用超声强化盐酸优溶法浸出钕铁硼废料中的稀土

吴　琦[1,2]，樊文军[1,2,3]，张成业[1,2]，张成成[1,2]，张晓伟[1,2,3]，刘中兴[1,2,3]

(1. 内蒙古科技大学 稀土产业学院(稀土工程技术学院)，内蒙古 包头　014010；
2. 轻稀土资源全周期绿色高效开发利用教育部重点实验室(内蒙古科技大学)，内蒙古 包头　014010；
3. 内蒙古自治区工程研究中心，内蒙古 包头　014010)

摘要：针对钕铁硼废料盐酸优溶法浸出时间长、盐酸消耗量大等问题，研究采用超声强化盐酸优溶法从中浸出稀土。考察了超声波功率、盐酸浓度、温度、液固体积质量比、浸出时间、粒径等因素对稀土浸出率的影响，确定了最佳的浸出参数。结果表明：超声辅助可显著强化浸出过程，在超声波功率 60 W、盐酸浓度 2 mol/L、温度 85 ℃、液固体积质量比 10 mL/1 g、浸出时间 105 min、粒径－0.074 mm 最佳条件下，稀土浸出率达 97.94%，比最佳条件下的常规盐酸优溶法的稀土浸出率提高 8 个百分点。该法是一种高效、可行的稀土回收绿色工艺，可为钕铁硼废料的资源化利用提供一种新途径。

关键词：超声强化；钕铁硼废料；盐酸优溶法；稀土；绿色高效；浸出

中图分类号：TF845　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2617(2026)02-0208-07

DOI：10.13355/j.cnki.sfyj.2026.02.010

稀土是科技发展的重要支撑材料，也是重要的战略资源。目前，我国稀土生产量和出口量位居世界首位，能满足全球约 90%的稀土元素消费需求[1]。稀土及其化合物因具有独特的物理和化学性能，广泛应用于航空航天、国防工业、智能制造等领域。随着经济的不断增长，稀土用量也在持续攀升。钕铁硼永磁材料的制备离不开稀土[2-3]，因此产生的钕铁硼废料成为了重要的稀土二次资源。这些废料不仅是 Nd 元素的重要回收来源之一，更是 Dy 元素的唯一回收途径[4]。对钕铁硼废料进行高效回收利用，不仅有助于环境保护，减少资源浪费，还能为稀土资源的可持续发展创造良好的条件[5]。

目前，钕铁硼废料中稀土的回收方法主要包括火法[6]和湿法[7]。火法要求在高温下进行，相对湿法存在能耗高、金属回收率较低等缺点，因此限制了其应用。湿法主要包括有机酸浸法、碱分解法、盐酸优溶法等。有机酸浸法能耗低、环境友好，但浸出率较低；盐酸优溶法的稀土浸出率较高，但能耗也较高，且易造成环境污染；超声强化法是近年来发展起来的绿色浸出工艺，具有酸耗低、浸出时间短等优点，该方法在提取有色金属过程中可有效缩短反应时间，且金属浸出率可提高 20%～30%。目前，超声强化法虽广泛应用于有色金属领域，但将其用于强化盐酸优溶法提取稀土元素鲜有报道。

为降低钕铁硼废料浸出稀土的能耗、缩短反应时间、提高稀土浸出率，试验研究了用超声强化盐酸优溶法浸出钕铁硼废料中的稀土。通过 XRD、SEM 对原料及浸出渣进行了分析表征，探讨了盐酸浓度、温度、液固体积质量比、粒径对浸出率的影响，并对比分析了超声强化浸出与常规盐酸优溶法回收钕铁硼废料中稀土的效果，验证了超声波辅助工艺在稀土高效提取的可行性。

