

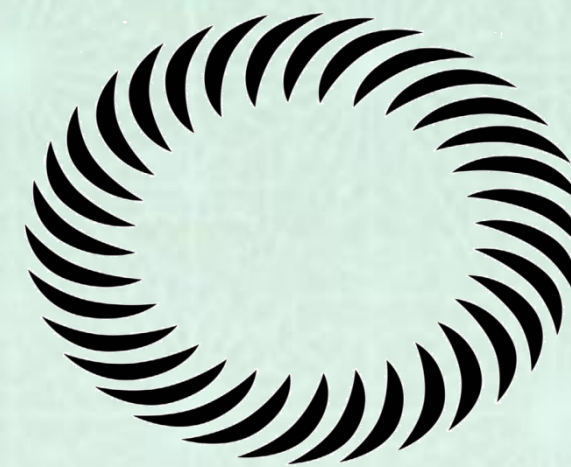


نمایشگاه هفته پژوهش و فناوری
دانشگاه صنعتی همدان
آذر ۱۴۰۴

بازیافت آهنرباهای نئودیمیوم دار با روش سالوومتالورژی

راحله خدابخشی و سعید کریمی

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی همدان
s.karimi@hut.ac.ir



هفته ملی پژوهش و فناوری

چکیده

آهنرباهای NdFeB به دلیل دارا بودن عناصر نادر خاکی مانند Pr، Nd و Dy از اهمیت بالایی در فناوری‌های نوین برخوردارند و به دلیل محدودیت منابع اولیه، بازیافت آن‌ها ضروری است. در این پژوهش، از حلال‌های یوتکتیک عمیق DESs به عنوان یک رویکرد سبز برای لیچینگ انتخابی آهنربای NdFeB استفاده شد. ده نوع DES مبتنی بر کلریدکولین با HBDهای مختلف سنتز گردید و پس از آماده‌سازی نمونه، آزمون لیچینگ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. نتایج نشان داد ترکیبات مبتنی بر اوره، اتیلن‌گلیکول و اسیدلاکتیک کمترین انحلال آهن را ایجاد کرده و در صورت انحلال فلزات نادر خاکی رفتار انتخاب‌پذیرتری نسبت به سایر DESها دارند. در مقابل ترکیبات حاوی PTSA و اگزالیک اسید راندمان بهتری از عنصر آهن نشان دادند که با انحلال تجمعی می‌تواند شرایط بهتری برای انحلال فلزات نادر خاکی ایجاد کند. بنابراین با توجه به رفتار متفاوت آهن و فلزات نادر خاکی می‌توان براساس شرایط مورد نظر، از HBDهای مختلف برای بازیابی آهنرباهای NdFeB بهره گرفت. کلمات کلیدی: عناصر نادر خاکی؛ NdFeB؛ سالوومتالورژی؛ حلال‌های یوتکتیک عمیق؛ لیچینگ.

مقدمه

عناصر نادر خاکی مانند Pr، Nd و Dy به دلیل نقش اساسی در ساخت آهنرباهای دائمی NdFeB، برای بسیاری از فناوری‌های پیشرفته اهمیت حیاتی دارند [۱]. با توجه به محدودیت منابع اولیه و هزینه‌های زیست‌محیطی استخراج معدنی، بازیافت آهنرباهای مستعمل به عنوان یک راهکار پایدار مطرح شده است. روش‌های مرسوم هیدرومتالورژی اگرچه کارآمدند، اما به دلیل خوردگی بالا و تولید پسماند اسیدی، با چالش‌های زیست‌محیطی همراه هستند [۲]. حلال‌های یوتکتیک عمیق (DESs) به عنوان جایگزین‌های سبز، پایدار و کم‌خوردنده معرفی شده‌اند که امکان لیچینگ انتخابی عناصر نادر را فراهم می‌کنند. ارزیابی رفتار این حلال‌ها در حل‌سازی آهن و استخراج REEs می‌تواند مسیر توسعه یک فرآیند کارآمد و سازگار با محیط‌زیست را برای بازیافت NdFeB هموار سازد [۳].

