低冰镍浸出技术研究进展

孙臣尧,王碧侠,刘文博,赵小雨,刘　帅

(西安建筑科技大学 冶金工程学院,陕西 西安　710055)

摘要:低冰镍是硫化镍矿火法冶炼的重要中间产物,为实现有价金属的高效回收并减少传统转炉吹炼造成的钴、镍损失,系统综述了低冰镍浸出技术的研究进展。重点介绍了焙烧预处理—浸出(包括氯化铵焙烧、钙化焙烧、硫酸化焙烧等)、氯化浸出($FeCl_3$ 及 $FeCl_3$-HCl 体系)、加压湿法浸出(氧压酸浸与氧压水浸)及常压强化浸出(混酸体系、过硫酸盐氧化体系)4 类典型工艺的研究现状,对比分析了各工艺的作用机制、主要优势与局限性。展望了在绿色冶金背景下,发展高级氧化体系、引入超声等物理强化手段,以及结合机器学习进行过程建模与优化的未来方向,以期为低冰镍高效、清洁湿法处理工艺的研发提供参考。

关键词:低冰镍;湿法冶金;焙烧预处理;氯化浸出;强化浸出;研究进展

中图分类号:TF803.2;TF815　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)05-0637-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.05.003

镍是国民经济、社会发展、国防工业建设及科学技术发展必不可少的基础材料和重要的战略物资,广泛应用于冶金、化工、机械制造、电池、电镀、航天等领域。目前,镍的工业生产主要是以硫化矿为原料、采用火法冶金和湿法冶金相结合的工艺路线[1]。低冰镍是硫化镍精矿通过闪速炉等熔炼去除大部分脉石后得到的含镍、铜、钴和铁的混合硫化物。低冰镍需经转炉富氧吹炼脱铁得高冰镍,再经磨浮分离和电解精炼得金属镍;但转炉吹炼会使大量钴及部分镍、铜进入渣中,造成资源浪费,从而降低经济效益[2-3]。

为提高镍冶炼过程中有价金属回收率,不断探索新的冶炼工艺流程具有重要意义。相对于硫化镍矿,低冰镍充分富集了其中的有价金属元素 Ni、Cu、Co;相对于高冰镍,低冰镍中有价金属元素损失更少。因此,以低冰镍作为镍火法冶金的终端产物,直接进入湿法冶金流程,可有效降低因富氧吹炼造成的钴、铜和镍等有价元素的损失,同时减少 SO_2 气体排放所引发的环境污染[4-5]。可见,开展低冰镍湿法冶金工艺的研究对于资源综合利用及环境保护都具有重要意义。本文综述了低冰镍浸出技术的发展现状,系统介绍了焙烧预处理—浸出、氯化浸出、加压湿法浸出及常压强化浸出等几种典型工艺的作用机制、主要优势与局限性,以期为相关领域的深入研究提供参考。

1　低冰镍的组成结构及特点

典型低冰镍的主要成分见表 1。除了 Ni、Cu、Co、Fe、S 等元素外,低冰镍还伴生少量 Al、Mg、Si、Ca、Mn、Cr 等金属[6-7]。与高冰镍显著不同的是,低冰镍具有铁含量高、镍品位低等特点。镍在低冰镍中并非以单一矿物形式存在,而是主要以 Fe-Ni-S 复合硫化物形式赋存,部分镍固溶于铁硫化物中,并常与铜硫化物紧密共生,难以通过物理方法分离[6-8]。从结构特征来看,低冰镍呈明显的多相紧密嵌布结构,不同硫化物矿相及脉石相在微观尺度上相互包裹,界面复杂。其主要组成包括铁硫化物($Fe_{1-x}S$)、镍黄铁矿($(Ni,Fe)_9S_8$)及铁镍铜复合硫化物,物相种类繁多,体现出其矿物组成的复杂性和非均一性[9-11]。

低冰镍的化学组成、结构特征与物相组成共

收稿日期:2026-04-01;**修订日期**:2026-05-19

基金项目:陕西省自然科学基础研究项目(2025JC-YBMS-630)。

第一作者简介:孙臣尧(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为冶金资源综合利用。

通信作者简介:王碧侠(1976—),女,博士,教授,主要研究方向为冶金资源综合利用。E-mail:yj-wangbixia@xauat.edu.cn。

同决定了低冰镍的浸出行为。其中,镍与铁的强共生关系及多金属硫化物的紧密嵌布结构,是导致镍浸出动力学缓慢、选择性较差的主要原因[10]。铁硫化物反应活性较高,易在浸出初期优先溶出,从而干扰镍的回收;与此同时,铜在强化氧化条件下易与镍协同溶出,不仅降低镍浸出的选择性,也增加浸出液中镍与铜的分离及富集难度[7-8]。此外,高硫体系易形成单质硫或钝化层,进一步限制了浸出反应的进行[6,10]。

表 1 典型低冰镍的主要成分[6-11]

Table 1 Main components of typical low-nickel matte[6-11] %

Ni	Cu	Co	Fe	S
8～12	4～8	0.1～1.0	35～45	30～38

2 低冰镍浸出技术研究

2.1 焙烧预处理—浸出技术

2.1.1 焙烧预处理工艺及其对金属浸出的影响

焙烧预处理是低冰镍湿法处理中应用较早且研究较为系统的技术之一。该技术通过在高温条件下重构低冰镍中硫化物-铁相的物相组合关系,使 Ni、Cu、Co 与 Fe 在矿物学层面发生“可控分离”,从而从源头上降低后续湿法浸出的反应阻力与选择性矛盾[12-15]。针对低冰镍中硫化物结构致密、铁含量高及多金属高度共生等特点,研究者围绕不同焙烧介质与添加剂体系,提出了多种焙烧—浸出组合工艺。