收稿日期：2025-10-27；**修订日期**：2025-12-9

基金项目：国家自然科学基金项目(51964039)；内蒙古自治区自然科学基金重点联合基金项目(2025ZDLH011)；自治区直属高校基本科研业务费项目(2024XKJX011)；科技厅-重点研发和成果转化-科技支撑黄河流域生态保护和高质量发展项目(2025YFHH0018)；科技厅-内蒙古自然科学基金-重点联合基金项目(2025ZDLH011)；一流学科科研专项-重点项目(YLXKZX-NKD-002)。

第一作者简介：吴琦(2000—)，男，硕士，主要研究方向为稀土绿色冶金。

通信作者简介：樊文军(1976—)，男，硕士，副教授，主要研究方向为钕铁硼绿色回收。E-mail：fanwenjun04@sohu.com。

1　试验部分

1.1　试验原料及试剂

钕铁硼废料：取自内蒙古包头某磁材公司，粉碎至 200 目以下，元素组成见表 1。将废料破碎过筛后在马弗炉中于 800 ℃下焙烧 2 h，用 XRD 分析物相组成，结果如图 1 所示。由表 1 可知：钕铁硼废料中，钕、镨、钆、镝分别占总废料的 20.82%、6.49%、2.08%、2.1%，钇、镧、铈等均不足 0.1%。由图 1 看出，废料主要由 Fe_2O_3、$NdFeO_3$、$NdBO_3$、Nd_2O_3 组成。

表 1　钕铁硼废料的元素组成

Table 1　Composition of NdFeB waste elements　%

Fe	B	Al	Co	Nd	Pr
63.02	0.94	0.48	1.46	20.82	6.49
Gd	Dy	Y	La	Ce	
2.08	2.1	<0.1	<0.1	<0.1	

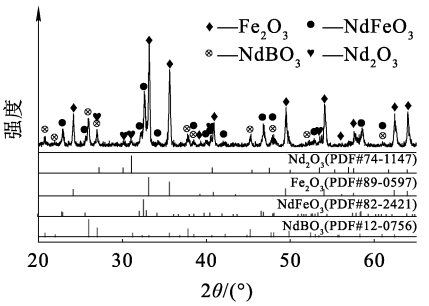


图 1　焙烧后钕铁硼废料的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of NdFeB waste after roasting

试验所用盐酸、氨水、草酸、乙二胺四乙酸钠等试剂均为分析纯，来自西龙科学股份有限公司、天津市华盛化学试剂有限公司等厂家；溶液的配制用水均为实验室制备的超纯水。

1.2　试验原理及方法

盐酸的酸性和配位能力较强，在适宜的热力学与动力学条件下，可将钕铁硼废料中的稀土元素、铁及其他元素浸出至溶液中，主要化学反应如式(1)、(2)所示。在浸出过程中引入超声波，通过微射流与机械振动作用，能有效破坏颗粒表面的钝化层；同时，超声空化作用产生的局部高温也能为反应提供额外动力，达到强化浸出的目的。

$$RE_2O_3+6H^+=\!=\!=2RE^{3+}+3H_2O \quad (1)$$

$$Fe_2O_3+6H^+=\!=\!=2Fe^{3+}+3H_2O \quad (2)$$

将 10 g 焙烧后的钕铁硼废料置于烧杯中，加入一定浓度的盐酸溶液，充分混合，烧杯口密封后置于恒温水浴锅中，控制搅拌速度为 500 r/min，设置不同温度、时间进行超声强化浸出。反应结束后，用抽滤机进行固液分离。滤液定容至 500 mL后，加入氢氧化铵调节 pH 至 3.5 左右[8]，促使 $Fe(OH)_3$ 沉淀生成，过滤后得 $RECl_3$ 溶液，采用乙二胺四乙酸滴定法(EDTA)测定浸出液中稀土离子浓度，按公式(3)、(4)[9]分别计算稀土、铁浸出率。

