

引文格式:路远航,温建康,莫晓兰,等.黑色页岩钒镍钼专属浸矿菌的选育研究[J].中国有色冶金,2026,55(4):89-95.

Lu Yuanhang, Wen Jiankang, Mo Xiaolan, et al. Selection of specific leaching bacteria for vanadium, nickel and molybdenum in strategic mineral black shale[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 89-95.

黑色页岩钒镍钼专属浸矿菌的选育研究

路远航^{1,2,3,4,5,6}, 温建康^{1,3,4,5,6}, 莫晓兰^{1,3,4,5,6}, 杨鑫龙^{1,3,4,5,6},
孙建之^{1,3,4,5,6}, 杨洪英²

(1. 中国有研科技集团有限公司高品质有色金属绿色特种冶金国家工程研究中心, 北京 101407;

2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 有研资源环境技术研究院(北京)有限公司, 北京 101407;

4. 北京有色金属研究总院, 北京 100088; 5. 战略性有色金属绿色制造技术北京市工程研究中心, 北京 101407;

6. 有研工程技术研究院有限公司, 北京 101407)

[摘 要] 黑色页岩是我国一类重要的矿产资源,在我国储量巨大且分布广泛,其中赋存有钒、镍、钼等稀有金属,但由于其金属品位较低、赋存形式复杂等问题,目前仍未得到广泛的开发。微生物冶金技术是一种新兴的冶金技术,微生物堆浸工艺处理规模大、能源资源消耗量低以及环境污染小等优势均有利于黑色页岩资源的开发。本研究选取三组不同温度适应性的浸矿微生物(中温混合菌、中等嗜热混合菌和高温混合菌),系统开展了黑色页岩钒、镍、钼的生物浸出实验,得到以下主要结论。三组微生物均能有效浸出黑色页岩中的钒(57%~74%)、镍(83%~88%),钼的浸出率相对较低,高温混合菌对钼浸出效果较差,仅能达到1%~5%,中温菌以及中等嗜热菌的钼浸出率可达10%~20%;选择中温混合菌作为黑色页岩专属浸矿菌,并进行高通量测序,结果表明,其中主要功能微生物有亚铁钩螺菌、嗜酸硫杆菌,经过驯化后嗜酸硫杆菌占比升高,其功能对微生物浸出具有促进作用。目前,生物浸出处理黑色页岩金属浸出率相较于其他工艺仍偏低,且钼的浸出效果较差。后续研究应重点关注微生物之间的协同作用、不同温度微生物与堆浸温度场的耦合关系,以及微生物的浸矿机理,以期为黑色页岩中钒、镍、钼的微生物高效绿色提取提供技术与理论支撑。

[关键词] 黑色页岩;生物浸出;钒、镍、钼提取;菌种选育;高通量测序;亚铁钩螺菌;嗜酸硫杆菌

[中图分类号] TF18; TF841 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0089-07

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.009

0 引言

钒因其优异的综合性能,被广泛应用于钢铁行

业。此外,其还用于如硫酸生产中的氧化催化剂、石油裂化催化剂、航空航天领域的钛铝合金制造,以及全钒氧化还原液流电池^[1]。随着科技发展,钒在非钢铁领域的应用日益增长,因此被誉为“现代工业味精”。目前世界上约89%的钒产量直接来自钒钛磁铁矿和钒渣,而源自含钒黑色页岩生产和钒副产品回收的仅占11%左右^[2]。

黑色页岩中除含大量钒以外,还同时伴生有数量可观、可供开发利用的钼、镍等金属矿产。由于黑色页岩的成因及地理分布情况复杂,这些金属元素的组成远比其在金属矿床中复杂,而且品位波动大,具有空间分布不均、赋存稳定性低、嵌布粒度极

[收稿日期] 2026-02-08 [修订日期] 2026-04-20

[录用日期] 2026-04-21 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 路远航(1998—),山东惠民人,博士,研究方向为生物冶金及湿法冶金的理论与技术研发。