Mu W. N. 等[16]开发了氯化铵焙烧—水浸工艺,利用 NH_4Cl 在中等温度下分解生成 HCl 和 Cl_2,将低冰镍中的 Ni、Cu、Co 选择性转化为可溶性氯化物或硫酸盐,而 Fe 主要以不溶性的 α-Fe_2O_3 形式富集于焙烧渣中,实现了有价金属与铁的有效分离。在优化条件(焙烧温度 500 ℃、NH_4Cl 用量 250%、焙烧时间 2.5 h)下,Ni、Cu、Co 浸出率均超过 94%,Fe 浸出率低于 30%。该工艺在缩短传统火法流程、降低能耗及减少 Co 损失等方面具有优势,且所得浸出液纯度较高,可为后续高附加值材料制备提供优质原料。

路长远[17]采用 KCl 氯化焙烧—水浸工艺处理低冰镍。研究结果表明:在多相共存条件下,镍黄铁矿中的 Fe 优先氧化生成 Fe_3O_4,Ni 转化为 NiS,并生成 SO_2,KCl 在 SO_2 及 O_2 的作用下分解生成 Cl_2,Cl_2 与矿物进一步反应生成 $NiCl_2$,$NiCl_2$ 逐渐转化为 $K_2Ni_2(SO_4)_3$ 复盐;由于高价铁氧化物难以进一步氯化,铁主要富集于焙烧渣中,而 Ni、Cu、Co 以可溶氯化物形式进入浸出液,实现了有价金属的高效协同浸出;在添加 40%KCl、温度 450 ℃条件下焙烧低冰镍 45 min 后,镍、钴和铜浸出率均达最大值,分别为 99.86%,95.86% 和 97.94%,而铁浸出率仅为 0.88%,选择性氯化效果明显。

Geng S. H. 等[18]、赵勇[19]系统研究了钙化焙烧—酸浸工艺。结果表明:在低冰镍钙化焙烧过程中引入 CaO 或 $CaCO_3$,可优先与 Fe_2O_3 反应生成高温稳定的钙铁酸盐(CaO · Fe_2O_3 或 $Ca_2Fe_2O_5$),有效抑制 Ni、Cu、Co 与 Fe 形成难溶的金属铁氧体($MeFe_2O_4$),从而使有价金属以氧化物形式存在;在后续稀硫酸浸出过程中,Ni、Cu、Co 氧化物可实现高效溶解,其浸出率分别达 94.2%、98.1% 和 92.2%,溶液中 99.6% 的 Fe 可通过针铁矿沉淀法去除;引入球磨预处理有助于降低焙烧温度并改善反应动力学行为。

在硫酸化焙烧—水浸工艺方面,刘旭明[20]通过系统调控焙烧温度、焙烧时间、酸料比、原料粒度及通氧速率,实现了低冰镍中硫化物向可溶性硫酸盐或金属氧化物的有效转化;在优化条件下,Ni、Cu、Co 浸出率分别达 99.2%、96.5% 和 91.7%,Fe 浸出率约为 85%;通过二段焙烧工艺,可将 Fe 浸出率进一步降至 55%～60%,从而改善目标金属与铁的分离效果。刘岩[21]对低冰镍硫酸化焙烧—浸出工艺进行了系统研究,对比了浆化预处理/完全浸出—结晶预处理工艺对浸出行为的影响。研究结果表明:在钴浸出率相当的条件下,浆化预处理可获得镍含量较高的铁精矿,适用于镍铁生产;而完全浸出—结晶预处理可实现镍总浸出率超过 99%,同时实现了 Ni、Co 与 Fe 的有效分离。该研究说明,硫酸化焙烧—浸出体系并非单一路径工艺,而是具备可调控反应窗口,即通过改变预处理方式与浸出深度,在“镍富铁渣回收”与“有价金属完全溶出”之间实现取舍。

总体来看,不同焙烧预处理工艺虽在反应介质与操作条件上存在差异,但其目的均是通过焙烧实现低冰镍中有价金属与铁的物相重构与预分离,从而降低后续湿法浸出过程的反应阻力并改善浸出选择性。

2.1.2　焙烧预处理工艺的原理与局限

焙烧预处理的本质是通过热力学条件下的物相重构，改变低冰镍中各元素的赋存状态与相互作用关系，其核心在于通过调控焙烧反应路径和物相转化行为，实现有价金属与铁在矿物学层面的预分离，从而为后续湿法浸出创造有利条件。一方面，焙烧过程通过抑制难溶尖晶石相或稳定铁相的生成，降低后续湿法浸出过程中的反应阻力；另一方面，不同焙烧添加剂或气氛条件的引入，使有价金属在焙烧阶段即实现初步分离，从而在浸出阶段表现出更优的选择性和反应可控性。低冰镍中典型硫化物在焙烧条件下发生的代表性氧化反应过程[22]如下：