$$\eta_1=\frac{mw_1-\rho_1V}{mw_1}\times 100\% \quad (3)$$

式中：η_1—稀土浸出率，%；ρ_1—浸出液中稀土质量浓度，g/L；V—浸出液体积，L；m—钕铁硼废料质量，g；w_1—钕铁硼废料中稀土元素质量分数，%。

$$\eta_2=\frac{mw_2-\rho_2V}{mw_2}\times 100\% \quad (4)$$

式中：η_2—铁浸出率，%；ρ_2—浸出液中铁质量浓度，g/L；w_2—钕铁硼废料中铁元素质量分数，%。

2　试验结果与讨论

2.1　各因素对超声波强化浸出稀土的影响

2.1.1　超声波功率对稀土浸出率的影响

在浸出温度 85 ℃、液固体积质量比 10/1(mL/g，下同)、浸出时间 60 min、盐酸浓度2 mol/L、原料粒径 −0.074 mm 条件下，考察超声波功率对稀土浸出率的影响，结果如图 2 所示。

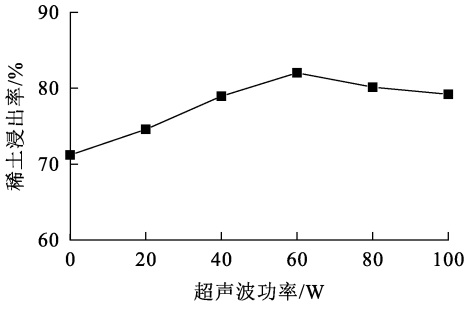


图 2　超声波功率对稀土浸出率的影响

Fig. 2　Effect of ultrasonic power on rare earth leaching rate

由图 2 看出：超声波功率从 0 W 增至 60 W 时，稀土浸出率由 71.21% 升至 82.04%；功率继续增至 100 W 时，稀土浸出率降至 79.21%。这

种非线性响应源于超声能量传导的相变机制：特定频率的机械振动波在液态介质内形成交替压缩-拉伸应力场，诱发直径约 3～200 μm 的瞬时微泡群，空化泡的产生与破裂使颗粒交替压缩与膨胀形成压力差，在溶液中产生机械效应[10]。根据瞬态极端物理场理论，空化泡在高速坍缩阶段产生大于 5 000 K 的局部热点和大于 50 MPa 的冲击压强。这些作用能够破坏矿物结构、促进传质、降低扩散阻力。过高的功率使空化气泡数量过多，声波能量被气泡散射或吸收，反而降低有效空化强度(声能传递效率下降)。在空化泡爆裂的瞬间会破坏钕铁硼颗粒表面的钝化层，使得内部的稀土暴露出来，提高稀土浸出率。因此，选择适宜的超声波功率为 60 W。

2.1.2 浸出时间对稀土浸出率的影响

在浸出温度 85 ℃、液固体积质量比 10/1、原料粒径－0.074 mm、盐酸浓度 2 mol/L、超声波功率 60 W 条件下，考察浸出时间对稀土浸出率的影响，结果如图 3 所示。

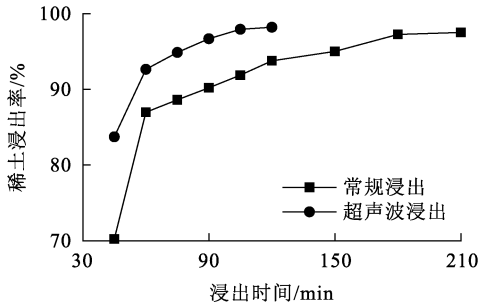


图 3 浸出时间对稀土浸出率的影响

Fig. 3 Effect of leaching time on rare earth leaching rate

由图 3 可知：在有无超声波引入时，稀土浸出率均先升高后趋于稳定；但超声波浸出 105 min 时，稀土浸出率达 97.94%，而常规浸出 180 min 时，稀土浸出率才能达 97.26%。可见稀土浸出率同时达 97%左右时，超声波浸出比常规浸出缩短 75 min。因此，选择适宜的超声波浸出时间为 105 min，常规浸出时间为 180 min。