[通信作者] 温建康(1966—),博士,正高级工程师,长期从事绿色选冶、生物湿法冶金、稀贵金属冶金提纯及矿冶固废资源化等应用基础研究和技术研发工作。

[基金项目] 国家自然科学基金项目“载铁蛇纹石原位生物氧化溶解及其对堆体渗流特性的影响机制研究”(52304297);国家重点研发计划项目“多金属页岩清洁利用与固废全过程控制关键技术”(2020YFC1909703)。

小等特点,很难进行单体分离^[3]。现有黑色页岩的开发大多采取焙烧、酸浸、碱浸以及添加助浸剂^[4,5]、焙烧助剂^[6,7]等工艺,在实际工业应用中存在诸多问题:①酸浸提取 V_2O_5 需要消耗大量的 H_2SO_4 ,一般用量为矿石的25%~40%;②钠化焙烧工艺会产生污染性气体,如 SO_2 、 HCl 等;③添加剂和酸性、碱性浸出剂的使用,易产生大量有毒废水废渣,对环境造成严重污染;④现有工艺提钒回收率一般不超过70%,资源利用率低。此外,由于黑色页岩中镍、钼的含量较低,需先进行选矿富集^[8],导致工艺流程复杂、冶炼成本提高、提取难度加大,目前并未得到有效回收。

微生物冶金技术(生物堆浸)具有工艺处理规模大、能源资源消耗量低以及环境污染小等优势,其已在铜、镍、钴、锌、铀、金等有色金属低品位矿、尾矿、废石的浸出中得到广泛使用^[9],但针对黑色页岩的浸出工艺及理论方面研究相对较少。有研究发现,当分别采用氧化亚铁硫杆菌和氧化硫硫杆菌浸出黑色页岩时,由于矿物来源不同,浸出结果存在一定差异,其中鸬鸟地区黑色页岩的钒浸出率最高可达87%^[10]。Wei等^[11]以5 g/L的 Fe^{2+} 为能源物质,使用氧化亚铁硫杆菌浸出含钒页岩脱碳样,钒的浸出率可达62.39%。董颖博等^[12]利用B. M菌从

黑色页岩钒尾矿中浸出钒,在初始 $pH=7.0$ 、震动速度为170 r/min、蔗糖添加量为20 g/L的条件下,B. M菌对尾矿进行10天的浸出,钒的浸出率可达67.32%。

然而,在堆浸过程中,受矿堆体积及传热影响,不同深度温度不同,需适应不同温度的浸矿菌以提高浸出效果。当前研究中常用的细菌多为自养型中温菌(如氧化亚铁硫杆菌及氧化硫硫杆菌),而适应其他温度环境的中等嗜热菌及高温菌对黑色页岩中钒、镍、钼的浸出能力尚未深入探索。本研究选取三组不同温度适应性的浸矿微生物,系统开展黑色页岩钒、镍、钼的生物浸出实验,依据浸出率筛选高效专属浸矿菌株,并对其进行耐矿驯化,旨在为黑色页岩生物浸出技术的深入研究奠定实验基础。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验所使用矿样为陕西某地所采集的黑色页岩,主要有价元素组成见表1。数据表明,黑色页岩中钒、镍、钼的品位较低,仅有0.71%、0.52%、0.11%,另外含有少量的镁、钠、铝、铁等元素。

表1 黑色页岩矿样主要有价元素组成(质量分数)

Table 1 Main valuable element composition of black shale(mass fraction)

%

元素	Si	S	Mg	Na	Al	Fe	V	Ni
含量	24.0	4.89	4.68	3.41	1.71	1.50	0.71	0.52
元素	Ba	P	Cr	Zn	Zr	Mo	Ti	Cu
含量	0.36	0.29	0.20	0.15	0.14	0.11	0.05	0.02

对黑色页岩中钒镍钼进行物相分析,结果见表2。表2数据表明,钒主要以铁氧化物/黏土矿物和云母类矿物为赋载体,总含量为0.71%,具备核心开发价值,这类钒的溶解需破坏矿物晶格,通常需要在酸性环境中或借助氧化剂辅助浸出;镍以硫化镍和硅酸盐矿物为主,总含量为0.52%,这类镍多嵌入长石、辉石等硅酸盐矿物晶格中,浸出难度较大;钼以硫化钼为主,总含量为0.11%,氧化活性较低,需更强的氧化条件才能有效浸出。