1）以镍黄铁矿为代表，首先发生铁的优先氧化，生成铁氧化物/铁硫酸盐，同时形成单金属硫化物：

$(Fe,Ni)_9S_8+O_2 \longrightarrow Fe_2O_3+NiS+Fe_2(SO_4)_3$（示意）

2）金属硫化物的硫酸化。在 O_2/SO_2 气氛下，Ni、Cu 硫化物发生硫酸化反应，生成可溶性 $NiSO_4$：

$$NiS+2O_2 \longrightarrow NiSO_4$$

或经氧化—硫酸化路径，即先氧化为 NiO，再与 SO_3 反应生成 $NiSO_4$：

$$2NiS+3O_2 \longrightarrow 2NiO+2SO_2$$

$$NiO+SO_3 \longrightarrow NiSO_4$$

铜硫化物的硫酸化反应类似：

$$Cu_2S+2O_2 \longrightarrow 2CuO+SO_2$$

$$CuO+SO_3 \longrightarrow CuSO_4$$

焙烧预处理虽在矿物学调控层面具有显著优势，但其能耗、添加剂消耗及高温设备要求等工程因素，仍是制约其大规模应用的重要问题。因此，焙烧预处理更适合作为针对特定原料特性和分离目标的调控手段，在实际应用中，其技术优势需与能耗、成本及后续湿法流程进行综合权衡。

2.2　氯化浸出技术

2.2.1　氯化体系下低冰镍的浸出

氯化浸出作为一种重要的化学强化浸出低冰镍技术，受到了广泛关注[23]。氯化体系在低冰镍湿法处理中并非单纯依赖强酸或高温条件，而是通过构建以 Fe^{3+}/Fe^{2+} 为核心的氧化体系，并辅以 Cl^- 的配合稳定作用，在相对温和条件下改进硫化物的氧化-溶解路径。

袁树兵[24]研究了采用 $FeCl_3$ 溶液浸出低冰镍。结果表明：在常压、温度 50 ℃、液固体积质量比为 100/3（mL/g）、$FeCl_3$ 浓度 1.2 mol/L 条件下浸出 48 h，铜、镍浸出率分别为 99.68% 和 90.28%；浸出渣以铁的氧化物和单质硫为主，含有少量铜、镍氧化物。宁志强等[25]对 $FeCl_3$ 溶液浸出低冰镍及其动力学进行了研究。结果表明：镍的浸出过程由化学反应控制，铜浸出过程由混合反应控制，其浸出活化能分别为 70.26、38.62 kJ/mol；在 Fe^{3+}-Cl^- 氧化体系中，Fe^{3+} 维持较高的体系氧化能力，Cl^- 的配合作用提高了 Ni、Cu 等金属离子在溶液中的稳定性，两者共同作用促进了低冰镍中硫化物相的分解。

陈光炬等[26]采用 $FeCl_3$-HCl 体系浸出低冰镍。研究结果表明：在该体系中，Fe^{3+} 作为主要氧化剂驱动低冰镍中硫化物及合金相的氧化分解，Cl^- 通过配合作用提高 Ni、Cu、Co 离子的溶解稳定性，从而实现多种有价金属的同步溶出；在 $FeCl_3$ 浓度1.0 mol/L、HCl 浓度 0.5 mol/L、温度 90 ℃条件下浸出 7 h，Ni、Cu 和 Co 浸出率分别达 98.4%、98.9%和 97.3%。朱剑等[27]围绕 $FeCl_3$-HCl-H_2O 体系，结合界面反应试验与第一性原理计算，从微观尺度系统揭示了低冰镍硫化物的氧化-溶解机制。研究结果表明：Fe^{3+} 作为主要氧化剂主导电子转移过程，优先作用于 Cu_5FeS_4 与 $(Fe,Ni)_9S_8$ 中的 Fe 位点；Cl^- 通过配合稳定金属离子并降低界面反应能垒，促进硫化物持续氧化分解；第一性原理计算结果显示，Fe 原子的 3d 轨道最接近费米能级，具有最高氧化活性，从理论上解释了 Cu_5FeS_4 较 $(Ni,Fe)_9S_8$ 更易优先溶解的试验现象。

2.2.2　氯化浸出技术的特点与局限

需要指出的是，氯化浸出体系的强化作用并不完全等同于传统意义上的动力学加速，其核心优势更多体现在反应路径的改变与反应界面化学环境的重构。Fe^{3+}/Fe^{2+} 氧化还原对为硫化物氧化提供持续驱动力，而 Cl^- 的配合作用则通过稳定金属离子、抑制二次沉淀的方式，间接降低浸出过程中的表观反应阻力。这表明氯化体系的强化作用并非简单来源于氧化能力的提高，而在于通过 Fe^{3+}/Fe^{2+} 的持续循环，避免传统酸浸中因氧化剂耗尽而导致的反应停滞问题。该过程涉及的代表性化学反应如下：

硫化物在 Fe^{3+} 作用下的氧化分解：

$MeS+2Fe^{3+} \longrightarrow Me^{2+}+2Fe^{2+}+S^0$（Me=Ni、Cu、Co）

有价金属在 Cl^- 作用下的配合溶解：

$$Me^{2+} + 2Cl^- \longrightarrow MeCl_2$$

铁的变化：

$$Fe^{2+} + 1/4O_2 + H^+ \longrightarrow Fe^{3+} + 1/2H_2O\text{(示意)}$$

总体来看，相较于传统酸性浸出体系，氯化体系在促进硫化物分解和多金属协同溶解方面表现出一定优势。氯化浸出体系通过氧化-配合协同作用改善了低冰镍中多金属的溶解行为，在化学强化层面具有一定优势。但在高 Cl^- 浓度条件下，设备腐蚀、氯离子循环利用及二次污染控制等工程问题亦不容忽视，这在一定程度上限制了氯化浸出体系的工业应用范围。因此，氯化浸出体系在低冰镍湿法处理中更适合作为机制研究与过程强化的范式体系，其工程适用性需与后续分离流程及 Cl^- 闭路循环能力协同评估。