2.1.3 盐酸浓度对稀土浸出率的影响

在浸出温度 85 ℃、液固体积质量比 10/1、原料粒径－0.074 mm 条件下，分别设定常规浸出时间 180 min、超声波浸出时间 105 min(超声波功率 60 W)，考察不同盐酸浓度下常规浸出与超声波浸出对稀土浸出率的影响，结果如图 4 所示。

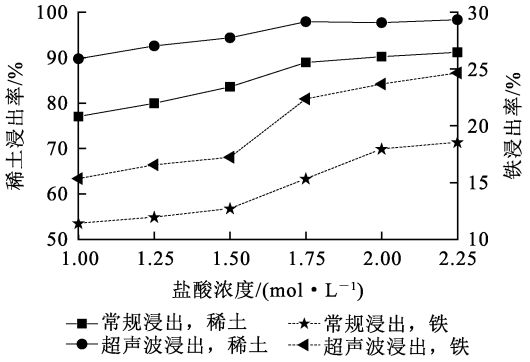


图 4 不同盐酸浓度下常规浸出与超声浸出的浸出效果对比

Fig. 4 Comparison of conventional leaching and ultrasonic leaching effects at different hydrochloric acid concentrations

由图 4 可知：在常规浸出和超声波浸出下，盐酸浓度从 1.00 mol/L 升至 2.00 mol/L 时，稀土浸出率均呈上升趋势；继续增大盐酸浓度，稀土浸出率变化不大。这主要是由于超声波相当于磁力搅拌，能使 H^+ 与金属离子充分接触，且超声波的引入会产生振动，加速离子之间的碰撞，有助于钕铁硼表面钝化层裂开，使 H^+ 进入钕铁硼内部，进而加快反应速率。随盐酸浓度升高，会有更多 H^+ 与铁离子反应，使铁浸出率升高，但其在常规浸出和超声波浸出下都低于 25%。综合考虑经济成本等因素，选择适宜的盐酸浓度为 2 mol/L。

2.1.4 浸出温度对稀土浸出率的影响

在盐酸浓度 2 mol/L、液固体积质量比10/1、原料粒径－0.074 mm 条件下，分别设定常规浸出时间 180 min、超声波浸出时间 105 min(超声波功率 60 W)，考察不同浸出温度下常规浸出与超声波浸出对稀土浸出率的影响，结果如图 5 所示。

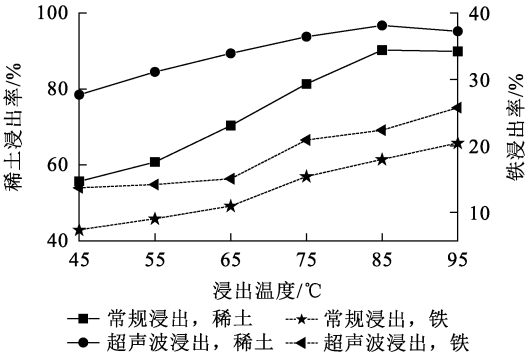


图 5 不同浸出温度下常规浸出与超声浸出的浸出效果对比

Fig. 5 Comparison of conventional leaching and ultrasonic leaching effects at different leaching temperatures

由图 5 可知：在常规浸出下，当温度从 45 ℃升至 85 ℃时，稀土浸出率从 65.74% 升至 97.26%；当温度继续升至 95 ℃时，稀土浸出率变化不明显，这是由于升高温度加速了分子之间的碰撞概率，经计算可知，反应温度为 85 ℃时，浸出反应的表观活化能为 32.75 kJ/mol，指前因子 A 为1.949 9 s^{-1}，该反应浸出过程控制环节为混合控制；相同条件下，超声波浸出的稀土浸出率高于常规浸出，这是由于超声波在固液反应过程中会产生热效应，加速局部温度升高，加速反应进行，此外在超声空化[11-12]作用下，反应过程中会产生大量气泡，而气泡爆裂的瞬间也会产生大量的热，弥补反应过程中所短缺的热量，加快反应速率，但温度过高，会增大能耗，增加成本；随温度升高，常规浸出和超声波浸出的铁浸出率均有小幅升高，但最大值都低于 26%。综合考虑，确定适宜的浸出温度为 85 ℃。

2.1.5　液固体积质量比对稀土浸出率的影响

在盐酸浓度 2 mol/L、浸出温度 85 ℃、原料粒径－0.074 mm 条件下，分别设定常规浸出时间 180 min、超声波浸出时间 105 min（超声波功率 60 W），考察不同液固体积质量比下常规浸出与超声波浸出对稀土浸出率的影响，结果如图 6 所示。

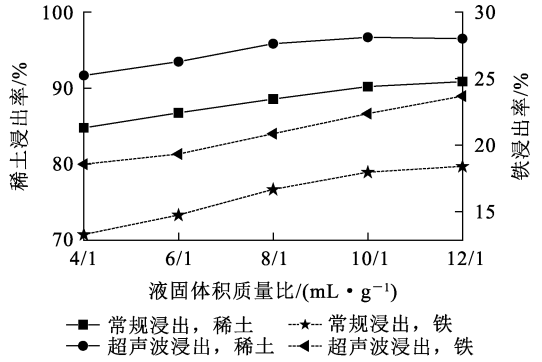


图 6　不同液固体积质量比下常规浸出与超声浸出的浸出效果对比

Fig. 6　Comparison of conventional leaching and ultrasonic leaching effects at different liquid volume to solid mass ratios

由图 6 可知：在超声波浸出下，液固体积质量比从 4/1 增至 10/1 时，稀土浸出率从 91.38% 升至 97.26%；当液固体积质量比增至 12/1 时，稀土浸出率升至 97.96%，升幅较小。这是因为液固体积质量比较低时，溶液黏度较大，不利于固-液相之间传质；随液固体积质量比增大，溶液黏度降低，有利于溶质溶解，促进反应进行；当液固体积质量比增至一定值时，溶质已基本溶解完全，稀土浸出率趋于稳定，变化不大。

相同条件下，超声波浸出的稀土浸出率高于常规浸出，这是由于在超声振动作用下，钕铁硼废料能与盐酸溶液接触更加均匀，传质速度更快，更有利于反应充分进行；随液固体积质量比增大，常规浸出和超声波浸出的铁浸出率仅有小幅升高，最大值都低于 25%。综合考虑，确定适宜的液固体积质量比为 10/1。

2.1.6　原料粒径对稀土浸出率的影响

在盐酸浓度 2 mol/L、浸出温度 85 ℃、液固体积质量比 10/1 条件下，分别设定常规浸出时间 180 min、超声波浸出时间 105 min（超声波功率 60 W），考察不同原料粒径下常规浸出与超声波浸出对稀土浸出率的影响，结果如图 7 所示。

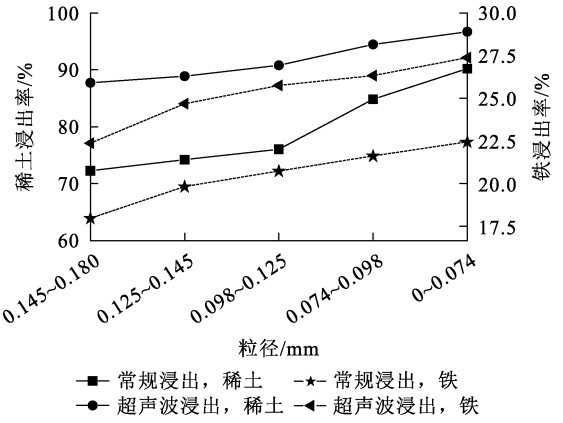


图 7　不同原料粒径下常规浸出与超声浸出的浸出效果对比

Fig. 7　Comparison of conventional leaching and ultrasonic leaching effects at different particle sizes of raw material