本研究将采用实验室保存的多种混合菌种,包括中温混合菌、中等嗜热混合菌以及高温混合菌等,并对其进行培养与耐矿驯化。驯化过程从矿浆浓度1%开始,每7天按1%的梯度逐步提高至矿浆

浓度10%,使细菌逐步适应渣样环境。

实验选用的培养基为9K培养基,其具体配方为:A液, $(NH_4)_2SO_4$ 0.9 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.15 g, K_2HPO_4 0.15 g, KCl 0.03 g, $Ca(NO_3)_2$ 0.003 g,蒸馏水240 mL;B液, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 13.41 g,蒸馏水60 mL,用0.22 μm 滤膜过滤。将A液灭菌后,加入B液并调整 pH 值,即可得到用于培养的9K培养基

1.2 实验方法

对黑色页岩矿物进行制样,确保矿物粒度中-200目占比达到90%,以此为基础开展生物浸出研究。浸出条件设置如下:初始 pH 值为1.5,浸矿菌接种量为10%,矿浆浓度为5%。所有实验均在恒温摇床培养箱中进行,摇床转速设定为150 r/min,浸

表 2 黑色页岩矿样钒镍钼物相分析(质量分数)**Table 2** Phase analysis of vanadium, nickel and molybdenum in black shale(mass fraction) %

相态	成分	含量
云母中钒	V	0.17
电气石及石榴石中钒	V	0.03
铁氧化物及粘土类矿物中钒	V	0.51
总钒	V	0.71
硫酸镍中镍	Ni	0.009 9
硫化镍中镍	Ni	0.31
硅酸盐中镍	Ni	0.20
总镍	Ni	0.52
氧化钼中钼	Mo	0.010
硫化钼中钼	Mo	0.10
总钼	Mo	0.11

出时间为 30 d。在浸出过程中,每 3 d 测定体系的 pH 值和氧化还原电位(Eh)。浸出结束后,通过测定各组浸出渣中钒、镍、钼的含量,计算各元素的浸出率,计算方法见式(1)。

$$R_i = \frac{\omega_0 m_0 - \omega_1 m_1}{\omega_0 m_0} \quad (1)$$

式中: R_i 为元素*i*的浸出率,%; ω_0 为原矿种元素*i*的质量分数,%; m_0 为原矿的质量,g; ω_1 为浸出渣金的质量分数,%; m_1 为浸出渣的质量,g。

浸出过程中,pH 值的测定采用奥立龙-868 型 pH 计(Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts),每次测定前需使用标准液进行校正;氧化还原电位 Eh 采用 UJ34D 型高电阻直流电位差计(SUNTEX, Taipei, China)进行测定。对于黑色页岩原矿及浸出渣,经消解处理后,采用 5800VDV 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)(Agilent Technologies, Santa Clara, California)测定钒、镍、钼 3 种元素的含量。通过实验筛选出较优的浸矿菌,并利用高通量测序技术对其群落组成进行分析,以查明生物浸出体系中的优势菌种。

2 结果与讨论

针对不同微生物所适应的环境温度差异,本研究分别设置浸矿温度为 30℃、45℃及 60℃,以涵盖不同温度类型的微生物。同时,根据各类微生物代谢所需能源物质的差异,分别添加单质硫(S^0)和亚铁

离子(Fe^{2+}),以进一步考察不同温度条件下微生物的选育效果。具体试验变量设置见表 3。

表 3 不同温度下浸矿菌对黑色页岩的生物浸出实验条件**Table 3** Experimental conditions for bioleaching of black shale by leaching bacteria at different temperatures

实验编号	微生物种类	能源物质	温度
WZ-1	中温混合菌	S^0	30℃
WZ-2	中温混合菌	Fe^{2+}	30℃
WZ-3	中等嗜热混合菌	S^0	45℃
WZ-4	中等嗜热混合菌	Fe^{2+}	45℃
WZ-5	高温混合菌	S^0	60℃
WZ-6	高温混合菌	Fe^{2+}	60℃
WZ-7	无菌对照	—	60℃