2.3 加压浸出技术

2.3.1 加压体系的浸出研究

加压浸出是在密闭体系中通过升高温度与氧分压，强化硫化物矿物的溶解过程，已广泛应用于难处理镍资源的强化浸出研究[28-29]。针对低冰镍等硫化物物料，相关研究主要集中在加压浸出体系的构建、关键工艺参数对浸出行为的影响，以及反应机制与动力学特征的探讨等方面。

在浸出体系构建上，尹飞等[30]系统开展了低冰镍加压酸浸工艺研究，提出了“加压浸出—萃取脱铜—中和除铁—沉镍”的湿法处理流程。研究结果表明：在温度约 200 ℃、氧分压 0.5 MPa 及适宜初始酸度条件下，Ni 和 Cu 均可获得较高浸出率，说明加压酸浸直接处理低冰镍工艺具有可行性。针对加压酸浸过程中酸耗高及 H_2S 生成风险等问题，沈明伟等[31]提出了氧压水浸低冰镍的新工艺，在不外加酸条件下，通过高温、高氧分压条件实现硫化物的氧化溶解。研究结果表明：在低冰镍粒度－325 目、液固体积质量比4∶1、浸出温度(175±5)℃、氧分压 1.6 MPa、浸出时间2.5 h、搅拌速度 600 r/min 条件下，Ni、Cu 和 Co 浸出率分别高于 98%、99%和 99%，而 Fe 浸出率控制在 16%以下，能为后续多金属分离创造有利条件；温度和氧分压是控制多金属浸出行为的主导因素，当温度低于 145 ℃或氧分压低于 1.0 MPa 时，Ni、Cu、Co 浸出率显著下降；提高搅拌转速有助于削弱外扩散阻力，但当转速超过 600 r/min 后，浸出率趋于平缓；通过温度与氧分压协同作用，能提高氧化反应的热力学驱动力与界面反应速率。该工艺通过在水介质中引入氧化气氛，避免了硫化物与酸直接反应，抑制了 H_2S 的生成，表现出良好的环境友好性。

廖亚龙等[32]针对低冰镍转炉渣中难浸钴相开展了氧压酸浸研究。结果表明：在硫酸浓度 0.4 mol/L、温度 225 ℃、氧分压 650 kPa 条件下浸出 45 min，钴浸出率可达 97.7%，而铁浸出率低于 3%；浸出过程符合未反应收缩核模型，反应初期主要受界面化学反应控制，随后转变为混合控制，最终受固体产物层扩散控制；化学反应控制阶段的表观活化能为 43.19 kJ/mol，且氧分压的反应级数达 0.85，表明溶解氧在高温高压条件下对硫化物及铁酸盐的氧化溶解起主导作用。该研究从动力学角度阐明了加压湿法浸出高效性的内在机制。

2.3.2 加压浸出的特点与局限

加压浸出过程通常经历由界面化学反应控制向扩散控制或混合控制的转变，高温高压条件不仅提高了反应热力学驱动力，也加快了界面反应速率，是其高效性的根本原因。但加压浸出仍存在一定局限性：一方面，高温高压设备投资和运行成本较高，对材料耐腐蚀性及安全性要求严格，限制了其在部分中小规模生产中的推广应用；另一方面，温度、氧分压等参数波动易导致浸出行为失稳。此外，在部分体系中仍存在铁溶出与硫形态转化问题，需通过精细化调控加以解决。

2.4 常压强化浸出技术

2.4.1 常压强化氧化浸出研究

为强化常压下的浸出效果，一些研究人员通过引入强氧化剂来强化浸出效果。袁飞刚等[33]在硫酸-硝酸混酸体系中系统研究了低冰镍硫化物的浸出动力学行为。结果表明：在常压搅拌条件下，当反应温度由 50 ℃升至 80 ℃时，镍浸出率由 30%提升至 85%以上，表现出明显的温度依赖性；相比之下，搅拌速度对浸出速率影响较小，表明该体系下浸出过程不受外扩散控制；该混酸体系中镍的浸出过程符合未反应收缩核模型，且主要受产物层内扩散控制；反应过程中，硫化物表面逐渐生成致密的单质硫层，阻碍浸出剂向矿物内部扩散，从而成为限制反应速率的主要因素；经计算，该过程的表观活化能为 87.63 kJ/mol，进一步印证了内扩散控制特征；镍浸出速率对硫酸和硝酸浓度

均呈正相关，其反应级数分别为 0.65 和 0.57；在该混酸体系中，硝酸主要参与硫化物的氧化分解过程，而硫酸则通过维持体系酸度并促进溶解态金属稳定存在。

Bi X. L. 等[34]研究了以过硫酸盐为氧化剂的常压氧化体系对低冰镍的浸出过程，考察了氧化剂用量、反应温度、浸出时间及液固体积质量比等因素对 Ni、Cu 和 Co 浸出行为的影响。研究结果表明，过硫酸盐在酸性条件下可原位生成具有强氧化能力的活性硫酸根自由基（$SO_4 \cdot^-$），从而显著增强硫化物矿物的氧化分解能力，其代表性反应过程可表示为：

$$S_2O_8^{2-} \longrightarrow 2SO_4 \cdot^-$$

$$MeS + SO_4 \cdot^- \longrightarrow Me^{2+} + SO_4^{2-} + S^0 \text{（示意）}$$

$$(Me = Ni、Cu、Co)$$

在该体系中，$SO_4 \cdot^-$ 作为主要氧化物种，能在常压条件下有效破坏硫化物结构，使有价金属以离子形式进入溶液，从而实现强化浸出。在优化条件下，当反应温度升至 70～80 ℃、过硫酸盐投加量处于较高水平时，硫化物结构被有效破坏，有价金属以离子形式进入溶液体系，低冰镍中 Ni 和 Co 浸出率可超过 90%，Cu 接近完全浸出。动力学分析表明，该体系中金属浸出速率对温度和氧化剂浓度高度敏感，而对搅拌强度的依赖性较弱，说明浸出过程并非受外扩散控制。在较低温度或较低氧化剂浓度条件下，浸出过程主要受界面化学反应控制，而在较高温度和较强氧化能力条件下，浸出过程逐渐转向由化学反应与内扩散协同控制。这一转变与反应过程中表面产物层的生成及其致密化行为密切相关。