由图 7 可知：在超声波浸出下，当粒径由 0.145～0.180 mm 减小至 0～0.074 mm 时，稀土浸出率从 83.75% 升至 97.26%。这是由于钕铁硼废料颗粒较大时，其表面与盐酸溶液的接触面积较小，随粒径减小，会有更多废料暴露在盐酸溶液中，使盐酸更易渗透至颗粒内部，有利于反应进行，提高稀土浸出率。

相同条件下，超声波浸出的稀土浸出率高于常规浸出，这是由于在超声空化效应下会产生大量空化泡，空化泡爆裂瞬间会对颗粒造成一定冲击，使

粒径进一步减小，此外还可能使颗粒表面产生裂缝，促进盐酸溶液进入颗粒内部，加速反应进行，提高稀土浸出率；超声条件下，随粒径变大，Fe 浸出率由 22.37%升至 27.38%，这是由于颗粒较大时，稀土元素大多被 Fe_2O_3 包裹，盐酸较难渗入颗粒内部，会优先与铁反应所致。综合考虑，原料粒径选择为 0～0.074 mm(－0.074 mm)较为合适。

2.2 浸出渣的表征

2.2.1 XRD 表征

在浸出温度 85 ℃、盐酸浓度为 2 mol/L、液固体积质量比 10/1、原料粒径－0.074 mm 条件下，分别设定常规浸出时间 180 min、超声波浸出时间 105 min(超声波功率 60 W)，超声波浸出渣与常规浸出渣的 XRD 分析结果如图 8 所示，粒径分布见表 2。

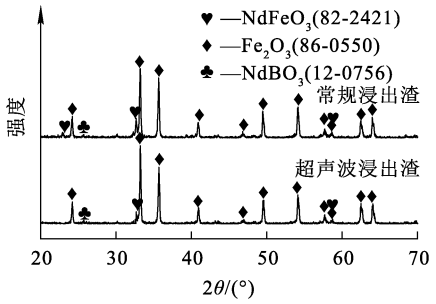


图 8 超声波浸出渣与常规浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of ultrasonic leaching residue and conventional leaching residue

表 2 不同浸出法所得浸出渣的粒径分布

Table 2 Particle sizes distribution of leaching residue obtained by different leaching methods

样品	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm
焙烧料	3.97	14.0	61.9
常规浸出渣	4.03	14.2	61.7
超声浸出渣	4.16	14.9	62.1

由图 8 可知：超声波浸出渣图谱中的 Fe_2O_3 对应的峰比常规浸出渣的更加尖锐，且 $NdFeO_3$ 和 $NdBO_3$ 对应的峰更低，说明在超声过程中流失到浸出渣的稀土更少；浸出渣中含量最大的是 Fe_2O_3，这是由于浸出过程中盐酸优先与稀土离子反应，只有少量 Fe_2O_3 与盐酸溶液发生反应，而大部分留在渣中所致。

由表 2 看出：浸出渣与焙烧料中颗粒粒径分布存在明显差异。具体而言，浸出渣中粒径处于 8～25 μm 范围的颗粒数量明显少于焙烧料；而浸出渣中粒径在 3～8 μm、25～48 μm范围内的颗粒数量则多于焙烧料。此外，对于 55～153 μm 粒径范围的颗粒，常规浸出得到的浸出渣中颗粒粒径大于焙烧料粒径，导致热活化处理的 NdFeB 废料在酸性介质中发生晶格重构，微米级颗粒形成异质界面结合，引发次级颗粒的异相团聚，而超声波空化效应产生的微射流可使团聚体解离，通过机械化学作用实现颗粒离散化。

