doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.031

铍渣工艺矿物学特征及其水洗脱硫工艺研究

赵庆朝[1,2],李学亮[1],朱阳戈[1],翁鸿蒙[3],许 东[4],马晓磊[5],周 杰[5]

(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 东北大学,沈阳 110819;
3. 新疆有色金属研究所有限公司,乌鲁木齐 830063;
4. 富蕴恒盛铍业有限责任公司,新疆 阿勒泰 836107;
5. 新疆有色金属工业(集团)有限责任公司,乌鲁木齐 830099)

摘 要: 铍渣是绿柱石硫酸法提铍过程中产生的固体废物,其成分复杂且含残留铍等有毒组分,长期堆存存在严重的环境安全隐患。本研究系统开展了铍渣的工艺矿物学、环境属性及碳酸钠协同水洗脱硫工艺研究,旨在为铍渣的无害化处理与资源化利用提供理论依据。采用XRF、XRD、SEM-EDS、TG-DSC、激光粒度分析及BET比表面积测定等手段进行系统表征,并通过正交试验优化水洗脱硫工艺参数。结果表明:铍渣放射性核素比活度及内外照射指数均远低于《GB 6566—2010》A类建材限值,放射性风险可忽略;但其浸出液呈强酸性(pH=3.02),Be浸出浓度达到54.8 mg/L,为《GB 5085.3—2007》危险废物鉴别标准限值的2 740倍,属高浸出毒性危险废物。铍渣主要化学组成为SiO_2(71.72%)、CaO(10.12%)和SO_3(15.43%),物相由二水石膏、硬石膏、角闪石及大量非晶态硅质相构成;其平均粒径为167 nm,比表面积高达175.03 m^2/g,呈高单分散纳米颗粒特征。SEM-EDS揭示铍渣为由硅酸盐玻璃微珠、硫酸盐晶体、碳质有机残留及微量富铁锰相构成的复相体系,其中碳质残留为动物胶絮凝剂分解产物,为TG曲线中温段失重提供了直接证据。正交试验表明,各因素对脱硫效果的影响顺序为碳酸钠用量>反应时间>反应温度>液固比;最优条件(碳酸钠用量为20%、温度为60 ℃、时间为120 min、液固比为5∶1)下渣中S含量降至0.25%,脱硫机制为CO_3^{2-}取代石膏中SO_4^{2-}生成$CaCO_3$沉淀,SO_4^{2-}以Na_2SO_4形式转入液相,同时Be损失可忽略。本研究明确了铍渣的高环境风险根源,揭示了微观结构与宏观性质的关联机制,为铍渣中硫的选择性脱除提供了可行技术路径。

关键词: 铍渣;环境属性;工艺矿物学;危险废物;脱硫

中图分类号: TD926 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)08-0344-13

Study on Process Mineralogical Characteristics of Beryllium Slag and Its Water Washing Desulfurization Process

Zhao Qingchao[1,2], Li Xueliang[1], Zhu Yangge[1], Weng Hongmeng[3],
Xu Dong[4], Ma Xiaolei[5], Zhou Jie[5]

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. Xinjiang Nonferrous Metals Research Institute Co., Ltd., Urumqi 830063, China;
4. Fuyun Hengsheng Beryllium Industry Co., Ltd., Altay 836107, Xinjiang, China;
5. Xinjiang Nonferrous Metals Industry (Group) Co., Ltd., Urumqi 830099, China)

Abstract: Beryllium slag is a solid waste generated during the sulfuric acid leaching process of beryl for beryllium extraction. Its complex composition and residual toxic components, including beryllium, pose significant environmental hazards upon long-term stockpiling. This study systematically investigated the process mineralogy, environmental characteristics, and a sodium carbonate-assisted water-washing desulfurization process of beryllium slag, aiming to provide a theoretical basis for its harmless treatment and resource utilization. The slag was

收稿日期: 2026-08-02
基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2024A03002-4)
作者简介: 赵庆朝(1987—),男,山东聊城人,硕士,高级工程师,主要从事固废资源化利用研究。
通信作者: 朱阳戈(1985—),男,山东临沂人,博士,正高级工程师,博士生导师,主要从事矿物浮选研究。

comprehensively characterized using XRF, XRD, SEM-EDS, TG-DSC, laser particle size analysis, and BET specific surface area measurement, and an orthogonal experiment was conducted to optimize the desulfurization parameters. The results indicated that the specific activity of radionuclides and both internal and external exposure indices in the beryllium slag were well below the Class A building material limits specified in GB 6566—2010, rendering its radiological risk negligible. However, the leaching solution was strongly acidic (pH=3.02), and the leaching concentration of Be reached 54.8 mg/L, which was 2 740 times of the limit value of GB 5085.3—2007 hazardous waste identification standard. It was a hazardous waste with high leaching toxicity. The chemical composition of beryllium slag was primarily composed of SiO_2 (71.72%), CaO (10.12%), and SO_3 (15.43%). Its mineral phases consisted of gypsum dihydrate, anhydrite, amphibole, and a substantial amount of amorphous siliceous phases. The slag exhibited an average particle size of 167 nm and a specific surface area as high as 175.03 m^2/g, displaying characteristics of highly monodispersed nanoparticles. SEM-EDS analysis revealed that the beryllium slag constituted a multiphase system composed of silicate glass microspheres, sulfate crystals, carbonaceous organic residues, and trace Fe-Mn-enriched phases; notably, the carbonaceous residues originated from the decomposition of animal glue flocculants, providing direct evidence for the weight loss observed in the medium-temperature stage of the TG curve. Orthogonal experiments demonstrated that the influence of various factors on desulfurization efficiency followed the order: sodium carbonate dosage>reaction time>reaction temperature>liquid-to-solid ratio. Under optimal conditions (sodium carbonate dosage of 20%, temperature of 60 ℃, reaction time of 120 min, and liquid-to-solid ratio of 5∶1), the sulfur content in the slag was reduced to 0.25%, with negligible Be loss. The desulfurization mechanism involved the replacement of SO_4^{2-} in gypsum by CO_3^{2-} to form $CaCO_3$ precipitate, while SO_4^{2-} transfers into the liquid phase as Na_2SO_4. This study clarifies the root causes of the high environmental risks associated with beryllium slag, elucidates the correlation mechanism between its microstructure and macroscopic properties, and provides a feasible technical pathway for selective sulfur removal from beryllium slag.

Key words: beryllium slag; environmental properties; process mineralogy; hazardous waste; desulfurization

0　引言

铍是航空航天、核工业、电子通信及国防军工等领域不可或缺的关键战略性金属材料，其优异的力学性能、低密度、高热导率及优质的热膨胀相容性使其在高端装备制造中具有不可替代的地位[1-5]。我国是世界上少数几个拥有完整铍冶炼加工体系的国家之一，绿柱石硫酸法提铍是目前工业上从绿柱石中提取金属铍的主流工艺，其典型流程为：将绿柱石与方解石等助熔剂混合后进行高温熔融，高温熔体经水淬急冷形成基础玻璃体，再经粉磨、硫酸浸出使铍以可溶性硫酸铍形式进入液相，而渣相经压滤后即为铍渣（工业上常称为“硅渣”）[6-7]。

据统计，每生产一吨金属铍约产生数十吨铍渣，我国每年新增铍渣量巨大，加之历史堆存量，已构成不容忽视的环境负荷[8]。铍渣的化学成分以SiO_2、CaO及SO_3为主，同时残留一定量的铍及其他重金属杂质，其矿物组成涵盖结晶态硫酸盐（石膏、硬石膏）、硅酸盐矿物（角闪石等）以及大量非晶态硅质相，微观上呈现硅酸盐玻璃微珠、硫酸盐晶体及碳质有机残留共存的复相结构[9]。由于铍及其化合物具有高毒性，加之铍渣呈强酸性且铍的浸出浓度远超危险废物鉴别标准限值，已被明确列为HW20类危险废物[10]。在其长期堆存过程中，受雨水淋溶作用，渣中吸附态或可溶性的铍及其他重金属离子易溶出，对土壤及水体造成持续性污染，严重威胁生态系统健康与公共安全[11-13]。因此，铍渣的清洁处置与资源化利用已成为制约铍冶炼行业绿色可持续发展的关键问题。

目前，针对含铍废渣的处置，国内外研究主要集中在以下几个方面：一是固化/稳定化技术，通过使用水泥、粉煤灰、高炉矿渣等胶凝材料对含铍废渣进行稳定化固化处理，用于降低含铍固体废物中金属铍的毒性和迁移性[14-15]；二是火法冶金处理，利用高温熔融或烧结使铍被固化进玻璃相中，降低其浸出[16]；三是湿法化学处理，通过酸浸、碱浸或盐浸等工艺回

收有价金属或脱除有害组分[17-19]。但上述方法均存在一定的局限性，比如固化稳定化技术的长期环境稳定性存在争议；火法冶金技术能耗较高，且铍在高温下存在挥发风险；而湿法技术则面临废液二次污染等问题；具体到铍渣脱硫预处理方面，现有研究多借鉴铜、铅冶炼渣经验，利用碳酸钠作脱硫剂从铜冶炼烟尘浸出渣中脱硫[20]，但铍渣中硫以石膏、硬石膏及非晶态硫酸盐等多种形式共存，其反应活性与传统研究对象差异显著，且碳酸钠脱硫在铍渣体系中的反应选择性至今尚未报道，钙基硫酸盐占主导时，脱硫效率与渣相稳定性往往难以兼顾。现有研究对水洗过程中石膏相的溶解行为、钙离子对可溶硫迁移的影响机制也缺乏系统认知。

基于上述分析，本研究以新疆某铍冶炼公司产生的典型铍渣为研究对象，首先系统开展其环境属性评估(包括放射性水平、浸出毒性)及工艺矿物学表征(化学成分、物相组成、热行为、粒度分布、比表面积、微观形貌及微区化学等)，旨在全面揭示铍渣的理化特征与污染禀赋，明确其高环境风险的根源所在；在此基础上，针对铍渣中硫含量高、易造成后续资源化产品性能劣化的问题，引入碳酸钠协同水洗脱硫工艺，采用正交试验设计优化操作参数，结合固液相化学分析与XRD物相表征，阐明脱硫反应机制。研究成果可为铍渣的危废属性判别、环境风险管控及无害化处理工艺开发提供系统的理论依据与数据支撑，也可为同类有色金属冶炼废渣的资源化利用提供参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

本试验研究用铍渣取自新疆某铍冶炼公司渣场。为确保样品的代表性，考虑到铍渣属高度非均质物料，采样采用随机布点法，在渣堆不同方位及不同深度(表层、中层、深层)共设置不少于10个采样点，采集不同生产批次及堆存时间的铍渣样品，将所采样品充分混合后采用四分法缩分，获得最终试验用综合样品。采样及制样流程参照《危险废物鉴别技术规范》(HJ 298)及《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T 20)执行。

1.2 试验方法

为避免不必要的干预组合，采用较少的试验组合来评定多个因素对铍渣水洗脱硫影响的权重，本文采用正交试验设计方法进行水洗工艺参数设计。其中，液固比为碳酸钠溶于水后液体总重量与铍渣的质量比，选定对铍渣水洗脱硫影响较大的碳酸钠用量(*A*)、水洗温度(*B*)、水洗时间(*C*)、液固比(*D*)4个因素设计正交试验，确定铍渣预处理脱硫的最佳工艺。正交试验因素水平如表1所示。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 The level table of each factor in the orthogonal test

水平	因素			
	碳酸钠用量(*A*)/%	水洗温度(*B*)/℃	水洗时间(*C*)/min	液固比(*D*)
1	5	20	30	3∶1
2	10	40	60	5∶1
3	15	60	90	7∶1
4	20	80	120	9∶1

试验参照表2所示的L16(4^4)正交试验设计方案进行。首先，称取一定质量的碳酸钠(分析纯)溶于去离子水中，经机械搅拌混合均匀后，加热至预设反应温度，制备成不同浓度的碳酸钠溶液。随后，按照试验所需液固比向溶液中加入固定质量的铍残渣，整个浸出过程在恒温磁力搅拌器上进行，设定搅拌速率为900 r/min，以确保固液充分混合及固体颗粒处于悬浮状态。在规定的温度和时间条件下反应结束后，立即将浆料通过铺有定量滤纸的布氏漏斗进行真空抽滤。为彻底去除滤饼中残留的可溶性盐分及夹带的母液，使用去离子水对滤饼进行多次反复洗涤，直至滤液pH值稳定在约7.0，以确保去除可溶性硫酸盐和夹带的溶液。最后，将洗涤后的滤饼置于烘箱中80 ℃干燥至恒重，称重后保存于干燥器内以备后续物相及化学分析；而滤液则保留下来用于ICP-OES分析，以确定铍的损失量。

表2 正交试验设计表L16(4^4)

Table 2 Orthogonal experimental design L16(4^4)

编号	因素*A* Na_2CO_3用量/%	因素*B* 水洗温度/℃	因素*C* 水洗时间/min	因素*D* 液固比
1	*A*1	*B*1	*C*1	*D*1
2	*A*1	*B*2	*C*2	*D*2
3	*A*1	*B*3	*C*3	*D*3
4	*A*1	*B*4	*C*4	*D*4
5	*A*2	*B*1	*C*2	*D*3
6	*A*2	*B*2	*C*1	*D*4
7	*A*2	*B*3	*C*4	*D*1
8	*A*2	*B*4	*C*3	*D*2
9	*A*3	*B*1	*C*3	*D*4
10	*A*3	*B*2	*C*4	*D*3
11	*A*3	*B*3	*C*1	*D*2
12	*A*3	*B*4	*C*2	*D*1
13	*A*4	*B*1	*C*4	*D*2
14	*A*4	*B*2	*C*3	*D*1
15	*A*4	*B*3	*C*2	*D*4
16	*A*4	*B*4	*C*1	*D*3

1.3　测试和表征方法

使用荷兰Panalytical Axios型X荧光光谱仪分析铍渣中各元素含量；使用美国LCEO公司ZPS-231型号碳硫分析仪分析测定铍渣中总硫含量；使用ZPS-947型号ICP-OES测定铍渣中总铍含量；使用德国布鲁克公司D8 ADVANCE X射线衍射仪(XRD)分析测定铍渣的物相组成；使用德国NETZSCH STA 449 F3 Jupiter热分析仪测定铍渣的热性能分析；使用马尔文激光粒度仪Mastersizer 3000分析测定铍渣的粒度分布；使用美国麦克默瑞提克ASAP 2460系列孔径分析仪分析测定铍渣的比表面积；使用蔡司Gemini 300场发射扫描电子显微镜和牛津X-Max电制冷能谱仪研究铍渣的微观形貌和嵌布关系；使用美国Perkin Elmer NexION 300D型号ICP-MS测试铍渣水洗液中各元素含量。

2　试验结果及分析

2.1　铍渣的放射性与浸出毒性

铍渣的放射性检测结果见表3，其天然放射性核素镭-226、钍-232和钾-40的比活度分别为23.52、24.97和25.85 Bq/kg。内照射指数I_{Ra}=0.12，外照射指数I_{γ}=0.17，依据国标《GB 6566—2010建筑材料放射性核素限量》，两项指标均远低于国家标准中A类装饰材料的要求($I_{Ra}\leqslant 1.0$且$I_{\gamma}\leqslant 1.3$)。但GB 6566—2010主要适用于建筑材料产品的放射性评价，直接用于工业废渣的放射性判定存在一定适用性局限，就本批次样品而言，放射性水平处于较低范围，常规处置场景下放射性风险可控，建议后续工程应用中对不同批次原料保持定期抽检以监控波动。