2.4.2　常压强化浸出的特点与局限

在常压下引入强氧化体系，其本质均在于构建足够稳定且可持续的氧化环境，使低冰镍中硫化物的氧化-溶解过程由扩散受限转向界面化学反应或混合控制，从而突破硫层/钝化层对反应速率的结构性限制[35]。需要注意的是，常压条件下强化氧化体系通常对氧化剂用量和温度高度敏感，氧化剂消耗大、成本较高，且部分强氧化剂在体系中可能引发副反应及带来后续溶液处理压力。

3　不同技术的对比及未来发展趋势

3.1　低冰镍浸出技术的对比

基于上述研究可知，低冰镍的不同浸出技术在工艺形式上存在差异，但其核心机制均围绕硫化物的氧化-溶解过程展开。不同低冰镍浸出技术的主要优势与局限对比见表 2。可以看出，不同浸出技术均以强化硫化物的溶解过程为核心，但在氧化方式、反应路径及工程实现层面存在本质差异：高温焙烧与加压浸出通过提高反应驱动力实现高效浸出，但其高能耗或设备依赖性制约了工业推广应用；氯化浸出与常压强化氧化体系在条件温和性与工艺灵活性方面具有一定优势，但体系复杂性、氧化剂消耗及过程选择性问题仍有待系统解决。因此，未来低冰镍湿法处理技术的发展需在统一的硫化物溶解机制框架下，进一步探索高效低能耗氧化体系构建、过程强化手段协同以及绿色化的综合提升路径。

表 2　不同低冰镍浸出技术的主要优势与局限对比[36-40]

Table 2　Comparison of main advantages and limitations of different low-nickel matte leaching technologies[36-40]

技术	机制特征	主要优势	主要局限
焙烧预处理-浸出	通过高温焙烧使硫化物转化为氧化物或硫酸盐，促进后续浸出反应	反应路径清晰，浸出过程受控性好，溶液杂质相对较少	能耗高，流程长，需高温设备，整体经济性和绿色环保方面受限
氯化浸出	Fe^{3+}/Fe^{2+} 氧化还原循环驱动硫化物氧化，Cl^- 通过配合稳定金属离子并促进界面反应	可在相对温和条件下实现多金属协同浸出，体系反应活性较高	体系复杂，对设备耐腐蚀性要求高，溶液净化与杂质控制难度大
加压浸出	提高氧化反应热力学驱动力和界面反应速率，加快硫化物氧化-溶解过程	浸出速率快，反应时间短，流程紧凑，金属回收效率高	依赖高压设备，投资与运行成本高
常压强化浸出	在常压条件下引入强氧化剂或活性自由基，直接破坏硫化物及硫/氧化物钝化层结构	工艺条件温和，流程灵活，易与超声、电化学等强化手段耦合	氧化剂消耗大，副反应多，成本与选择性控制仍需优化

3.2 未来研究方向与发展趋势

在“双碳”目标和绿色冶金背景下，低冰镍浸出技术的发展需综合考虑金属浸出效率、资源消耗与环境负荷[41]。近年来，以过硫酸盐[42]为代表的高级氧化体系及超声协同等物理强化手段逐渐受到关注。高级氧化法通过原位生成高氧化活性物种，在温和条件下促进硫化物氧化转化，其本质上仍延续了氧化-溶解的核心机制。相较于传统 Fe^{3+} 或氯化体系，该方法在减少重金属离子引入、降低二次污染风险方面具有一定潜力，但其氧化可控性、试剂消耗及体系稳定性仍需进一步评估。超声作用则通过空化效应改善固-液界面传质条件，抑制钝化层或硫层形成，从物理层面辅助氧化过程[43]，其工程价值在于与化学氧化体系协同，降低传质阻力，改善常压下氧化动力学的不足。

除工艺与反应体系本身的优化外，面向绿色冶金与复杂流程控制需求，机器学习等研究方法在冶金，尤其是湿法工艺流程中的应用逐渐受到关注。机器学习可在过程建模、结果预测、特征提取与参数优化等方面发挥作用，涵盖了从数据驱动建模到工业过程预测等多种方向，为复杂流程的综合评估与优化提供了新的视角和工具支持[44]。

现阶段，机器学习在浸出研究中的作用主要体现在过程建模与参数优化层面，作为对机制分析与试验研究的补充手段，在具体金属浸出与湿法冶金流程中，有研究将机器学习用于指导浸出过程参数的识别与优化，从试验或工业数据中揭示参数与浸出率之间的关系，为系统的参数空间提供辅助工具[45]。