اهداف و روش پژوهش

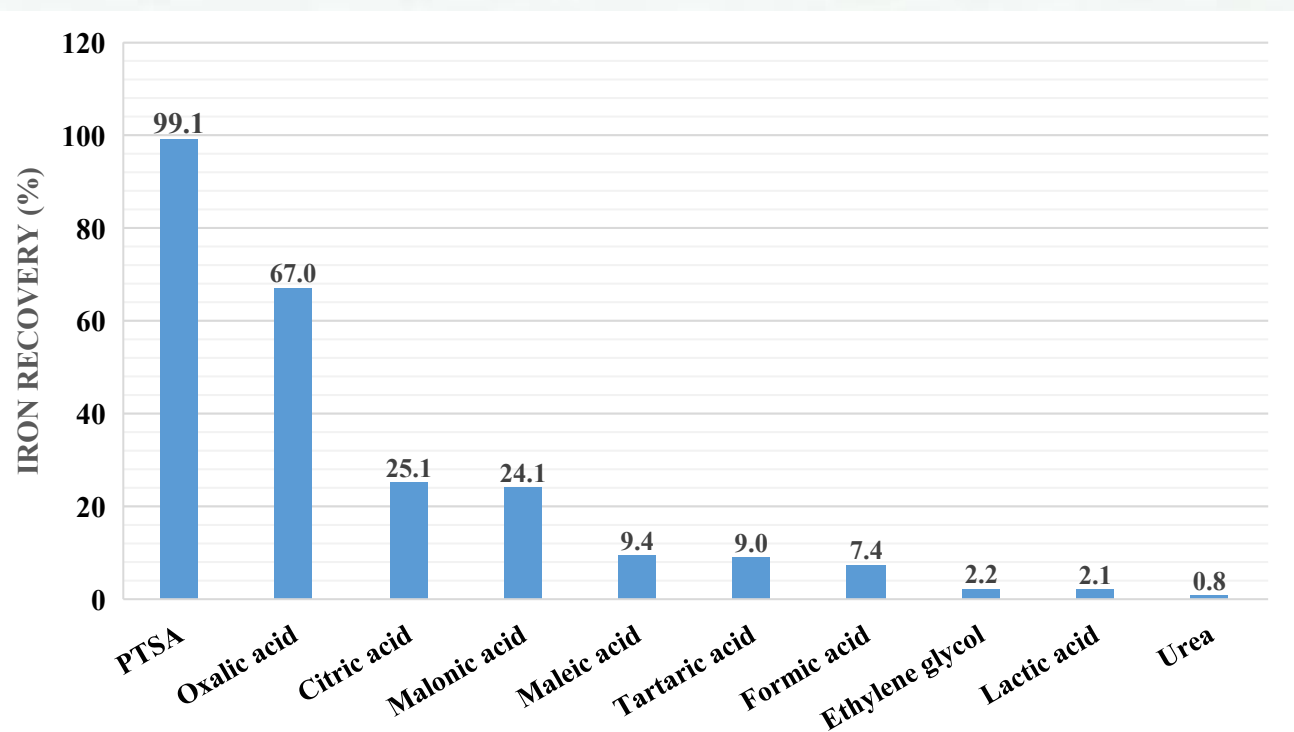
هدف این پژوهش بررسی کارایی حلال‌های یوتکتیک عمیق DESs در لیچینگ سبز و انتخابی آهنربای NdFeB و ایجاد شرایط مناسب برای استخراج عناصر نادر خاکی با کمترین انحلال آهن است. برای این منظور، ده نوع DES مبتنی بر کولین کلراید با HBDهای مختلف سنتز و رفتار آن‌ها از نظر میزان انحلال آهن و قابلیت استخراج انتخابی REEs مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله آماده‌سازی، کولین کلراید به مدت سه ساعت در آون خشک شد و سایر HBDها نیز متناسب با نیاز خشک‌سازی شدند. سنتز DESها با نسبت مولی ۱:۱ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و طی حدود ۱/۵ ساعت انجام شد تا مخلوط به فاز یکنواخت برسد. آهنربای NdFeB پس از حذف خاصیت مغناطیسی آن و فرآیند آسیاکاری مورد استفاده قرار گرفت. برای آزمون لیچینگ، ۰/۱ گرم از پودر آهنربا به هر DES افزوده شد و نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تحت آزمون قرار گرفتند. پس از پایان واکنش، ۵ سی‌سی آب مقطر به محلول افزوده شد و محلول حاصل پس از فیلتراسیون برای آنالیز با دستگاه جذب اتمی ارسال گردید. نتایج حاصل، مبنای ارزیابی انتخاب‌پذیری DESها و تعیین ترکیبات کارآمدتر برای استخراج عناصر نادر خاکی قرار گرفت.