表3　铍渣的放射性检测结果

Table 3　Radioactivity test results of beryllium slag

检测项目		样品名称 铍渣	检测依据
放射性核素比活度C	226 Ra	23.52 Bq/kg	GB 6566—2010
	232 Th	24.97 Bq/kg	
	40 K	25.85 Bq/kg	
内照射指数I_{Ra}		0.12	
外照射指数I_{r}		0.17	

铍渣的重金属及有毒物质含量采用《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)进行检测，结果见表4。结果显示其浸出液pH=3.02，具有强酸性。关键特征污染物Be的浸出浓度高达54.8 mg/L，为国标《GB 5085.3—2007 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》规定的0.02 mg/L限值2 740倍，具有明显的浸出毒性。此外，氰根离子浸出浓度为4.1 mg/L，虽未超标准5 mg/L的限值，但仍需关注，其他重金属如总铬、铜、铅、镍等均有检出，但其浓度均低于标准限值。综上，铍渣因其极高的可浸出铍含量被明确认定为具有危险特性的固体废物，其在贮存、运输及最终处置过程中必须进行严格的安全管理与无害化处理。

表4　铍渣的浸出毒性检测结果

Table 4　Leaching toxicity test results of beryllium slag　/(mg·L^{-1})

检测项目		结果	标准限值
总银		$<2.83\times10^{-3}$	5
pH值		3.02	2.0～12.5
无机氟化物(不包括氟化钙)		4.12	100
烷基汞	甲基汞	$<1.0\times10^{-5}$	不得检出
	乙基汞	$<2.0\times10^{-5}$	
汞(以总汞计)		6×10^{-5}	0.1
铬(六价)		<0.004	5
总铬		0.48	15
铜(以总铜计)		0.78	100
铅(以总铅计)		0.22	5
锌(以总锌计)		0.341	100
砷(以总砷计)		0.032 9	5
硒(以总硒计)		$<1.1\times10^{-4}$	1
镉(以总镉计)		3×10^{-3}	1
镍(以总镍计)		0.09	5
钡(以总钡计)		0.04	100
铍(以总铍计)		54.8	0.02
氰根离子		4.1	5

注：pH值为无量纲。

2.2　铍渣化学成分分析

铍渣的XRF成分分析结果见表5，铍渣是一种以二氧化硅(SiO_2，71.72%)和含钙硫氧化物(CaO，10.12%；SO_3，15.43%)为主要组成的复杂固体废弃物，其高硅、高硫、高钙的化学特征显著；同时，含有少量Al_2O_3(2.03%)及微量Fe、K、Na、Mg等元素，为铍渣特殊的热行为及后续资源化处理工艺提供了明确的成分依据。

表5　铍渣的X射线荧光成分分析结果

Table 5　X-ray fluorescence composition analysis results of beryllium slag　/%

成分	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl
含量	0.282	0.059	2.032	71.716	0.069	15.425	0.016
成分	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	Fe_2O_3	SrO	Be
含量	0.08	10.124	0.043	0.02	0.129	0.005	0.15

2.3　铍渣的物相分析

铍渣的XRD分析结果如图1所示。物相组成以结晶态的二水石膏和硬石膏为主，同时含有少量结构

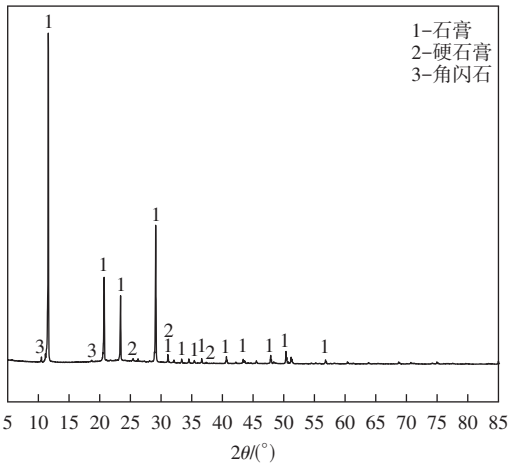


图 1 铍渣的 X 射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of beryllium slag

复杂的角闪石类矿物，表明铍渣中的硫主要以硫酸盐(石膏)形式存在。此外，XRD 图谱在 20°～30°(2θ)范围内呈现明显的非晶态弥散峰，与化学成分中 SiO_2 含量较高(71.72%)的结果相吻合，说明大量硅质组分以非晶态形式存在，如玻璃相或无定形 SiO_2。综上，铍渣为由结晶态硫酸盐和硅酸盐矿物为主，并伴生大量非晶态硅质相构成的多元物相复合体系。

2.4 铍渣的比表面积及粒度分布分析

铍渣比表面积的计算依据见图 2。由图 2(a)所示的氮气吸附等温线可知，随着相对压力升高，吸附量呈缓慢上升趋势，表明铍渣具有一定的吸附能力。选取相对压力在 P/P_0=0.05～0.30 范围内的吸附数据进行 BET 线性拟合，结果如图 2(b)所示，拟合直线具有较好的线性关系(R^2=0.9986)，根据拟合直线斜率和截距，经计算得出铍渣的比表面积为 175.03 m^2/g。铍渣的激光粒度分析结果见图 3，结果显示铍渣具有高度均一的纳米颗粒分布特征，这一结构特性与其高达 175.03 m^2/g 的比表面积密切相关。铍渣的粒度分布曲线呈现典型的单峰形态，主峰位置位于 175 nm 处，峰形尖锐对称。特征粒径参数 D_{10}、D_{50}、D_{90} 分别为 123、171 和 243 nm，平均粒径为 167 nm，这些数据一致表明样品中绝大部分颗粒均分布在 100～250 nm 的尺度范围内。同时，多分散指数小于 0.05，表明体系具有极高的单分散性，粒度分布集中度高。这种以纳米颗粒为主的粒度特征，与其巨大的比表面积共同决定了材料强吸附性、高反应活性及易迁移性等宏观行为，该特性也意味着铍渣的环境与健康风险显著高于常规的微米级渣体，具体表现为易通过吸入暴露、具备远距离迁移能力及高的重金属浸出潜能等特点[21]。

2.5 铍渣的热性能分析

铍渣的 TG-DSC 曲线见图 4，在室温至 200 ℃的低温区间，TG 曲线呈现出一个显著的失重台阶，失重率约 10～15 个百分点，对应的 DSC 曲线上在 100～150 ℃范围内出现一个强烈的吸热谷，这主要是因为 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 的逐步脱水，生成半水石膏乃至无水硬石膏，此过程是该阶段质量损失和吸热效应的主导因素。在 200～600 ℃的中温区间，TG 曲线显示出一个持续且宽缓的失重台阶，失重率约 1～2 个百分点，DSC 曲线在此区间表现为一个宽大的吸热包，该宽缓的失重与吸热效应，主要是因为铍渣中残留的动物胶的热分解。动物胶作为蛋白质类有机物，其分解过程包括脱水、肽键断裂、挥发性组分释放以及碳化等复杂反应，通常在 200～500 ℃范围内发生，这与