浸出过程中，浸出率受多种工艺参数协同影响且存在明显非线性特征，传统机制模型或经验分析在复杂体系中具有一定局限性。已有研究表明，机器学习方法可基于试验或生产数据，对浸出条件与浸出率之间的关系进行建模与预测，从而辅助识别关键参数并优化其组合[46-48]。机器学习作为一种辅助研究工具，与传统机制分析和试验研究相结合，可用于提升复杂湿法流程的认知效率与调控精度。

4 结论

低冰镍作为硫化镍矿火法冶炼过程的重要中间产物，具有铁含量高、镍品位低、多金属紧密共生等特点。目前，湿法处理低冰镍主要技术包括焙烧预处理—浸出、氯化浸出、加压浸出及常压强化浸出等，各技术均有其适用条件与局限性。焙烧预处理—浸出通过高温物相重构实现有价金属与铁的预分离，技术成熟、浸出过程可控性较好，但能耗与流程长影响其经济性；氯化浸出借助 Fe^{3+}/Fe^{2+} 氧化还原循环与 Cl^- 配合协同作用，可在相对温和条件下实现多金属高效协同浸出，但其设备腐蚀与溶液净化问题突出；加压浸出利用高温高压显著提升反应热力学驱动力与界面反应速率，浸出效率高、流程紧凑，但设备投资与运行成本高昂；常压强化浸出通过引入强氧化剂或活性自由基在常压下突破硫层/钝化层的扩散限制，条件温和灵活，但氧化剂消耗大、副反应控制仍需优化。

面向“双碳”目标与绿色冶金的发展需求，低冰镍浸出技术的研究方向应聚焦以下三个方面：一是发展新型绿色氧化体系，如基于过硫酸盐的高级氧化方法，以减少重金属引入并降低环境负荷；二是推动超声、微波等物理强化手段与化学氧化体系的协同耦合，从传质与反应双重层面突破钝化限制；三是引入机器学习等数据驱动方法，辅助复杂湿法流程的建模、参数优化与过程控制，提升系统调控精度与研发效率。通过过程强化与智能控制的深度融合，有望构建更加高效、清洁且经济可行的低冰镍湿法处理新路径。

参考文献：

[1] 路长远，鲁雄刚，邹星礼，等. 中国镍矿资源现状及技术进展[J]. 自然杂志，2015，37(4)：269-277.
Lu Changyuan，Lu Xionggang，Zou Xingli，et al. Current situation and utilization technology of nickel ore in China[J]. Chinese Journal of Nature，2015，37(4)：269-277.

[2] 田庆华，李中臣，王亲猛，等. 红土镍矿资源现状及冶炼技术研究进展[J]. 中国有色金属学报，2023，33(9)：2975-2997.
Tian Qnghua，Li Zhongchen，Wang Qinmeng，et al. Present situation of laterite nickel ore resources and research progress of smelting technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2023，33(9)：2975-2997.

[3] 喻正军. 从镍转炉渣中回收钴镍铜的理论与技术研究[D]. 长沙：中南大学，2006.

[4] 孙建之，陈勃伟，温建康，等. 镍矿湿法冶金技术应用进展及研究展望[J]. 中国有色金属学报，2018，28(2)：357-363.
Sun Jianzhi，Chen Bowei，Wen Jiankang，et al. Application

and research progresses of hydrometallurgy technology for nickel ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018,28(2):357-363.

[5] 牛泽锟，田磊，刘燕. 铜镍硫化矿浸出技术研究进展[J]. 湿法冶金，2023,42(4):323-329.
Niu Zekun, Tian Lei, Liu Yan. Research progress on leaching technology of copper-nickel sulfide ore[J]. Hydrometallurgy of China, 2023,42(4):323-329.

[6] Marape G, Vermaak M K G. Fundamentals of pentlandite mineralogy and its effect on its electrochemical behaviour [J]. Minerals Engineering, 2012,32:60-67.

[7] Senior G D, Trahar W J, Guy P J. The selective flotation of pentlandite from a nickel ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 1995,43(3/4):209-234.

[8] Agar G E. Flotation of chalcopyrite, pentlandite, pyrrhotite ores[J]. International Journal of Mineral Processing, 1991, 33(1/2/3/4):1-19.

[9] Ayedzi L D, Zanin M, Skinner W, et al. Characterization of a nickel sulfide concentrate and its implications on pentlandite beneficiation[J]. Minerals, 2024,14(4):14040414.

[10] Durazzo A, Taylor L A. Exsolution in the mss-pentlandite system: textural and genetic implications for Ni-sulfide ores[J]. Mineralium Deposita, 1982,17(3):204463.

[11] Xiao Tengfei, Mu Wenning, Shi Shuangzhi, et al. Simultaneous extraction of nickel, copper, and cobalt from low-grade nickel matte by oxidative sulfation roasting-water leaching process [J]. Minerals Engineering, 2021, 174:107254.

[12] 贾志良. 铜镍氧硫混合矿硫酸铵焙烧提取有价组元的研究[D]. 沈阳：东北大学，2015.

[13] 刘欣伟，冯雅丽，李浩然，等. 硫酸铵焙烧法浸出镍磁黄铁矿中有价金属[J]. 中国有色金属学报，2012,22(5):1520-1526.
Liu Xinwei, Feng Yali, Li Haoran, et al. Leaching of valuable metals from nickel pyrrhotite by ammonium sulfate roasting method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012,22(5):1520-1526.

[14] 张云芳，李金辉，高岩，等. 红土镍矿的硫酸铵焙烧过程[J]. 中国有色金属学报，2017,27(1):155-161.
Zhang Yunfang, Li Jinhui, Gao Yan, et al. Roasting process of nickel laterite using ammonium sulfate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(1):155-161.