یافته‌های پژوهش

نتایج آنالیز جذب اتمی نشان داد که نوع HBD به کاررفته در ساخت DES تأثیر چشمگیری بر میزان انحلال آهن از آهنربای NdFeB دارد؛ عاملی که مستقیماً بر انتخاب‌پذیری استخراج عناصر نادر تأثیر می‌گذارد. در میان ده سیستم بررسی‌شده، ترکیبات مبتنی بر اوره، اتیلن‌گلیکول و اسیدلاکتیک کمترین مقدار آهن حل‌شده را نشان دادند به ترتیب ۰/۸، ۲/۲ و ۲/۱ درصد که بیانگر رفتار قدرت ضعیف‌تر آن‌ها نسبت به انحلال آهنرباست. این مقدار پایین آهن، شرایط مطلوبی برای رسوب‌دهی انتخابی عناصر نادر ایجاد می‌کند، زیرا حضور کم آهن در محلول مانع از تشکیل رسوبات مزاحم می‌شود. اما باید این بحث را هم در نظر گرفت که فلزات نادر خاکی نیز در این شرایط احتمالاً انحلال کمتری از خود نشان دهند و به همین دلیل ناچار به انحلال تجمعی همه عناصر موجود در مگنت شویم.

در مقابل، برخی DESهای دو جزئی مانند ChCl-PTSA و ChCl-oxalic acid به ترتیب با راندمان ۹۹/۱ و ۶۷/۰ درصد بیشترین میزان انحلال آهن را ایجاد کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب دارای PTSA رفتار خورنده‌تری نسبت به فاز آهنی دارند و برای فرآیندهایی که نیازمند انحلال تجمعی است، گزینه بهتری خواهد بود.

به طور کلی، الگوی مشاهده‌شده نشان می‌دهد DESهایی که دارای گروه‌های هیدروژنی پایدارتر و کم‌اسیدی‌تر هستند، تمایل کمتری به انحلال زیرساخت آهنی NdFeB داشته و در نتیجه گزینه‌های مناسب‌تری برای استخراج انتخابی REEs محسوب می‌شوند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب ترکیب مناسب HBD/HBA را در طراحی فرآیندهای سبز بازیافت عناصر نادر به خوبی نشان می‌دهد و مسیر را برای توسعه روش‌های کارآمدتر فراهم می‌سازد.



شکل ۱. بازیابی آهن و مجموعه حلال‌های یوتکتیک عمیق DESs تهیه‌شده از کولین کلراید و ۱۰ ترکیب HBD مختلف بر اساس نسبت مولی ۱:۱ مورد استفاده در آزمون لیچینگ NdFeB.

راهبردهای پیشنهادی

به منظور بهبود استخراج انتخابی REEs، پیشنهاد می‌شود از DESهای کم‌خورنده مانند ChCl-Urea، ChCl-EG و ChCl-Lactic استفاده شود و شرایط لیچینگ برای حداقل‌سازی انحلال آهن بهینه گردد. در شرایطی که راندمان عناصر نادر خاکی پایین باشد، بهتر است از گزینه انحلال تجمعی با ترکیبات PTSA یا اگزالیک اسید استفاده گردد تا همه عناصر حل گردد و در ادامه با تنظیم شرایط محلول، رسوب انتخابی این عناصر را انجام داد. بنابراین ترکیبات یوتکتیک عمیق می‌توانند راهکارهای کاملاً سبز در اختیار متخصصان این حوزه بگذارند.

منابع

- [1] A. Kumari and S. K. Sahu, "A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 317, no. February, p. 123527, 2023.
- [2] A. T. Varghese, C. G. Malar, M. Seenuvasan, and V. Jayapradha, "Neodymium recovery from permanent magnets: A breakthrough approach using Deep Eutectic Solvents and Mica," *J. Mol. Liq.*, vol. 394, no. September 2023, p. 123690, 2024.
- [3] S. Heo, R. Kim, H. S. Yoon, C. J. Kim, K. W. Chung, and S. Lee, "Effect of pretreatment methods on the selective leaching of rare earth elements from NdFeB permanent magnets using deep eutectic solvents," *Hydrometallurgy*, vol. 226, no. March, p. 106284, 2024.

تایید استاد راهنما

نام و امضا استاد راهنما: سعید کریمی

تایید تحصیلات تکمیلی:

تایید امور پژوهشی: