرآوری بزرگ‌تر باشد.

Table 3. Merits and demerits of different magnetic reduction roasting furnaces.

Furnaces	Merits	Demerits
Shaft furnace	Handle massive ore with a granularity of 15 mm ~ 75 mm	Low processing capacity (25t/h); Long roasting time (6 ~ 10 h); Chemically heterogeneous roasted ore
Rotary kiln	Roasting and separation performance of iron ores in rotary kiln are better than shaft furnace	Low processing capacity (45t/h); High roasting energy consumption; Clinker ring forming
Flash roasting furnace	High reduction temperature (750 ~ 950°C); Low CO concentration (0 ~ 5 vol.%); Short roasting time (0 ~ 60 s)	Low processing capacity (70t/h); Reductive atmosphere in the reactor is hard to be controlled
Multi-stage circulating fluidized bed	Low reduction temperature (450°C); Low roasting energy consumption (about 36 kgce/t)	Low processing capacity (12t/h); Multi-level fluidized reduction roasting
Suspension roasting furnace	Low reduction temperature (450 ~ 600°C); Large processing capacity (200 t/h); Low roasting energy consumption (<42 kgce/t); Efficient recycling of energy	High CO or H ₂ concentration (>60 vol.%)
Microwave oven	Rapid heating; Non-contact heating; Material-selective heating; Volumetric heating and non-pollution	Currently, it is limited to laboratory research without semi-industrial or industrial applications

Table 4. Salient features of different magnetic reduction roasting process.

Roasting reactor type	Industrial scale level	Ore size/mm	Iron recovery	Energy consumption
Shaft furnace	25t/h	15 ~ 75	~70%	~46 kgce/t
Rotary kiln	45t/h	0 ~ 25	~75%	~60 kgce/t
Fluidized bed	200t/h	0 ~ 0.8	> 85%	~36 kgce/t
Microwave oven	Laboratory scale	-	-	-

۳. نتیجه گیری ها

روش های پخت مغناطیسی شامل پخت در کوره عمودی، پخت در کوره دوار، پخت در بستر سیال شده و پخت با استفاده از مایکروویو هستند. پخت در کوره عمودی به دلیل مصرف بالای انرژی و ظرفیت پردازش کم به تدریج کنار گذاشته می شود و مشکل اصلی پخت در کوره دوار، تشکیل رسوب درون کوره است که بر بازده منابع آهن تأثیر می گذارد و کاربرد صنعتی آن را محدود می کند. پخت مغناطیسی تعلیقی (بستر سیال شده) به عنوان مؤثرترین و امیدوارکننده ترین فناوری به رسمیت شناخته شده است، به دلیل راندمان واکنش بالا، مصرف انرژی کم و ظرفیت پردازش بزرگ. علاوه بر این، یک خط تولید صنعتی با ظرفیت ۱.۶۵ میلیون تن در سال برای فرآوری سنگ اسپکولاریت ساخته شده است.

- Barani, K., Koleini, S. J., and Rezaei, B., 2011, "Magnetic properties of an iron ore sample after microwave heating." *Separation and Purification Technology*, 76(3). pp. 331–336. doi:10.1016/j.seppur.2010.11.001.
- Boehm, A., Boehm, M., and Kogelbauer, A., 2014, "Neutrons for mineral processing—thermo diffractometry to investigate mineral selective magnetizing flash roasting." *Chemie Ingenieur Technik*, 86(6). pp. 883–890. doi:10.1002/cite.201400024.
- Chai, T., Ding, J., and Wu, F., 2011, "Hybrid intelligent control for optimal operation of shaft furnace roasting process." *Control Engineering Practice*, 19(3). pp. 264–275. doi:10.1016/j.conengprac.2010.05.002.
- Chen, W., Yu, Y., Feng, Z., Lu, X., Zhao, Q., and Liu, X., 2017, "Six hundred thousand t/a refractory siderite flash magnetizing roasting complete sets technique and equipment." *Metal Mine*, 3. pp. 54–58. (In Chinese).
- Chun, T. J., Zhu, D. Q., and Pan, J., 2015, "Simultaneously roasting and magnetic separation to treat low grade siderite and hematite ores." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(4). pp. 223–226. doi:10.1080/08827508.2014.928620.
- Clark, D. E., Folz, D. C., and West, J. K., 2000, "Processing materials with microwave energy." *Materials Science and Engineering: A*, 287(2). pp. 153–158. doi:10.1016/S0921-5093(00)00768-1.
- Dhupe, A. P., and Gokarn, A. N., 1990, "Studies in the thermal decomposition of natural siderites in the presence of air." *International Journal of Mineral Processing*, 28. pp. 209–220. doi:10.1016/0301-7516(90)90043-X.
- Faris, N., Tardio, J., Ram, R., Bhargava, S., and Pownceby, M. I., 2017, "Investigation into coal-based magnetizing roasting of an iron-rich rare earth ore and the associated mineralogical transformations." *Minerals Engineering*, 114. pp. 37–49. doi:10.1016/j.mineng.2017.09.007.
- Flavio, T. D. S., 1992, "Thermodynamic aspects of the roasting processes in the pre-treatment of nickel ferrous garnierites." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 9(1–4). pp. 97–106. doi:10.1080/08827509208952697.
- Gao, P., Yu, J., Han, Y., and Li, Y., 2018, "Investigation on fluidized magnetization roasting of pre-concentrate for Donganshan iron ore." *The 11th CSM Steel Congress, Beijing*. pp. 1–7. (In Chinese)
- Huang, H. J., Hu, Y. H., Yang, F., and Sun, W., 2010, "Study on the technology and mechanism of magnetic roasting and separation of a refractory red iron ore." *Mining and Metallurgical Engineering*, 30 (6). pp. 38–41. (In Chinese).
- Iwasaki, I., and Prasad, M. S., 1989, "Processing techniques for difficult-to-treat ores by combining chemical metallurgy and mineral processing." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 4. pp. 241–276. doi:10.1080/08827508908952639.
- Jena, M. S., Tripathy, H. K., Mohanty, J. K., Mohanty, J. N., Das, S. K., and Reddy, P. S. R., 2015a, "Roasting followed by magnetic separation: a process for beneficiation of titano-magnetite ore." *Separation Science and Technology*, 50(8). pp. 1221–1229. doi:10.1080/01496395.2014.965834.
- Jena, S. K., Sahoo, H., Rath, S. S., Rao, D. S., Das, S. K., and Das, B., 2015b, "Characterization and processing of iron ore slimes for recovery of iron values." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(3). pp. 174–182. doi:10.1080/08827508.2014.898300.
- Kissinger, H. E., McMurdie, H. F., and Simpson, B. S., 1956, "Thermal decomposition of manganous and ferrous carbonates." *Journal of the*

American Ceramic Society, 39. pp. 168–172. doi:10.1111/jace.1956.39. issue-5. Lei, C., Yan, B., Chen, T., and Xiao, X. M., 2017, “Recovery of metals from the roasted lead-zinc tailings by magnetizing roasting followed by magnetic separation.” *Journal of Cleaner Production*, 158. pp. 73–80. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.164. Li, C., Sun, H., Bai, J., and Li, L., 2010, “Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting.” *Journal of Hazardous Materials*, 174(1–3). pp. 71–77. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.09.018. Li, W. B., Han, Y. X., Liu, X., Shan, Y., and Li, Y. J., 2019, “Effect of fluidized magnetizing roasting on iron recovery and transformation of weakly magnetic iron mineral phase in iron tailings.” *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. doi:10.5277/ppmp19010. Li, Y., and Zhu, T., 2012, “Recovery of low grade haematite via fluidised bed magnetising roasting: investigation of magnetic properties and liberation characteristics.” *Ironmaking & Steelmaking*, 39(2). pp. 112–120. doi:10.1179/1743281211Y.0000000071. Li, Y. J., Wang, R., Han, Y. X., and Wei, X. C., 2015, “Phase transformation in suspension roasting of oolitic hematite ore.” *Journal of Central South University*, 22(12). pp. 4560–4565. doi:10.1007/s11771-015-3006-8. Liu, X., Yu, Y., Hong, Z., Peng, Z., Li, J., and Zhao, Q., 2017, “Development and application of packaged technology for flash (fluidization) magnetizing roasting of refractory weakly magnetic iron ore.” *Mining and Metallurgical Engineering*, 37(2). pp. 40–45. (In Chinese). Lu, S., Ding, J., and Liu, L., 2015, “Dynamic simulation of shaft furnace roasting process with metsim.” *CIESC Journal*, 66(01). pp. 244–250. (In Chinese). Luo, L., Chen, W., Yan, X., and Wang, Q., 2006, “Pilot plant test of magnetization roasting of Daxigou siderite ore by rotary kiln.” *Mining and Metallurgical Engineering*, 26(2). pp. 71–73. (In Chinese). Luo, X., Yin, W., Wang, Y., Sun, C., Ma, Y., and Liu, J., 2016a, “Effect and mechanism of siderite on reverse anionic flotation of quartz from hematite.” *Journal of Central South University of Technology*, 23. pp. 52–58. doi:10.1007/s11771-016-3048-6. Luo, X., Yin, W., Wang, Y., Sun, C., Ma, Y., and Liu, J., 2016b, “Effect and mechanism of dolomite with different size fractions on hematite flotation using sodium oleate as collector.” *Journal of Central South University of Technology*, 23. pp. 529–534. doi:10.1007/s11771-016-3099-8. Luo, X., Wang, Y., Wen, S., Ma, M., Sun, C., Yin, W., and Ma, Y., 2016c, “Effect of carbonate minerals on quartz flotation behavior under conditions of reverse anionic flotation of iron ores.” *International Journal of Mineral Processing*, 152. pp. 1–6. doi:10.1016/j.minpro.2016.04.008. Luo, Y. H., Zhu, D. Q., Pan, J., and Zhou, X. L., 2016d, “Thermal decomposition behaviour and kinetics of Xinjiang siderite ore.” *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 125(1). pp. 17–25. doi:10.1080/03719553.2015.1118213. Omran, M., Fabritius, T., Elmahdy, A. M., Abdel-Khalek, N. A., El-Aref, M., and Elmanawi, A. E. H., 2014, “Effect of microwave pre-treatment on the magnetic properties of iron ore and its implications on magnetic separation.” *Separation and Purification Technology*, 136. pp. 223–232. doi:10.1016/j.seppur.2014.09.011. Omran, M., Fabritius, T., Elmahdy, A. M., Abdel-Khalek, N. A., El-Aref, M., and Elmanawi, A. E. H., 2015, “XPS and FTIR spectroscopic study on microwave treated high phosphorus iron ore.” *Applied Surface Science*, 345. pp. 127–140.

doi:10.1016/j.apsusc.2015.03.209. Peng, T., Gao, X., Li, Q., Xu, L., Luo, L., and Xu, L., 2017, "Phase transformation during roasting process and magnetic beneficiation of oolitic-iron ores." *Vacuum*, 146. pp. 63–73. doi:10.1016/j.vacuum.2017.09.029. Ponomar, V. P., Dudchenko, N. O., and Brik, A. B., 2017, "Reduction roasting of hematite to magnetite using carbohydrates." *International Journal of Mineral Processing*, 164. pp. 21–25. doi:10.1016/j.minpro.2017.05.005. Priestley, R. J., 1957, "Magnetic Conversion of Iron Ores." *Industrial & Engineering Chemistry*, 49(1). pp. 62–64. doi:10.1021/ie50565a027. Raghukumar, C., Tripathy, S. K., and Mohanan, S., 2012, "Beneficiation of Indian high alumina iron ore fines—a case study." *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1(2). pp. 94–100. doi:10.5923/j.mining.20120102.11. Rath, S. S., Dhawan, N., Rao, D. S., Das, B., and Mishra, B. K., 2016, "Beneficiation studies of a difficult to treat iron ore using conventional and microwave roasting." *Powder Technology*, 301. pp. 1016–1024. doi:10.1016/j.powtec.2016.07.044. Rath, S. S., Rao, D. S., Tripathy, S. K., and Biswal, S. K., 2018, "Characterization vis-à-vis utilization of blast furnace flue dust in 10 J. YU ET AL. the roast reduction of banded iron ore." *Process Safety and Environmental Protection*, 117. pp. 232–244. doi:10.1016/j.psep.2018.05.007. Rath, S. S., Sahoo, H., Dhawan, N., Rao, D. S., Das, B., and Mishra, B. K., 2014, "Optimal recovery of iron values from a low grade iron ore using reduction roasting and magnetic Sseparation." *Separation Science and Technology*, 49(12). pp. 1927–1936. doi:10.1080/01496395.2014.903280. Ren, Y., and Yu, Y., 2005, "Present status and development orientation of magnetization roasting technology for refractory red iron ores." *Metal Mine*, 11. pp. 20–23. (In Chinese). Song, Z., Chen, G., Peng, J., Zhao, W., Zhao, Y., and Wang, Z., 2014, "Research process of application of microwave heating in typical metallurgical technology." *Mining and Metallurgy*, 23(3). pp. 57–63. (In Chinese). Srivastava, J. P., and Pathak, P. N., 2000, "Pre-concentration: a necessary step for upgrading tungsten ore." *International Journal of Mineral Processing*, 60(1). pp. 1–8. doi:10.1016/S0301-7516(99)00062-9. Sun, Y. S., Zhu, X. R., Han, Y. X., and Li, Y. J., 2019, "Green magnetization roasting technology for refractory iron ore using siderite as a reductant." *Journal of Cleaner Production*, 206. pp. 40–50. doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.113. Thella, J. S., Mukherjee, A. K., and Srikakulapu, N. G., 2012, "Processing of high alumina iron ore slimes using classification and flotation." *Powder Technology*, 217. pp. 418–426. doi:10.1016/j.powtec.2011.10.058. Uslu, T., Atalay, Ü., and Arol, A. I., 2003, "Effect of microwave heating on magnetic separation of pyrite." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 225(1–3). pp. 161–167. doi:10.1016/S0927-7757(03)00362-5. Uwadiale, G., 1992, "Magnetizing reduction of iron ores." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 11. pp. 1–19. doi:10.1080/08827509208914211. Wang, D., Xue, S., Mao, Y., Li, H., Zhang, S., and Zan, S., 2012, "The industrial production of magnetizing roasting of limonite ore from Eshan, Yunnan in a rotary kiln." *Mining and Metallurgical Engineering*, 32. pp. 226–228. (In Chinese). Waters, K. E., Rowson, N. A., Greenwood, R. W., and Williams, A. J., 2007, "Characterising the effect of microwave radiation on the magnetic properties of pyrite." *Separation and Purification Technology*, 56 (1). pp. 9–17. doi:10.1016/j.seppur.2007.01.011. Wu, F., Cao, Z.,

Wang, S., and Zhong, H., 2017, "Phase transformation of iron in limonite ore by microwave roasting with addition of alkali lignin and its effects on magnetic separation." *Journal of Alloys and Compounds*, 722. pp. 651–661. doi:10.1016/j.jallcom.2017.06.142. Wu, Y., Fang, M., Lan, L., Zhang, P., Rao, K. V., and Bao, Z., 2012, "Rapid and direct magnetization of goethite ore roasted by biomass fuel." *Separation and Purification Technology*, 94. pp. 34–38. doi:10.1016/j.seppur.2012.04.008. Xiao, J., and Zhang, Y., 2012, "Experimental study on rotary magnetic roasting for a high-phosphorus oolitic hematite and limonite ore." *Metal Mine*, 3. pp. 43–47. (In Chinese). Xing, B., Li, L., Shi, C., and Chen, L., 2017, "Magnetic enhancement of coal-pyrite by microwave heating." *Coal Conversion*, 37(4). pp. 10–13. (In Chinese). Xue, S., Zhang, S., Mao, Y., Li, H., Wang, D., and Zhao, H., 2011, "Research on magnetization roasting technology for siderite and limonite in rotary kiln." *The 8th CSM Steel Congress, Shanghai* (In Chinese) Yan, A., Chai, T., and Wang, P., 2008, "Multivariable intelligent optimizing setting method for shaft furnace roasting process." *Journal of System Simulation*, 20(8). pp. 2044–2047. Yan, A., Chai, T., Yu, W., and Xu, Z., 2012, "Multi-objective evaluation-based hybrid intelligent control optimization for shaft furnace roasting process." *Control Engineering Practice*, 20(9). pp. 857–868. doi:10.1016/j.conengprac.2012.05.001. Yao, Y. F., 2012, "Research investigation on the recovery of iron from gold mine tailings by suspended magnetization roasting." *Xi'an University of Architecture and Technology*. pp. 80–86. (In Chinese). Yin, W. Z., Han, Y. X., and Xie, F., 2010, "Two-step flotation recovery of iron concentrate from Donganshan carbonaceous iron ore." *Journal of Central South University of Technology*, 17(4). pp. 750–754. doi:10.1007/s11771-010-0551-z. (In Chinese). Yu, J., Han, Y., Li, Y., and Gao, P., 2017a, "Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation." *International Journal of Mineral Processing*, 168. pp. 102–108. doi:10.1016/j.minpro.2017.09.012. Yu, J., Han, Y., Li, Y., and Gao, P., 2018a, "Experimental study on utilization of crude concentrate from an Anshan-type hematite ore by suspension magnetization roasting–magnetic separation." *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 49(4). pp. 771–778. (In Chinese). Yu, J., Han, Y., Li, Y., and Gao, P., 2018b, "Recovery and separation of iron from iron ore using innovative fluidized magnetization roasting and magnetic separation." *Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy*, 54(1). pp. 21–27. doi:10.2298/JMMB170711050Y. Yu, J., Han, Y., Gao, P., Li, Y., Yuan, S., and Li, W., 2018c, "An innovative methodology for recycling iron from magnetic pre-concentrate of an iron ore tailing." *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54(3). pp. 668–676. Yu, J., Han, Y., Li, Y., Gao, P., and Sun, Y., 2017b, "Separation and recovery of iron from a low-grade carbonate-bearing iron ore using magnetizing roasting followed by magnetic separation." *Separation Science and Technology*, 52(10). pp. 1768–1774. doi:10.1080/01496395.2017.1296867. Yu, Y., and Chen, W., 2010, "Application of flash magnetizing roasting technique in beneficiation of siderite and limonite." *The 2010 International Symposium on Project Management, Sanya*. pp. 13–17. doi:10.3109/10253890.2010.504789. Yu, Y., and Qi, C., 2011, "Magnetizing roasting mechanism and effective ore dressing process for oolitic hematite ore." *Journal of Wuhan University of Technology-Material Science Edition*, 26(2). pp. 176–181. doi:10.1007/s11595-