2.2.2 SEM 表征

在超声强化浸出过程中，超声空化作用起到了关键作用。在浸出温度 85 ℃、盐酸浓度为 2 mol/L、液固体积质量比 10/1，原料粒径－0.074 mm条件下，分别设定常规浸出时间 180 min、超声波浸出时间 105 min(超声波功率 60 W)，钕铁硼原料、超声波浸出渣与常规浸出渣的 SEM 分析结果如图 9 所示。可知：在相同酸浸条件下引入超声波辅助处理，则可在颗粒表面观察到更为显著的腐蚀现象。造成这一现象的主要原因是，钕铁硼主要由主相 $Nd_2Fe_{14}B$、富钕相，以及少量的富硼相组成，其中富钕相质地较软，在超声空化作用产生的冲击波和微射流作用下，富钕相被破坏，最终从钕铁硼颗粒上剥离下来，与此同时，钕铁硼表面的钝化层也会被破坏，使钕铁硼颗粒内部的物质暴露出来，加快物质更新，使得盐酸能够与更充足的钕铁硼反应，促进反应进行，提高浸出率。

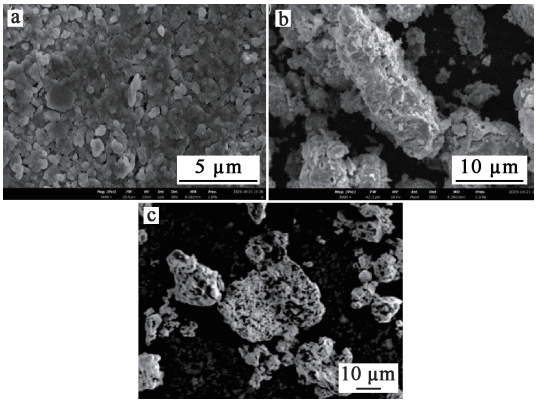


图 9 钕铁硼原料(a)、超声波浸出渣(b)及常规浸出渣(c)的 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of NdFeB raw materials (a), ultrasonic leaching residue (b), and conventional leaching residue (c)

3　结论

采用超声强化盐酸优溶法浸出钕铁硼是可行的。超声波通过诱导钕铁硼颗粒细化及有效刻蚀颗粒表面，将内部物质暴露出来，促进稀土离子的溶出与扩散，使得 H^+ 与稀土充分反应。在超声波功率 60 W、盐酸浓度 2 mol/L、温度 85 ℃、浸出时间 105 min、液固体积质量比 10 mL/1 g、原料粒径 −0.074 mm条件下，稀土浸出率达97.94%，相对于常规浸出有明显提升。

该法能有效缩短反应时间，降低能耗，提高稀土浸出率，绿色高效，可为后续稀土及其他有色金属元素回收创造有利条件。

参考文献：

[1] 王厚庆，叶雨欣，汪金良，等. 钕铁硼废料中稀土回收工艺研究进展及展望[J]. 湿法冶金，2024，43(6)：608-619.
WANG Houqing, YE Yuxin, WANG Jinliang, et al. Research progress and prospects on recycling of rare earth elements in NdFeB waste[J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(6): 608-619.

[2] 栗健茹，徐存英，卢精灵，等. 废旧钕铁硼火法回收现状及进展[J]. 矿冶，2022，31(1)：61-69.
LI Jianru, XU Cunying, LU Jingling, et al. Research situation and advances in pyrometallurgical recovery of waste NdFeB[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 61-69.

[3] 王晓东，张晓伟，郭峰，等. 湿法工艺回收钕铁硼废料的研究现状及发展方向[J]. 湿法冶金，2025，44(2)：133-142.
WANG Xiaodong, ZHANG Xiaowei, GUO Feng, et al. Research status and development direction of recycling NdFeB wastes by hydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy of China, 2025, 44(2): 133-142.

[4] 刘鲁静，王俊锋，覃波，等. 钕铁硼废料资源化回收利用研究进展及双碳建议[J]. 中国稀土学报，2024，42(5)：869-882.
LIU Lujing, WANG Junfeng, TAN Bo, et al. Research progress of NdFeB scrap resource utilization and "dual carbon" proposal[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2024, 42(5): 869-882.

[5] 牟保畏，王丽，雍胜利，等. 钕铁硼废料和抛光粉废粉中稀土的联合回收工艺研究[J]. 湿法冶金，2025，44(2)：151-157.
MU Baowei, WANG Li, YONG Shengli, et al. Combined recovery process of rare earth from NdFeB waste and polishing powder waste[J]. Hydrometallurgy of China, 2025, 44(2): 151-157.

[6] 栗健茹，徐存英，卢精灵，等. 从废钕铁硼中湿法回收稀土研究进展[J]. 湿法冶金，2022，41(2)：97-103.
LI Jianru, XU Cunying, LU Jingling, et al. Research progress on recycling of rare earth elements from NdFeB waste[J]. Hydrometallurgy of China, 2022, 41(2): 97-103.

[7] KGOMOTSO C M, XOLISA C G, SEHLISELO N, et al. Investigations into the extraction of rare earth elements from Zandkopsdrift ore using the sulfation roasting process[J]. Minerals Engineering, 2023, 191. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107902.

[8] DENG T Z. pH norm of hydrooxygenate deposition[J]. Chemistry, 1979(2): 27-28.

[9] 都业俭，张桂梅，薛建萍，等. EDTA 法测定 $RECl_3$(L)稀土总量影响因素分析[J]. 包钢科技，2017，43(6)：64-68.
DU Yejian, ZHANG Guimei, XUE Jianping, et al. Analysis of influencing factors on determination of total rare earth in $RECl_3$(L) by EDTA method[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2017, 43(6): 64-68.

[10] 焉杰文，潘德安，李彬. 超声强化在湿法浸出过程中的应用[J]. 过程工程学报，2020，20(11)：1241-1247.
YAN Jiewen, PAN De'an, LI Bin. Application of ultrasonic intensification in hydrometallurgy leaching process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(11): 1241-1247.

[11] 徐珂. 超声空化泡群内气泡的非线性动力学特性研究[D]. 杭州：中国计量大学，2021：10.

[12] 平开朗. 基于超声波空化效应的废旧磷酸铁锂电池的回收工艺研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2023：27.

Extraction of Rare Earths from NdFeB Waste by Ultrasonic Enhanced Hydrochloric Acid Leaching Method

WU Qi[1,2], FAN Wenjun[1,2,3], ZHANG Chengye[1,2], ZHANG Chengcheng[1,2], ZHANG Xiaowei[1,2,3], LIU Zhongxing[1,2,3]

(1. *Institute of Rare Earth Industry (College of Rare Earth Engineering and Technology), Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *China*;
2. *Key Laboratory of Full-cycle Green Development & High-Efficiency Utilization of Light Rare-Earth Resources (Inner Mongolia University of Science and Technology), Baotou* 014010, *China*;
3. *Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou* 014010, *China*)

Abstract: To address the issues of long leaching time and high consumption of hydrochloric acid in the conventional hydrochloric acid leaching method for neodymium-iron-boron (NdFeB) waste, the ultrasonic-enhanced hydrochloric acid solubilization method was studied for the leaching of rare earths from it. The effects of ultrasonic power, hydrochloric acid concentration, temperature, liquid volume to solid mass ratio, leaching time, particle size and other factors on the leaching rate of rare earths were investigated, and the optimal leaching parameters were determined. The results show that ultrasonic assistance significantly enhances the leaching process. Under the optimal conditions of ultrasonic power of 60 W, hydrochloric acid concentration of 2 mol/L, temperature of 85 ℃, liquid volume to solid mass ratio of 10 mL/1 g, leaching time of 105 min, and particle size of −0.074 mm, the rare earth leaching rate reaches 97.94%, which is 8 percentage points higher than that of the conventional hydrochloric acid leaching method under its best conditions. The method is an efficient and feasible green process for rare earth recovery and provides a new approach for the resource utilization of NdFeB waste.

Key words: ultrasonic enhancement; NdFeB waste; hydrochloric acid solubilization method; rare earth; green and efficient; leaching