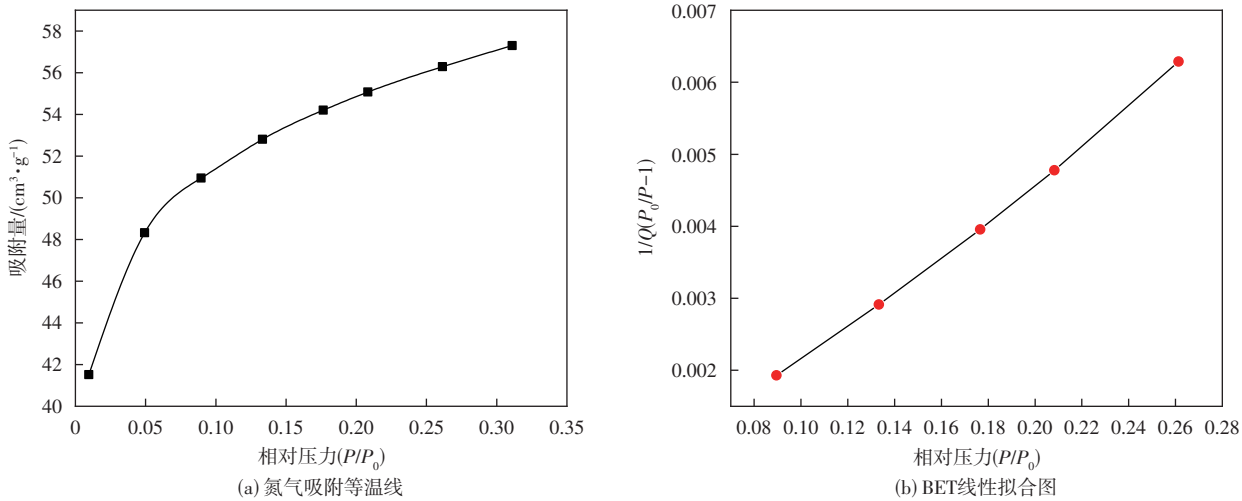


图 2 铍渣比表面积计算依据

Fig. 2 BET analysis of beryllium slag

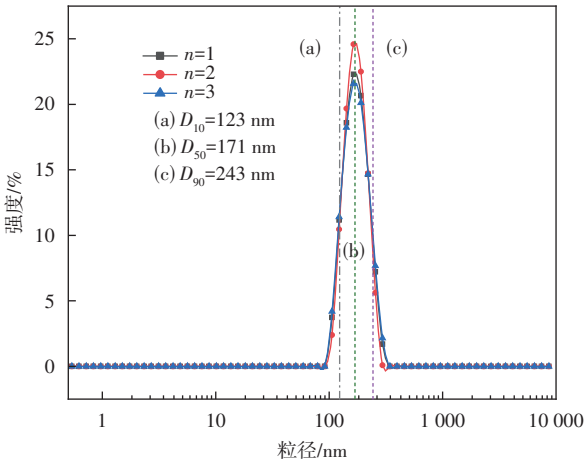


图3　铋渣的激光粒度分布曲线

Fig. 3　Laser particle size distribution curves of beryllium slag

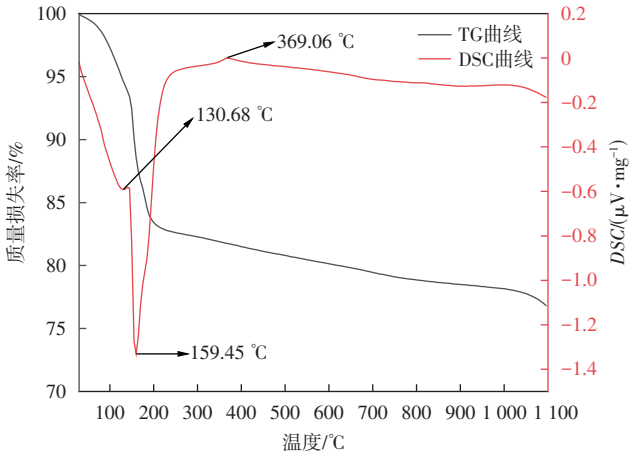


图4　铋渣的热分析曲线

Fig. 4　Thermal analysis curve of beryllium slag

观察到的热效应区间高度吻合。角闪石结构水的脱除可能贡献了本区间的一部分背景效应，但动物胶的分解是导致此宽缓热效应的更主要原因。在 600 ℃以上的高温区间，TG 曲线趋于平稳，无显著质量变化，但 DSC 曲线在 900～1 100 ℃附近出现一个明显的放热峰，这表明此过程为固相反应或晶型转变，而非挥发性物质的脱除，该放热峰可能源于以下几个过程的叠加：硬石膏从正交晶系向六方晶系的晶型转变、非晶态硅酸盐玻璃相的重结晶，以及残留动物胶碳化后形成的无定形碳的燃烧。综上，铋渣的热行为不仅受无机矿物的控制，残留的动物胶对其热分解过程产生了不可忽视的影响，这主要体现在中温区间的失重与吸热效应上，这一认识对于准确理解铋渣的热稳定性、评估其在热处理过程中的行为以及制定相应的热活化或无害化处置工艺都具有重要的指导意义。

2.6　铋渣的微观形貌及主要矿物的显微特征

铋渣的 SEM 照片见图 5，显示了铋渣在不同放大倍数下的典型微观形貌，清晰揭示了铋渣呈现出多尺度、多物相的复杂微观结构。由图 5(a) 可知，在低倍镜下，可见其由数十微米的不规则块状颗粒与细小颗粒通过疏松的团聚体构成，整体结构多孔，这与其巨大的比表面积测试结果相互印证。由图 5(b) (c) 可知，通过更高倍率的观察进一步揭示铋渣主体由两类典型物相构成：一类是表面粗糙、呈板状或片层状堆叠的晶体，其形貌与石膏或硬石膏的结晶习性相符；另一类是表面光滑、边缘圆滑的球形或椭球形玻璃微珠，此为高温过程中形成的非晶态硅酸盐相。由图 5(d) 可知，大量纳米级颗粒密集覆盖于大颗粒表面，同时颗粒间发

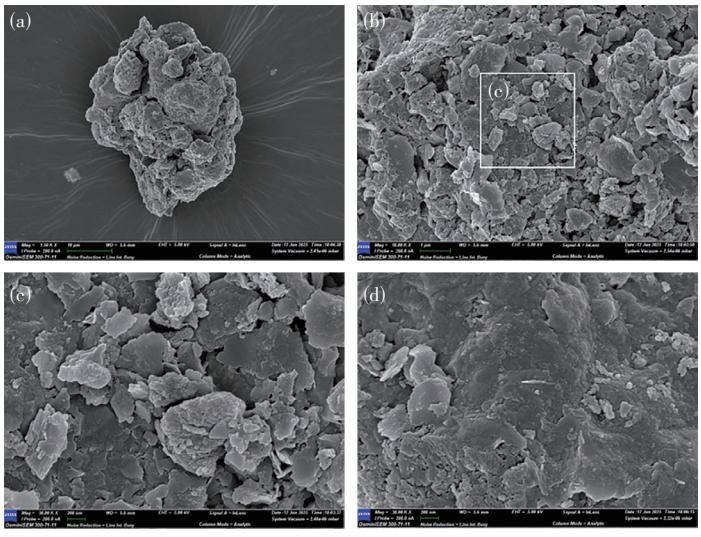


图5　铋渣的SEM照片

Fig. 5　SEM images of bismuth slag

育有丰富的纳米级孔隙。这种由细小颗粒附着与孔隙网络共同构成的微观形貌，是赋予铍渣超高比表面积(195 m^2/g)及相应表面活性的直接物理基础。

图5(a)铍渣颗粒的EDS结果见图6、7。结果表明，其主要由C(71.08 wt%)和O(20.45 wt%)组成，同时含有少量Si、Fe、Al、S、Ca和Mn等元素，表明其主体为含碳有机质类物质，并夹杂少量无机矿物杂质。未检测到Be，可能因其含量低于检测限或存在于非晶态/包裹体相中。面扫描结果直观地展现了各元素的空间分布情况：Si、O分布广泛且重叠度高，构成了整个区域的连续基质，对应硅酸盐玻璃相；Ca与S分布表现出良好的共位性，指示了硫酸钙相的存在；C呈明显的局部团簇状集中分布，其形貌与图5(a)的絮状团聚体一致，清晰地勾勒出了动物胶残留相的分布范围，证实了碳质相的独立存在及其分布的不均匀性；Fe、Mn等微量元素则呈稀疏的点状分布，表明它们可能以微米尺度的独立矿物包裹体形式分散于硅酸盐基质中。