2.1 不同浸矿菌体系电位及 pH 变化

浸出体系的电位和 pH 变化能够反映微生物在浸出过程中的代谢活性。在铁氧化菌的作用下,体系中的 Fe^{2+} 会被氧化为 Fe^{3+} ,导致体系电位升高;而在硫氧化菌的作用下,体系中的硫会被氧化为硫酸,导致体系 pH 降低。此外,在浸出过程中,矿物中的铁、硫等组分也会被溶出进入溶液,而钙、镁等氧化矿物则会消耗体系中的酸,这些因素同样会影响电位和 pH 的变化。

实验过程中监测的电位及 pH 结果如图 1 所示。中温混合菌和中等嗜热混合菌在浸出过程中,整体电位呈上升趋势,实验后期达到较高水平并保持稳定;而高温菌在浸出过程中电位增长不明显。在 pH 变化方面,除添加 S^0 的高温菌组外,各组别 pH 均呈下降趋势;其中,添加 Fe^{2+} 的高温混合菌在浸出后期 pH 相较其他组别更低。

2.2 不同浸矿菌体系浸出率的变化

在生物浸出过程中,pH 值与氧化还原电位是影响浸出效果的关键因素。因此,考察钒、镍、钼浸出率与电位、pH 的相关性,对于优化黑色页岩的强化浸出工艺具有重要意义,并有助于初步探究钒、镍、钼在生物浸出过程中的溶出行为。

如图 2 和图 3 所示,添加 Fe^{2+} 的中温混合菌、中等嗜热混合菌和高温混合菌体系中,钒的浸出率相对较高。钒浸出率与体系电位无明显相关性,而与 pH 值密切相关。在同一组微生物中,pH 较低的组

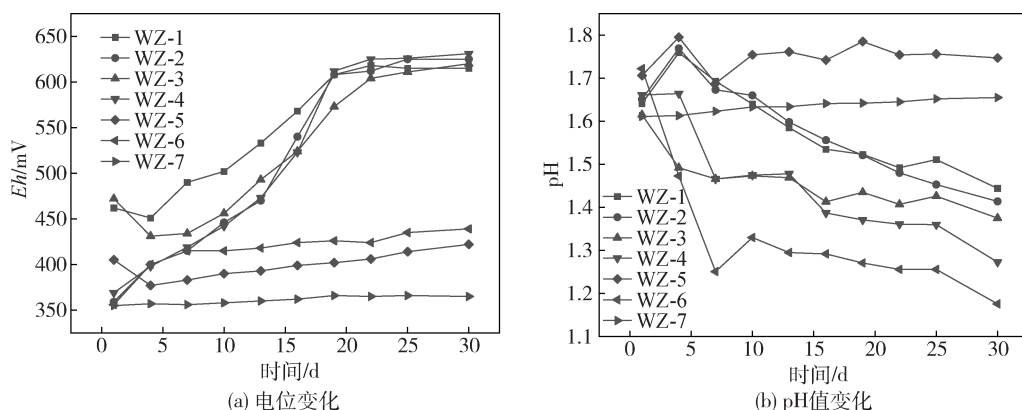


图1 不同浸矿菌浸出体系的电位和pH值变化

Fig. 1 Variations of potential and pH in leaching systems with different bioleaching bacteria