[15] 李洁，崔富晖，辛海霞，等. 硫酸铵焙烧红土镍矿工艺优化[J]. 材料与冶金学报，2019,18(1):63-69.
Li Jie, Cui Fuhui, Xin Haixia, et al. An optimum process technology of nickel laterite ore by ammonium sulfate roasting method[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2019,18(1):63-69.

[16] Mu Wenning, Gu Mengfei, Du Shouming, et al. Extraction efficiency of metals from low-nickel matte via NH_4Cl roasting water leaching process and synthesis of $(Ni,Cu,Co)Fe_2O_4$ photocatalyst[J]. Journal of Central South University, 2023,30(6):1803-1816.

[17] 路长远. 复杂多金属硫化镍矿氯化提取有价组元的工艺及机理研究[D]. 上海：上海大学，2018.

[18] Geng Shuhua, Li Guangshi, Zhao Yong, et al. Extraction of valuable metals from low nickel matte by calcified roasting-acid leaching process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019,29(10):2202-2212.

[19] 赵勇. 低冰镍钙化焙烧的反应过程及机理研究[D]. 上海：上海大学，2018.

[20] 刘旭明. 低冰镍硫酸焙烧—水浸工艺研究[D]. 沈阳：东北大学，2019.

[21] 刘岩. 低冰镍的硫酸化焙烧浸出工艺研究[J]. 有色矿冶，2011,27(5):23-24.
Liu Yan. Influence of different pretreatment methods on extracting of nickel matte by sulfate roasting[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2011,27(5):23-24.

[22] Sun Qiangchao, Cheng Hongwei, Mei Xiaoyong, et al. Efficient synchronous extraction of nickel, copper, and cobalt from low-nickel matte by sulfation roasting-water leaching process[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):9916.

[23] 李勇，丁剑，林洁媛，等. 含镍硫化物湿法冶金技术应用及研究进展[J]. 中国有色冶金，2020,49(5):9-15.
Li Yong, Ding Jian, Lin Jieyuan, et al. Research progress of nickel-containing sulfide hydrometallurgical technologies [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020,49(5):9-15.

[24] 袁树兵. 金川低冰镍综合利用温法工艺关键技术基础研究[D]. 沈阳：东北大学，2018.

[25] 宁志强，唐子瑞，刘家辉，等. 氯化铁溶液浸出低冰镍提取镍铜的研究[J]. 有色金属科学与工程，2022,13(3):43-48.
Ning Zhiqiang, Tang Zirui, Liu Jiahui, et al. Study on the extraction of nickel and copper from low ice nickel matte in ferric chloride solution[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022,13(3):43-48.

[26] 陈光炬，王会刚，张梅，等. 从低冰镍中高效浸提 Ni、Cu、Co [J]. 中国有色金属学报，2017,27(9):1936-1942.
Chen Guangju, Wang Huigang, Zhang Mei, et al. High efficient leaching of Ni, Cu and Co from low nickel matte[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(9):1936-1942.

[27] 朱剑，陶文，陈皆通，等. $FeCl_3$-HCl-H_2O 体系浸出低冰镍界面氧化反应和第一性原理计算[J]. 中国有色金属学报，2020,30(11):2658-2671.
Zhu Jian, Tao Wen, Chen Jietong, et al. Experimental and first principle analysis accounting for oxidative reactions of low nickel matte in $FeCl_3$-HCl-H_2O solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020,30(11):2658-2671.

[28] 马保中，王成彦，杨卜，等. 硝酸加压浸出红土镍矿的中试研究[J]. 过程工程学报，2011,11(4):561-566.
Ma Baozhong, Wang Chengyan, Yang Bu, et al. Pilot plant

study on pressure leaching of nickel laterite in nitric acid medium[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011,11(4):561-566.

[29] 王成彦,曹志河,马保中,等. 红土镍矿硝酸加压浸出工艺[J]. 过程工程学报,2019,19(增刊 1):51-57.
Wang Chengyan Cao, Zhihe, Ma Baozhong, et al. Nitric acid pressure leaching of laterite ores[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2019,19(S1):51-57.

[30] 尹飞,王振文,王成彦,等. 低冰镍加压酸浸工艺研究[J]. 矿冶,2009,18(4):35-37.
Yin Fei, Wang Zhenwen, Wang Chengyan, et al. Research on pressure leaching process for low nickel matte[J]. Mining And Metallurgy,2009,18(4):35-37.

[31] 沈明伟,冀成庆,朱昌洛,等. 低冰镍氧压水浸试验研究[J]. 云南冶金,2012,41(3):32-34.
Shen Mingwei, Ji Chengqing, Zhu Changluo, et al. Experimental study on oxygen pressure and water leaching of low nickel matte[J]. Yunnan Metallurgy,2012,41(3):32-34.

[32] 廖亚龙,黄斐荣,周娟,等. 低冰镍转炉渣中钴的氧压酸浸行为及其动力学[J]. 化工学报,2015,66(10):3971-3978.
Liao Yalong, Huang Feirong, Zhou Juan, et al. Kinetics and behavior of cobalt extraction from low nickel matte converter slag by pressure oxidative leaching with sulfuric acid [J]. CIESC Journal,2015,66(10):3971-3978.

[33] 袁飞刚,刘旭恒. 低冰镍硫-硝混酸浸出动力学[J]. 稀有金属,2019,43(10):1075-1084.
Yuan Feigang, Liu Xuheng. Leaching kinetics of nickel extraction from low nickel matte by sulfuric-nitric acid mixture[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43 (10):1075-1084.