011-0192-6. Zhang, K., Chen, X. L., Guo, W. C., Luo, H. J., Gong, Z. J., Li, B. W., and Wu, W. F., 2017, "Effects of biomass reducing agent on magnetic properties and phase transformation of Baotou low-grade limonite during magnetizing-roasting." *PloS One*, 12(10). pp. e0186274. doi:10.1371/journal.pone.0186274. Zhang, L., 2011, "Research on the fast magnetic roasting of siderite by semi-industrial test mode." Xi'an University of Architecture and Technology. pp. 65–70. Zhang, X. L., Han, Y. X., Sun, Y. S., and Li, Y. J., 2019, "Innovative utilization of refractory iron ore via suspension magnetization roasting: A pilot-scale study." *Powder Technology*, 352. pp. 16–24. doi:10.1016/j.powtec.2019.04.042. Zhang, Z., 2015, "Process optimization on magnetic roasting of lump iron ore in shaft furnace." *China Metallurgy*, 25(9). pp. 11–14. (In Chinese). Zhao, Q., Xue, J. L., and Chen, W., 2019, "Upgrading of iron concentrate by fluidized-bed magnetizing roasting of siderite to magnetite in CO–H₂–N₂ atmosphere." *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72(5). pp. 1381–1391. doi:10.1007/s12666-019-01636-w. Zhou, J., Zhu, Q., Wang, H., and Ni, W., 2009, "Magnetic roasting of an oolitic hematite and limonite ore in a fluidized bed reactor." *The Chinese Journal of Process Engineering*, 9(2). pp. 307–313. (In Chinese). Zhu, D. Q., Zhao, Q., Qiu, G. Z., Pan, J., Wang, Z. Q., and Pan, C. J., 2010, "Magnetizing roasting-magnetic separation of limonite ores from Anhui province in east China." *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 32(6). pp. 713–718. (In Chinese). Zhu, Q., and Li, H., 2014, "Status quo and development prospect of magnetizing roasting via fluidized bed for low grade iron ore." *CIESC Journal*, 65(7). pp. 2437–2442. (In Chinese). Znamenáčková, I., Lovas, M., Mockovčiaková, A., Jakabský, Š., and Briančin, J., 2005, "Modification of magnetic properties of siderite ore by microwave energy." *Separation and Purification Technology*, 43(2). pp. 169–174. doi:10.1016/j.seppur.2004.11.002. MINERAL PROCESSING AND EXTRACTIVE METALLU

ترجمه شده توسط واحد روابط عمومی گروه شرکت های صنعتی و معدنی عطامتال

صنعت و معدنی
گروه شرکت های