别其钒浸出率更高,最高可达70%以上。镍的浸出率在不同微生物体系中始终保持较高水平,均可达85%以上。钼的浸出率普遍较低,主要受体系电位

影响。其中,中温混合菌和中等嗜热混合菌的钼浸出效果相对较好,浸出率可达20%;而高温混合菌体系由于电位较低,几乎无法有效浸出钼。

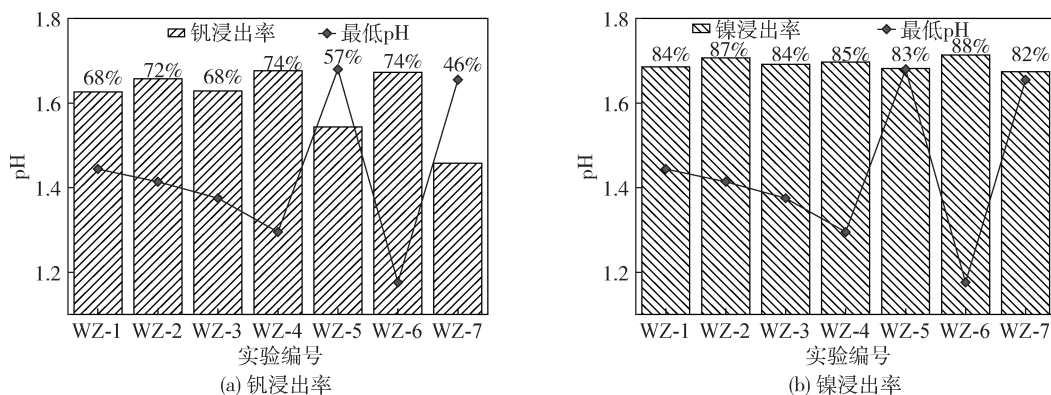


图2 不同浸矿菌浸出体系中钒、镍浸出率与最低pH值

Fig. 2 Leaching rates of vanadium and nickel and the minimum pH values in different bioleaching systems

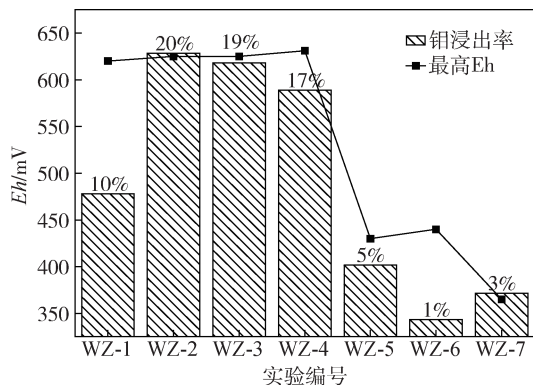


图3 不同浸矿菌体系钼浸出率与最高Eh

Fig. 3 Molybdenum leaching rates and maximum Eh values in different bioleaching systems

综合钒、镍、钼三类金属的浸出效果,确定30℃为最优浸出温度。在该温度条件下,钼的浸出率最

高(20%),钒的浸出率保持在较高水平(68%),且镍的浸出率稳定(84%)。此外,中温条件(30℃)无需额外加热设备,工业能耗较低,经济性优于45℃和60℃。综合考虑钒、镍、钼的生物浸出率,选择中温混合菌作为后续研究的重点对象,并将其命名为WZ-Y,以应用于黑色页岩生物浸出工艺的开发和浸出机理的研究。

2.3 菌群结构分析

选择中温混合菌作为浸矿初始菌种,并对其进行耐矿驯化,从1%矿浆浓度开始逐步提高至10%,最终获得黑色页岩专属浸矿菌。对黑色页岩驯化前的初始菌群及驯化后的浸矿菌群分别进行高通量测序检测。由图4可知,驯化后的浸矿微生物中主要包含亚铁钩螺菌(*Leptospirillum ferriphilum*)和

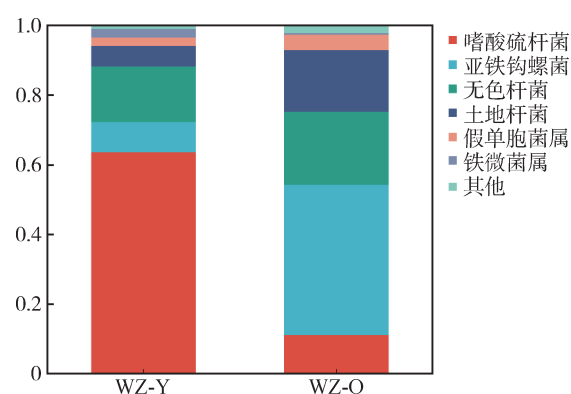


图4 黑色页岩浸矿菌种群结构(WZ-Y初始菌, WZ-Q浸矿菌)

Fig. 4 Microbial community structure of leaching bacteria during black shale bioleaching (WZ-Y: initial bacteria; WZ-Q: leaching bacteria)

嗜酸硫杆菌(*Acidithiobacillus*),同时存在一定量的无色杆菌(*Achromobacter*)、不动杆菌(*Acinetobacter*),以及少量的假单胞菌属(*Pseudomonas*)、铁微菌属(*Ferrimicrobium*)等。铁、硫作为这些微生物重要的能量来源,可作为微生物浸出的强化能源物质使用。经过驯化后,嗜酸硫杆菌和硫氧化杆菌的比例有所增加。根据图5可知,该菌群的功能涉及能源生产与转换、次生代谢物的合成与运输等,这些功

能对微生物浸出具有促进作用。

上述试验结果表明,黑色页岩生物浸出的自养菌主要包括氧化亚铁硫杆菌、氧化硫硫杆菌以及亚铁钩螺菌等,这些菌株也是当前生物冶金领域应用最广泛的微生物。自从氧化亚铁硫杆菌等自养浸矿菌被发现以来,细菌与矿物之间的作用机理一直是学者们关注的核心问题。目前对其作用机理的解释主要有以下三种:直接接触作用、间接作用以及间接接触作用。结合黑色页岩的浸出规律分析,钒、镍、钼等有色金属的浸出过程并非单一反应主导。根据前述分析结果可知,黑色页岩中钒、镍、钼的浸出主要由两部分构成,即矿物结构的分解以及有色金属元素的氧化。

黑色页岩中的主要结构为含钒硅酸盐矿物(如含钒云母等),其分解主要受 H^+ 作用。根据郑秋实等^[13]的研究, H^+ 会与云母结构层间的羟基($-OH$)发生反应,导致云母结构初步破坏,使钒暴露于氧化环境中,进而被氧化为高价态溶解至溶液中,从而促进钒的浸出。在此过程中,微生物的浸出作用主要以间接作用为主,即铁氧化菌对 Fe^{2+} 的氧化作用产生的高电位体系,以及硫氧化菌的产酸作用。镍、钼作为传统的硫化矿,其溶出机理符合硫化矿的生物浸出机理,即在微生物的接触作用和间接氧

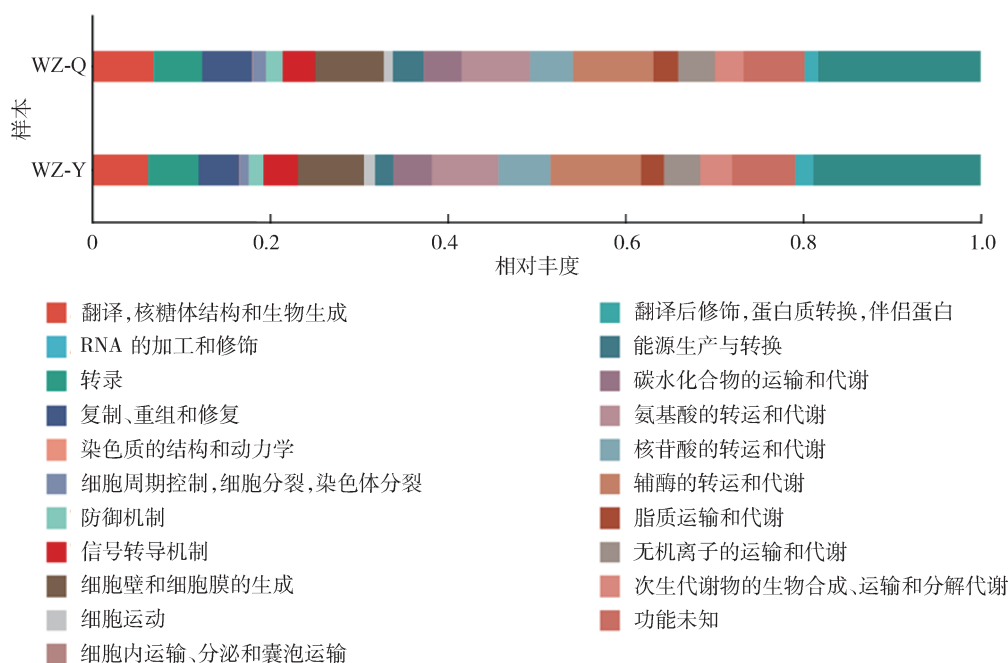


图5 黑色页岩浸矿菌 COG 功能分析

Fig. 5 COG functional analysis of leaching bacteria in black shale bioleaching

化作用下,被氧化为氧化态矿物后在硫酸体系中被浸出。

3 结论

针对传统焙烧、浸出工艺提取黑色页岩中钒、镍、钼存在的问题,本研究选取中温混合菌、中等嗜热混合菌和高温混合菌三组不同温度适应性的浸矿微生物,系统开展黑色页岩钒、镍、钼的生物浸出实验,依据浸出率筛选高效专属浸矿菌株,并对其进行耐矿驯化,得出以下主要结论。

1)不同温度浸矿菌的生物浸出实验结果表明,实验选取的三组混合菌均对黑色页岩中的钒、镍表现出较好的浸出效果,而高温混合菌则无法有效浸出黑色页岩中的钼。因此,中温菌和中等嗜热菌是黑色页岩生物浸出工艺开发的优选菌种,钒、镍、钼的浸出率分别可达72%、87%和20%。

2)选取中温混合菌作为黑色页岩专属浸矿微生物,经过耐矿驯化后,对其进行高通量测序。结果表明,驯化后的浸矿微生物中主要包括亚铁钩螺菌和嗜酸硫杆菌,这些微生物的功能对浸出过程具有促进作用。

3)目前,采用生物浸出处理黑色页岩,金属浸出率相较于其他工艺仍偏低,且钼的浸出效果较差。后续研究应重点关注微生物之间的协同作用、不同温度微生物与堆浸温度场的耦合关系,以及微生物的浸矿机理,以期对黑色页岩中钒、镍、钼的微生物高效绿色提取提供技术与理论支撑。

[参考文献]

- [1] 包申旭,陈波,张一敏. 我国钒页岩提钒技术研究现状及前景[J]. 金属矿山, 2020(10): 20-33.
Bao Shenxu, Chen Bo, Zhang Yimin. Research status and prospect of vanadium extraction technology for vanadium-bearing shale in China[J]. Metal Mine, 2020(10): 20-33.
- [2] 吴优,陈东辉,刘武汉,等. 2021年全球钒工业发展报告[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(5): 1-9.
Wu You, Chen Donghui, Liu Wuhan, et al. Global vanadium industry development report 2021 [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(5): 1-9.
- [3] 王明玉,王学文. 石煤提钒浸出过程研究现状与展望[J]. 稀有金属, 2010, 34(1): 90-97.
Wang Mingyu, Wang Xuewen. Research status and prospect of vanadium leaching processes from stone coal [J]. Rare Metals, 2010, 34(1): 90-97.
- [4] 李红湘,颜文斌,蔡俊,等. 助浸剂亚硝酸钠对石煤中钒浸出

- 率的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(4): 13-19.
Li Hongxiang, Yan Wenbin, Cai Jun, et al. Effect of sodium nitrite as leaching aid on vanadium leaching rate in stone coal [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2019, 47(4): 13-19.
- [5] Wang Fei, Zhang Y, Huang Jing, et al. Mechanisms of aid-leaching reagent calcium fluoride in the extracting vanadium processes from stone coal[J]. Rare Metals, 2013, 32(1): 57-62.
- [6] 陆岷,张一敏,刘涛,等. 石煤提钒钠化焙烧中烧结现象的研究[J]. 稀有金属, 2009, 33(6): 894-897.
Lu Min, Zhang Yimin, Liu Tao, et al. Sintering action of NaCl calcination during extracting vanadium from stone coal [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(6): 894-897.
- [7] 高峰,华骏,颜文斌,等. 石煤清洁焙烧提钒工艺[J]. 有色金属工程, 2020, 10(5): 44-48.
Gao Feng, Hua Jun, Yan Wenbin, et al. Clean-roasting technology of extracting vanadium from stone coal [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(5): 44-48.
- [8] 王淼,温建康,李文娟,等. 选冶联合回收石煤中伴生战略金属钒镍钼的研究进展[J]. 稀有金属, 2023, 47(6): 881-892.
Wang Miao, Wen Jiankang, Li Wenjuan, et al. Research progress on recovery of associated strategic metals vanadium, nickel and molybdenum from stone coal by combined process of beneficiation and metallurgy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(6): 881-892.
- [9] Wen Jiankang, Chen Bowei, Shang He, et al. Research progress in biohydrometallurgy of rare metals and heavy nonferrous metals with an emphasis on China [J]. Rare Metals, 2016, 35(6): 433-442.
- [10] 冯孝善,叶立扬,王献凤,等. 氧化硫硫杆菌或氧化铁硫杆菌溶浸含钒石煤的研究[J]. 浙江农业大学学报, 1981(2): 103-116.
Feng Xiaoshan, Ye Liyang, Wang Xianfeng, et al. Study on leaching of vanadium-containing rock coal with thiobacillus thiooxidans or t. ferrooxidans [J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1981(2): 103-116.
- [11] Wei Dunpei, Liu Tao, Zhang Yimin, et al. Vanadium bioleaching behavior by *Acidithiobacillus ferrooxidans* from a vanadium-bearing shale[J]. Minerals, 2018, 8(1): 24.
- [12] 董颖博,赵钰,林海,等. 胶质芽孢杆菌淋洗石煤提钒尾渣中重金属研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1992-2001.
Dong Yingbo, Zhao Yu, Lin Hai, et al. Study on heavy metals in vanadium tailings leaching from stone coal by bacillus mucilaginosus [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6): 1992-2001.
- [13] 郑秋实,张一敏,薛楠楠,等. 钒页岩晶格特性及钒迁移配位转化机理研究[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(05): 18-24.
Zheng Qiushi, Zhang Yimin, Xue Nannan, et al. Mechanism study on lattice properties of vanadium-bearing shale and

vanadium migration and coordination transformation [J]. China

Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(05): 18–24.

Selection of specific leaching bacteria for vanadium, nickel and molybdenum in strategic mineral black shale

Lu Yuanhang^{1,2,3,4,5,6}, Wen Jiankang^{1,3,4,5,6}, Mo Xiaolan^{1,3,4,5,6}, Yang Xinlong^{1,3,4,5,6}, Sun Jianzhi^{1,3,4,5,6},
Yang Hongying²

(1. National Engineering Research Center for Environment-friendly Metallurgy in Producing Premium Non-ferrous Metals, China GRINM Group Co., Ltd., Beijing 101407, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. GRINM Resources and Environment Tech. Co., Ltd., Beijing 101407, China;

4. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;

5. Beijing Engineering Research Center of Strategic Nonferrous Metals Green Manufacturing Technology, Beijing 101407, China;

6. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 101407, China)

Abstract: Black shale stands as a strategically vital mineral resource across China, distinguished by vast reserves and extensive geographical distribution. These geological formations encapsulate critical rare metals—vanadium, nickel, and molybdenum—yet remain substantially untapped due to subeconomic grades and complex metallogenic characteristics. Bioleaching emerges as a transformative extraction technology, wherein heap bioleaching processes demonstrate compelling advantages for shale resource development through operational scalability, minimized energy expenditure, and reduced ecological impact. In this study, three groups of bioleaching bacteria with distinct temperature adaptabilities (mesophilic mixed bacteria, moderate thermophilic mixed bacteria and thermophilic mixed bacteria) were selected to conduct systematic bioleaching experiments for vanadium, nickel and molybdenum from black shale. The primary conclusions are summarized as follows. All consortia exhibited pronounced efficacy in extracting vanadium (57%~74%) and nickel (83%~88%) from black shale matrices. The leaching percentage of molybdenum is relatively low: while the thermophilic consortium achieved merely 1%~5% extraction, mesophilic and moderate thermophilic variants attained 10%~20%. Subsequent designation of the mesophilic consortium as the optimized biological extractor enabled high-throughput genomic analysis, revealing functional dominance by *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus* spp., after domestication, the proportion of *Acidithiobacillus* spp. increased. These taxa demonstrated synergistic roles in iron/sulfur oxidation critical to metal solubilization. At present, the metal leaching efficiencies of black shale via bioleaching remain lower than those of other technologies, and the leaching performance of molybdenum is unsatisfactory. Further research should focus on the synergistic effects among microorganisms, the coupling relationship between temperature-adapted microorganisms and the temperature field in heap leaching, as well as the bioleaching mechanism. This work is expected to provide theoretical basis and technical support for the efficient and green bio-extraction of vanadium, nickel and molybdenum from black shale.

Key words: black shale; bioleaching; extraction of vanadium, nickel, and molybdenum; strain screening and breeding; high-throughput sequencing; leptospirillum ferrooxidans; acidithiobacillus