[34] Bi Xiaolong, Mu Wenning, Chen Yuxiang, et al. Separation of valuable metals from low nickel matte to prepare $NiCo_2O_4$ materials: optimization of oxidative leaching process and improvement of electrochemical properties of materials [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354 (8):129459.

[35] 彭人勇,魏继宽. 从废镍催化剂中酸浸镍试验研究[J]. 湿法冶金,2019,38(4):287-290.
Peng Renyong, Wei Jikuan. Leaching of nickel from spent nickel catalysts using sulfuric acid[J]. Hydrometallurgy of China,2019,38(4):287-290.

[36] 叶有明,谢雪珍,农永萍. 用常压酸浸—溶剂萃取法从硫锰废渣中回收锰钴镍试验研究[J]. 湿法冶金,2020,39(4):298-303.
Ye Youming, Xie Xuezhen, Nong Yongping. Recovery of Mn, Co, Ni in waste residue with manganese and sulfur by sulphuric acid leaching and solvent extraction at atmospheric pressure[J]. Hydrometallurgy of China, 2020, 39 (4):298-303.

[37] 李少龙. 氯化浸出工艺在高镍锍浸出系统中的应用[J]. 中国有色冶金,2010,39(5):21-24.
Li Shaolong. Application of chloride leaching processin high-nickel matte leaching system[J]. China Nonferrous Metallurgy,2010,39(5):21-24.

[38] 王海北,蒋开喜,王玉芳,等. 重金属加压浸出技术现状及展望[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(9):1-11.
Wang Haibei, Jiang Kaixi, Wang Yufang, et al. Status and prospect on pressure leaching technologies for heavy metals[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021 (9):1-11.

[39] 薛娟琴,毛维博,卢曦,等. 超声波辅助硫化镍矿氧化浸出动力学[J]. 中国有色金属学报,2010,20(5):1013-1020.
Xue Juanqin, Mao Weibo, Lu Xi, et al. Dynamics of ultrasound-assisted oxidation leaching of nickel sulfide concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5):1013-1020.

[40] Zhao Kun, Gao Feng, Yang Qunying. Comprehensive review on metallurgical upgradation processes of nickel sulfide ores[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2022, 8(1):37-50.

[41] 张振芳,陈秀法,李仰春,等. "双碳"目标下镍资源的综合利用发展趋势[J]. 矿产综合利用,2022(2):31-39.
Zhang Zhenfang, Chen Xiufa, Li Yangchun, et al. Multipurpose utilization trend of nickel mineral resources under the goal of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022 (2): 31-39.

[42] 韩月,李卓然,李凯歌,等. 过硫酸盐高级氧化技术活化方式的研究进展[J]. 山东化工,2024,53(11):83-85.
Han Yue, Li Zhuoran, Li Kaige, et al. Research progress on the methods of activating persulfate in advanced oxidation processes[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(11): 83-85.

[43] 林国,钟震,夏洪应,等. 超声在湿法冶金过程强化中的应用进展与展望[J]. 有色金属(冶炼部分),2025(2):17-34.
Lin Guo, Zhong Zhen, Xia Hongying, et al. Application and prospects of ultrasound in hydrometallurgical process intensification[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(2):17-34.

[44] Cotrina-Teatino M A, Marquina-Araujo J J, Mamani-Quispe J N, et al. Application of machine learning methods in the metallurgical industry: a bibliometric analysis and systematic literature review[J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy, 2025, 134(4):231-250.

[45] Niu Bo, Wang Xiaomin, Xu Zhenming. Application of machine learning to guide efficient metal leaching from spent lithium-ion batteries and comprehensively reveal the process parameter influences[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 410:137188.

[46] Li Ruidi, Yuan Tiechui, Fan Wenbo, et al. Recovery of indium by acid leaching waste ITO target based on neural network[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1):257-262.

[47] 句秋月.基于集成学习算法的浸出过程混合建模研究[D].沈阳:东北大学,2012.

[48] 孙雪婷.基于改进随机森林的金湿法冶金全流程运行状态评价方法[D].沈阳:东北大学,2020.

Research Progress on Leaching Technologies of Low-Nickel Matte

SUN Chenyao, WANG Bixia, LIU Wenbo, ZHAO Xiaoyu, LIU Shuai

(*School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

Abstract: Low-nickel matte is an important intermediate product in the pyrometallurgical processing of nickel sulfide ores. In order to achieve efficient recovery of valuable metals and reduce the losses of cobalt and nickel associated with conventional converter blowing, this paper systematically reviews the research progress on leaching technologies for low-nickel matte. Emphasis is placed on four representative processing routes: roasting pretreatment − leaching processes (including ammonium chloride roasting, calcification roasting, and sulfation roasting), chlorination leaching ($FeCl_3$ and $FeCl_3$-HCl systems), pressure hydrometallurgical leaching (oxygen pressure acid leaching and oxygen pressure water leaching), and atmospheric pressure intensified leaching (mixed-acid systems and persulfate-based oxidative systems). The reaction mechanisms, key advantages, and inherent limitations of each technique are comparatively analyzed. Furthermore, under the framework of green metallurgy, future development directions are discussed, including the construction of advanced oxidation systems, the introduction of physical intensification methods such as ultrasound, and the integration of machine learning for process modeling and optimization. This review aims to provide a valuable reference for the development of efficient and environmentally benign hydrometallurgical processes for low-nickel matte.

Key words: low-nickel matte; hydrometallurgy; roasting pretreatment; chloride leaching; enhanced leaching; research progress