为明确不同微观区域的化学成分，对典型区域进行了点扫描，结果见图8～11。在微区化学成分上，EDS点扫描与面扫描结果证实了微观形貌观察所推断的物相组成，点扫描结果揭示了铍渣显著的成分不均一性，不同微观位置的化学成分差异极大。

图9显示该点位3富含Si(29.58 wt%)、Ca(18.70 wt%)、Al(7.63 wt%)和O等元素，其原子百分比显示O、Si、Al、Ca为主要构成组分。结合该点位对应的片状形貌特征判断，其物相并非纯相硫酸钙，而更可能归属于富钙铝的硅酸盐体系，例如角闪石或其蚀变产物。该物相的存在为整体样品中Si、Ca的高背景值提供了直接的物源解释。

图10显示点位4的成分极为特殊，C质量分数高达75.83 %，同时检出S(2.17 wt%)和Fe(1.67 wt%)等特征元素。结合工艺背景判断，该高碳相并非源于绿柱石原矿的天然矿物组成，而应归属于浸出提纯过程中添加的动物胶絮凝剂残留。该有机添加剂在后续固液分离及洗涤工序中未能被完全脱除，以微细包裹体或表面吸附膜的形式赋存于铍渣颗粒内部及界面。这一发现具有重要意义，它为热重分析(TG)曲线中200～600 ℃温度区间所呈现的持续宽缓失重行为，提供了最直接且合理的物证解释。

图11显示点位5的化学成分以O、Si为主(Si 23.66 wt%)，其原子百分比亦显示O、Si占据绝对主导地位，同时伴有少量Al、Fe等元素。该元素组成特征与球形玻璃微珠的典型形貌相互印证，表明该颗粒的主体物相为非晶态硅酸盐玻璃相，且构成整体试样中高含量SiO_2的主要赋存载体。

综上，SEM-EDS分析结果表明，铍渣在微观尺度上为由硅酸盐玻璃珠、嵌于其中的硫酸盐晶体、弥散分布的碳质有机残留以及微量富铁锰矿物包裹体共同构筑的复相体系。该体系呈现出显著的多级结构特征，其尺度范围由微米级团聚体延伸至纳米级颗粒与孔隙，叠加高度不均匀的化学成分分布，共同赋

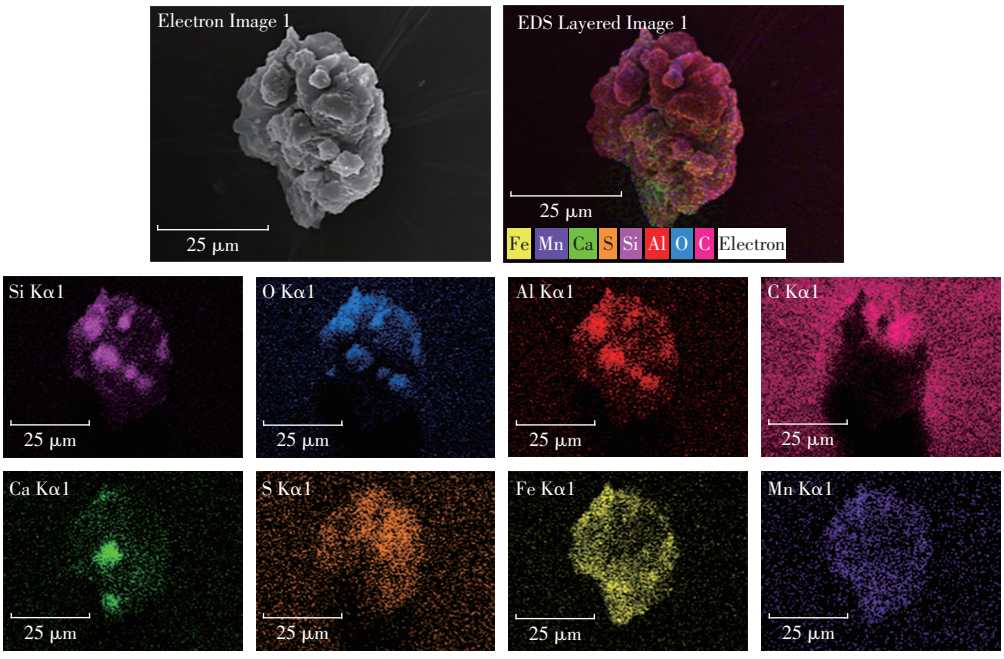


图6 铍渣的SEM-EDS面扫描照片

Fig. 6 SEM-EDS surface scan images of beryllium slag

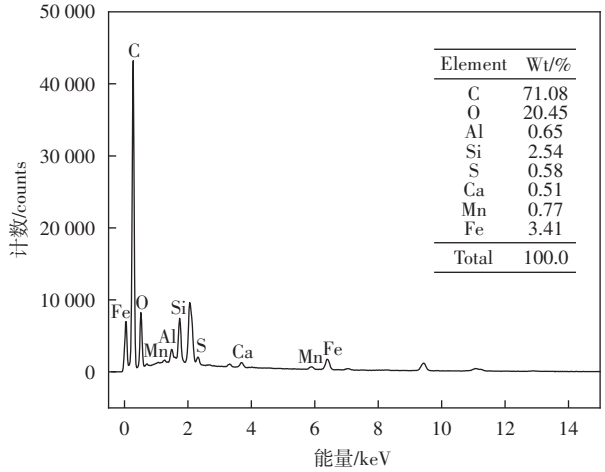


图7　铍渣的EDS分析结果

Fig. 7　EDS analysis results for the powder

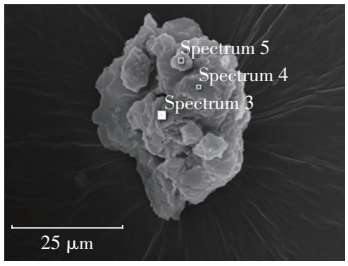


图8　铍渣的SEM-EDS点扫描照片

Fig. 8　SEM-EDS point scan image of beryllium slag

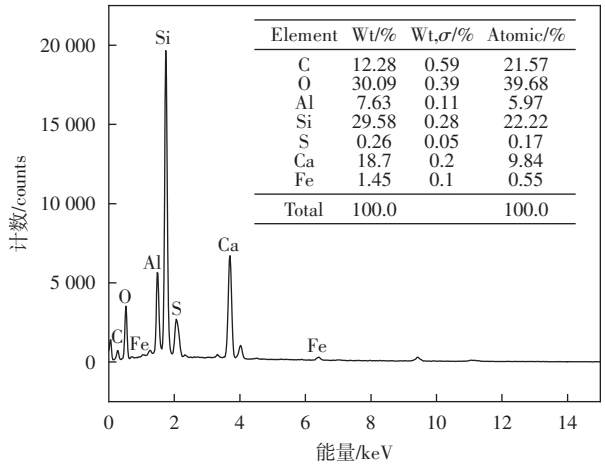


图9　铍渣点位3的分析结果

Fig. 9　Analysis results of the point 3 of the beryllium slag

予了铍渣特殊的物理化学属性：一方面表现为高比表面积所引发的强吸附潜力，另一方面则体现为强酸性介质环境与铍的高浸出毒性之间的协同增强效应。此外，该微观组成与结构也为铍渣在升温过程中的热失重行为及热稳定性差异提供了内在的结构性解释。上述认识对于制定铍渣无害化处理策略及探索其资源化利用路径具有明确的工程指导价值。

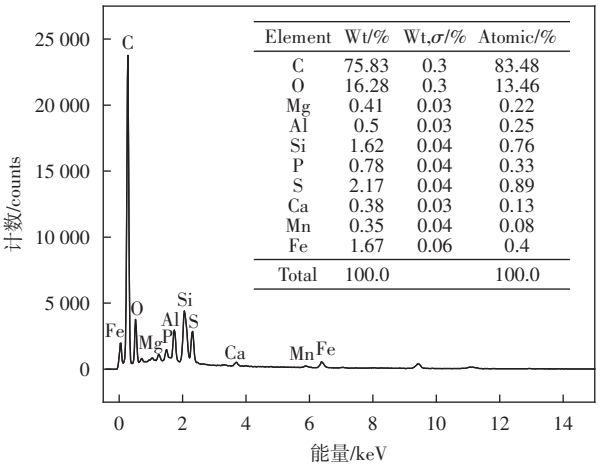


图10　铍渣点位4的分析结果

Fig. 10　Analysis results of the point 4 of the beryllium slag

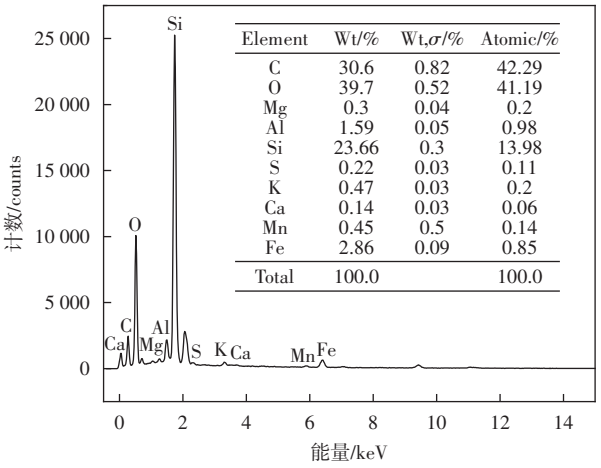


图11　铍渣点位5的分析结果

Fig. 11　Analysis results of the point 5 of the beryllium slag

2.7　正交设计优化铍渣水洗脱硫工艺

本文采用正交试验设计方法制备了16组试样，可以量化四个影响因素对铍渣脱硫的贡献顺序，表6为铍渣水洗脱硫测试结果，K_1、K_2、K_3和K_4分别是因素A、B、C、D的第1水平、第2水平、第3水平和第4水平所在试验中考察指标的平均值；极差R是同一因素考察指标的最大值与最小值之差，其大小代表因素的水平改变对考察指标的影响大小，极差越大说明该因素对考察指标的影响越大。

由表6可知，对正交试验结果进行直观分析可知，铍渣水洗脱硫效果极差$R_A>R_C>R_B>R_D$，即对铍渣脱硫效果影响较大的因素依次为：碳酸钠用量、反应时间、反应温度及液固比。根据表10优选方案可知，当碳酸钠用量为20%、水洗温度为60 ℃、水洗时间为120 min、液固比为5∶1时，铍渣水洗脱硫效果最优。

表6 正交试验结果表

Table 6 Orthogonal experiment results table

编号	Na_2CO_3用量(A)/%	水洗温度(B)/℃	水洗时间(C)/min	液固比(D)	水洗渣中S含量/%
1	5	20	30	3∶1	4.72
2	5	40	60	5∶1	3.09
3	5	60	90	7∶1	3.19
4	5	80	120	9∶1	2.95
5	10	20	60	7∶1	1.57
6	10	40	30	9∶1	2.44
7	10	60	120	3∶1	0.42
8	10	80	90	5∶1	1.36
9	15	20	90	9∶1	0.75
10	15	40	120	7∶1	0.50
11	15	60	30	5∶1	1.03
12	15	80	60	3∶1	0.48
13	20	20	120	5∶1	0.32
14	20	40	90	3∶1	0.20
15	20	60	60	9∶1	0.54
16	20	80	30	7∶1	0.66
K_1	3.487 5	1.84	2.212 5	1.455	
K_2	1.447 5	1.557 5	1.42	1.45	
K_3	0.69	1.295	1.375	1.48	最优方案：$A4B3C4D2$
K_4	0.43	1.362 5	1.047 5	1.67	
R	3.057 5	0.545	1.165	0.22	

同时，由碳酸钠用量占主导地位可知，该过程主要由碳酸根离子(CO_3^{2-})与含硫酸盐相(如$BeSO_4$、$CaSO_4$)之间的化学置换反应所驱动，在此过程中，只有当碳酸根离子保持足够的摩尔比时，才能有效克服溶度积限制，驱动平衡向不溶性碳酸盐和可溶性硫酸钠方向偏移。反应时间的影响显著超过了温度的影响，这表明速率限制步骤是由产物层的内部扩散或难熔硫酸盐基质的逐渐溶解所控制的，而非由化学反应速率本身所控制，后者通常对温度的敏感性更高。对温度的相对较低敏感性意味着离子交换反应的活化能较低，而热力学驱动力在中等温度下就已经足够。最后，液固比的次要影响表明，只要充分混合且离子浓度得以维持，溶液总体积并不会显著限制物质的传递，这进一步支持了以固相转变和孔隙扩散为主，而非外部薄膜扩散为特征的传递机制。

为进一步量化各因素对脱硫效果影响的显著性，对表6正交试验结果进行了方差分析。由于正交表中无空列，将极差较小的因素B(水洗温度)与因素D(液固比)合并作为误差估计项，结果见表7。

由表7可知，因素A(Na_2CO_3用量)的F值为54.21，远大于$F_{0.01}(3,6)=9.78$，具有极显著影响($P<0.01$)；因素C(水洗时间)的F值为6.92，大于$F_{0.05}(3,6)=4.76$，具有显著影响($P<0.05$)；因素B(温度)与因素D(液固比)影响不显著。各因素显著性顺序为：$A>C>B>D$，与极差分析结果一致。其中A的贡献率达到89.08%，进一步证实碳酸钠用量是脱硫效果的主导性因素。

在确定碳酸钠脱硫最优工艺条件的基础上，进一步设置清水对照试验，以评估水洗介质对脱硫效果的贡献。表8为仅以清水为水洗介质、在不同水洗参数条件下处理铍渣的试验结果。由表8可知，无论水洗温度、时间及液固比如何变化，清水对铍渣中硫含量的脱除效果均极为有限。此前，通过碳酸钠用量正交试验及直观分析已明确，各因素对铍渣脱硫效果的影响顺序为：碳酸钠用量(R_A)>反应时间(R_C)>反应温度(R_B)>液固比(R_D)，其中碳酸钠用量为主导性因素。

表7 正交试验方差分析结果

Table 7 Results of variance analysis for orthogonal experiment

方差来源	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F值	显著性
A(Na_2CO_3用量)	22.997 6	3	7.665 9	54.21	$P<0.01$
C(水洗时间)	2.935 2	3	0.978 4	6.92	$P<0.05$
误差($B+D$合并)	0.848 6	6	0.141 4	—	—
总和	25.816 4	15	—	—	—

注：$F_{0.05}(3,6)=4.76$，$F_{0.01}(3,6)=9.78$。

表8　对照组试验结果

Table 8　Results of the control group experiment

编号	Na_2CO_3用量(A)/%	水洗温度(B)/℃	水洗时间(C)/min	液固比(D)	水洗渣中S含量/%
17	0(清水)	室温	0.5	5∶1	9.35
18	0(清水)	60	2.0	5∶1	9.38
19	0(清水)	室温	2.0	9∶1	9.76
20	0(清水)	60	0.5	9∶1	9.26

基于正交试验结果优化所得的最优方案为：碳酸钠用量为20%、水洗温度为60 ℃、水洗时间为120 min、液固比为5∶1。作为对照，在同等水洗参数下以清水替代碳酸钠进行试验，结果表明，清水水洗后渣中硫含量变化甚微，与正交试验中碳酸钠用量的极差分析结论高度吻合。该对照试验进一步证实，碳酸钠的化学作用，而非水洗操作本身的物理携带效应，才是实现铍渣脱硫的关键机制。

在正交设计确定的最优条件下($A4B3C4D2$)进行了验证试验。所得的水洗残渣和萃取液经过系统表征，以评估脱硫效率和元素分布情况。固相和液相的分析结果分别总结于表9和表10中。由表9可知，经最优条件水洗后，铍渣残渣中S含量降至0.25%，较水洗前大幅降低，表明碳酸钠协同水洗可有效脱除铍渣中残留的硫酸根组分。与此同时，残渣中Na含量为2.39%，说明部分钠以离子交换或可溶性钠盐形式残存于固相之中；Ca含量为14.00%，与铍渣中硫酸钙及硅酸盐物相的赋存特征基本吻合。Be含量仅为0.18%，在水洗过程中未发生明显溶出，表明该条件下铍的损失可忽略不计，水洗操作对目标有害元素(S)具有较高的选择性。

表10的浸出液分析结果进一步印证了上述结论。浸出液中S的最终含量高达5 469.71 mg/L，表明大量硫元素以可溶性硫酸盐形式进入液相而被有效脱除，与此同时，浸出液中Na浓度达到11 536.46 mg/L，与固相中Na含量升高(表8)及Ca的固相富集现象构成完整的物料平衡链条，共同揭示了碳酸钠脱硫的主导机制：碳酸根与钙离子结合生成$CaCO_3$沉淀，硫酸根则以Na_2SO_4形式被释放至液相，从而实现硫从固相向液相的转移与脱除。浸出液中Ca浓度较低，则从液相角度进一步证实了钙主要以碳酸盐或难溶硫酸盐形态滞留于渣相中。值得注意的是，浸出液中Be未检出，进一步证实最优水洗条件下铍元素无明显溶出损失，水洗工艺对铍具有良好的保留效果。

综合表9与表10的固液两相分析结果，最优水洗工艺能够高效脱除铍渣中的硫组分，同时有效抑制铍的溶出损失，具有良好的工艺选择性与操作可行性。

正交试验结果表明，碳酸钠用量是影响铍渣脱硫效率的主导因素。为探究其作用机理，对最优条件下制备的水洗渣进行了XRD物相分析，结果如图12所示。由图12可知，水洗后原生石膏($CaSO_4\cdot 2H_2O$)的衍射峰完全消失，同时新生成了碳酸钙($CaCO_3$)的特征峰。该物相转变直接证明：碳酸钠水洗过程

表9　最优水洗工艺条件下水洗渣的化学元素组成

Table 9　Chemical composition of the washed residue under the optimal washing process conditions　/%

编号	S含量	Be含量	Ca含量	Na含量
Y1	0.25	0.18	14.00	2.39

表10　最优水洗工艺条件下浸出液中溶解元素的浓度

Table 10　Concentration of dissolved elements in the leaching solution under the optimal washing process conditions　/(mg·L^{-1})

编号	元素	最终含量
Y1	Na	11 536.46
Y1	Ca	5.45
Y1	S	5 469.71
Y1	Be	未检出

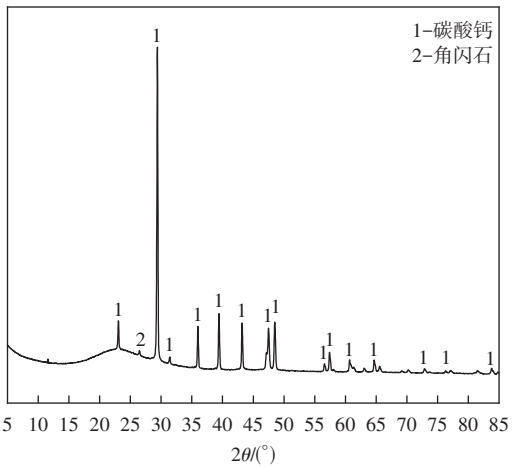


图12　水洗铍渣Y1样品XRD图谱

Fig. 12　XRD spectrum of the water-washed beryllium slag sample Y1

中，CO_3^{2-}取代石膏晶格中的SO_4^{2-}，生成更难溶的$CaCO_3$沉淀，SO_4^{2-}则以Na_2SO_4形式转入液相实现脱除。XRD物相分析结果与前述固液化学成分分析(表8、表9)相互印证，完整揭示了碳酸钠协同水洗脱硫的化学本质。

3 结论

1)铍渣放射性核素比活度及内外照射指数均远低于《GB 6566—2010》A类建材限值，放射性风险可忽略；但其浸出液呈强酸性，Be浸出浓度达54.8 mg/L，为《GB 5085.3—2007》限值2 740倍，属高浸出毒性危险废物，环境风险显著。

2)铍渣主要化学组成为SiO_2、CaO和SO_3，物相由二水石膏、硬石膏、角闪石及大量非晶态硅质相构成，属晶质与非晶质共存的复相体系；其平均粒径为167 nm，比表面积高达175.03 m^2/g，呈高单分散纳米颗粒特征，强吸附性与易迁移性加剧了其环境与健康暴露风险。

3)热分析显示，铍渣失重呈三阶段特征：室温～200 ℃失重10～15个百分点，对应二水石膏脱水；200～600 ℃失重1～2个百分点，归因于残留动物胶热分解；＞600 ℃的放热峰源于硬石膏晶型转变与非晶硅重结晶。

4)碳酸钠协同水洗可高效脱除铍渣中硫组分：正交试验表明各因素影响顺序为碳酸钠用量＞时间＞温度＞液固比，最优条件(碳酸钠用量为20%、水洗温度为60 ℃、水洗时间为120 min、液固比为5∶1)下渣中S降至0.25%，脱硫机制为CO_3^{2-}取代石膏中SO_4^{2-}生成$CaCO_3$沉淀，SO_4^{2-}以Na_2SO_4形式转入液相；同时Be损失可忽略，实现了硫的选择性脱除与铍的有效保留，但这也说明单一水洗脱硫不能实现铍渣无害化，水洗渣仍属危险废物，该工艺本质为预处理工序，其价值在于消除硫膨胀风险、中和酸性环境，后续必须耦合铍的稳定化/固化处理方可满足安全处置要求。

参考文献

[1] 孙传尧，朱阳戈，宋振国，等. 我国锂铍钽铌矿产资源选冶加工现状与展望[J]. 中国工程科学，2024，26(5)：248-258.
Sun Chuanyao，Zhu Yangge，Song Zhenguo，et al. Beneficiation，smelting and material processing of lithium，beryllium，tantalum，and niobium mineral resources in China：current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE，2024，26(5)：248-258.

[2] 胡志强，田祎兰，朱阳戈，等. 川西某伟晶岩型锂铍多金属资源选矿工艺技术研究[J/OL]. 有色金属(选矿部分)：1-26[2026-08-10]. https：//kns. cnki. net/kcms/detail/11. 1840. tf. 20260730. 1643. 012. html.
Hu Zhiqiang，Tian Yilan，Zhu Yangge，et al. Study on Mineral Processing Technology of Li-Be Polymetallic Resources from Pegmatite in Western Sichuan[J/OL]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)：1-26[2026-08-10]. https：//kns. cnki. net/kcms/detail/11. 1840. tf. 20260730. 1643. 012. html.

[3] 李祥，朱阳戈，李东郎，等. 阴阳离子捕收剂对锂辉石与绿柱石浮选分离的作用机理研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(12)：88-98.
Li Xiang，Zhu Yangge，Li Donglang，et al. Mechanism of spodumene and beryl flotation separation by cationic and anionic collectors[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2025(12)：88-98.

[4] 刘晶晶，李少龙，吕泽鹏，等. 铍资源回收与高值化工艺进展[J]. 矿冶，2024，33(5)：714-728.
Liu Jingjing，Li Shaolong，Lü Zepeng，et al. Progress on the recovery and value-increment of resources containing beryllium[J]. Mining and Metallurgy，2024，33(5)：714-728.

[5] 王星. 新疆某锂钽铌铍多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程，2024，44(4)：198-202，206.
Wang Xing. Beneficiation of lithium-tantalum-niobium-beryllium polymetallic ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2024，44(4)：198-202，206.

[6] 胡艺博，吴春兰，林晨坤，等. 国内铍资源开发利用现状及展望[J]. 中国有色冶金，2026，55(2)：27-38.
Hu Yibo，Wu Chunlan，Lin Chenkun，et al. Status and prospect of beryllium resources utilization in China[J]. China Nonferrous Metallurgy，2026，55(2)：27-38.

[7] 李宏，谭秀民，张秀峰，等. 铍资源现状及其选冶技术进展[J]. 有色金属科学与工程，2022，13(4)：44-53.
Li Hong，Tan Xiumin，Zhang Xiufeng，et al. Present situation of beryllium resources and progress in its processing technology[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2022，13(4)：44-53.

[8] 王宇晴，许友泽，奚燕妮，等. 含铍废渣中铍的硫酸浸出行为和动力学研究[J]. 环境工程学报，2025，19(11)：2953-2963.
Wang Yuqing，Xu Youze，Xi Yanni，et al. Beryllium recovery from beryllium-containing residue：insights into acid leaching behavior and reaction mechanisms[J].

Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(11): 2953-2963.

[9] 王宇晴. 含铍废渣铍提取和固化/稳定化机理及技术研究[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2025.
Wang Yuqing. Study on mechanism and technology of extraction and solidification/stabilization of beryllium-containing waste residue[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2025.

[10] 战琪, 姜科, 罗飞杭, 等. 磷酸盐对含铍废渣固化稳定化的条件优化[J]. 山东化工, 2025, 54(15): 179-182, 185.
Zhan Qi, Jiang Ke, Luo Feihang, et al. Optimization the solidification and stabilization of beryllium slag with phosphates[J]. Shandong Chemical Industry, 2025, 54(15): 179-182, 185.

[11] Zhou Zhentao, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, et al. Efficient recovery of beryllium from beryllium-containing glassy slag(GSBe)via sulfuric acid roasting[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 728: 138699. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.138699.

[12] 肖业勇. 含铍废渣稳定化与资源化处置技术研究[D]. 湘潭：湘潭大学, 2023.
Xiao Yeyong. Study on stabilization and resource disposal technology of beryllium-containing waste residue[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2023.

[13] 肖业勇, 戴友芝, 赵媛媛, 等. 含铍废渣陶瓷的制备及其性能研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2024, 46(3): 119-130.
Xiao Yeyong, Dai Youzhi, Zhao Yuanyuan, et al. Study on the preparation and properties of beryllium waste residue ceramics[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2024, 46(3): 119-130.

[14] 战琪, 刘艳. 磷-硅复配药剂对含铍废渣的固化稳定化效果研究[J]. 山东化工, 2024, 53(17): 267-269, 273.
Zhan Qi, Liu Yan. Solidification and stabilization of beryllium containing waste residue by phosphorus-silicon composite agent[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(17): 267-269, 273.

[15] 刘雅妮, 肖业勇, 付广义, 等. 含铍废渣多元复配稳定剂固化/稳定化技术研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 114-126.
Liu Yani, Xiao Yeyong, Fu Guangyi, et al. Study on solidification/stabilization technology of beryllium containing waste residue with multiple stabilizers[J]. Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition), 2023, 45(5): 114-126.

[16] Remizov M B, Kozlov P V, Belanova E A, et al. Immobilization of be-containing HLW in the aluminophosphate glass matrix: the results of the investigation and experience of its industrial introduction on an EP-500/5 vitrification furnace[J]. Glass Physics and Chemistry, 2020, 46(1): 26-34.

[17] 余林, 曾文明, 柯勇, 等. 含铍铁渣铁物相焙烧重构强化铍和铁浸出分离[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(8): 3335-3344.
Yu Lin, Zeng Wenming, Ke Yong, et al. Enhanced leaching separation of Be and Fe from Be-containing iron sludge via roasting reconstruction of iron phases[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(8): 3335-3344.

[18] 张辉, 孟庆波, 余利红, 等. 某复杂低品位铍矿综合回收研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(6): 96-102.
Zhang Hui, Meng Qingbo, Yu Lihong, et al. Study on the comprehensive recovery of a complex low-grade beryllium ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(6): 96-102.

[19] 田宇晖, 李广, 李镯, 等. 新疆某羟硅铍石型铀铍矿浮选试验研究[J]. 湿法冶金, 2025, 44(4): 433-439.
Tian Yuhui, Li Guang, Li Zhuo, et al. Flotation of a beryllianite-type uranium-beryllium co-associated ore in Xinjiang[J]. Hydrometallurgy of China, 2025, 44(4): 433-439.

[20] 郭冬冬, 秦庆伟, 谌宏海, 等. 铜冶炼烟尘加压浸出渣湿法脱硫研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(12): 105-111.
Guo Dongdong, Qin Qingwei, Shen Honghai, et al. Study on hydrometallurgical desulfurization for pressure leaching residue from copper smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(12): 105-111.

[21] 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 等. 颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2982-2990.
Yan Yupeng, Tang Yadong, Wan Biao, et al. Impact of size on environmental behavior of metal oxide nanoparticles[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2982-2990.

（本文编辑 汪东芳）

【缅怀寄语】

那火把，从未离手

入职选矿所之初，孙院士于我而言是山巅的灯塔，光亮却遥远。第一次年度工作会议上，年近八十的他全程站立脱稿演讲一小时，脊背笔直、声音洪亮。在学术交流中，他永远端坐第一排，耐心听完每位青年学者的汇报，温和建议，从未提前离场。

他站在那里，本身就是一种力量。

真正让我心头一震的，是两次再寻常不过的“相遇”。

2022年，孙院士出席集团在安徽铜陵举办的尾矿资源综合利用研讨会。会后我送他去高铁站，注意到他随身携带的手提包——一只普通布包，洗得发白，边角磨毛，拉链头掉了，用一根细绳代替。水杯竟是一个装罐头的玻璃瓶，干干净净，盖子拧得严严实实。那一瞬间，我喉头堵住。一位功勋卓著的院士，简朴至此。他心里装满矿石、选厂和年轻人，却唯独没给自己的行囊留一个位置。

另一次，我参加国重开放基金评审，讨论固废资源综合利用方向项目时，他说：“我们要听主要研究方向的核心人员的意见。”他虽为院士，从不以权威自居，愿俯身听完我们一线研究者的思考。他让我明白，真正的大家不是让人仰视，而是让人愿意靠近。

2025年8月21日，惊闻他离世，怔然良久。可他并未真正离开——那只磨破的布包、罐头瓶水杯、那句温和的叮嘱，都是他留下的火种。

真正的敬意，不是远远仰望，而是接住他递过来的火把。孙院士，您挺立的姿态、写下的文字、谱进歌里的赤诚，我们都记住了。年轻一代选矿人，会带着这份记忆继续前行。您手中的火把，我们接住了——它从未离手，也永不会熄灭。

——赵庆朝