邹周', 宋亮<sup>1,2,3</sup>, 谢晓东', 侯璐璐', 高杰<sup>1,4</sup>

# (1. 新疆农业大学交通与物流工程学院,新疆 乌鲁木齐 830091;2. 新疆大学交通运输工程学院,新疆 乌鲁木齐 830049;3. 新疆交投建设管理有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830099;4. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

**摘要**:这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。伴随着我国锂矿冶炼规模增长,锂渣产量逐年增加,其资源化利用的必要性日趋凸显。为探明锂渣的物化性能及其作为胶凝材料制备人造集料的潜力,首先通过实验表征了宜春市锂云母锂渣和澳大利亚锂辉石锂渣的组成和性能,并分析其对碱激发性能的影响。其次,以氢氧化钠为碱激发剂,采用圆盘冷造粒法制备了两种锂渣人造集料,并测试了其抗压强度。最后,通过玻璃电极法、电感耦合等离子体质谱法、离子色谱法和分光光度法等实验论证了人造集料的环境风险。结果表明:锂云母锂渣的物化性质较锂辉石锂渣更适合用于碱激发制备人造集料,所制得的人造集料强度更高,液体浸出物也不具有环境危害性。

关键词:陶瓷及复合材料;锂云母锂渣;锂辉石锂渣;碱激发;人造集料
doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.027
中图分类号:TD989 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2024)01-0199-08

**引用格式:** 邹周, 宋亮, 谢晓东, 等. 锂渣物化特性及其碱激发制备人造集料实验[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1): 199-206.

ZOU Zhou, SONG Liang, XIE Xiaodong, et al. Physical and chemical properties of lithium slag and experiment on preparation of artificial aggregate using alkali-activation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 199-206.

据统计,2021年全球锂盐产量折合碳酸锂当 量为66万t,同比增长50%。其中,中国锂盐产 量折合碳酸锂当量为46万t,约占全球70%。锂 渣是提取锂盐的副产品,每冶炼1t碳酸锂约产生 30t锂渣,锂渣的资源化利用是当前的热点问题。 我国矿石提锂采用锂辉石和锂云母为主<sup>[1]</sup>。其中, 锂云母由于锂含量低、提纯成本高、技术不成熟 等因素,其应用规模低于锂辉石提锂<sup>[2-3]</sup>。尽管如 此,随着混合酸法与硫酸盐法两种新工艺的成 熟,锂云母提锂的规模日益增大。然而,鲜见锂 云母矿渣方面的研究工作<sup>[4]</sup>。

文献表明<sup>[5-6]</sup>,锂渣在建筑材料中的资源化利用的主要方式是作为水泥基复合材料的外加剂使

用。研究表明<sup>[7]</sup>, 锂渣的掺入可以改善水泥材料的 外加剂对其力学性能、水化性能和微观性, 但由 于锂渣的多孔结构, 其掺入对复合材料和易性具 有负面影响。此外,由于锂渣具有潜在的火山灰 活性,近年来有学者通过碱激发锂辉石矿渣, 采 用圆盘冷造粒法尝试制备人造集料,取得了良好 的效果<sup>[8-11]</sup>。但是,仍鲜见对锂辉石、锂云母矿渣 制备人造集料的性能对比研究。

为此,本文首先通过实验表征了宜春市锂云 母锂渣和澳大利亚锂辉石锂渣的组成和性能,并 分析其对碱激发性能的影响。其次,以氢氧化钠 为碱激发剂,采用圆盘冷造粒法制备了两种锂渣 人造集料,并测试了其抗压强度。最后,通过玻

收稿日期: 2022-11-10

基金项目:国家自然科学基金(52268068);江西省自然科学基金(20232BAB204085);新疆维吾尔自治区自 然科学基金(2020D01A92);中国博士后科学基金(2020M683709XB) 作者简介:邹周(1997-),男,硕士研究生,主要从事人造集料沥青混合料研究工作。 通信作者:高杰(1989-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事路面关键低碳材料与公路路面养护技术研究。 璃电极法、电感耦合等离子体质谱法、离子色谱 法和分光光度法等实验论证了人造集料的环境风险。

1 原材料与实验方法

#### 1.1 原材料

锂云母锂渣由江西省宜春市宝江锂业提供, 呈褐色粉末状(表观密度2.317~2.600 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[12]</sup>, 是回转窑硫酸钠钾混合盐焙烧工艺的副产品<sup>[13]</sup>。 锂辉石锂渣由江西省新余市赣锋锂业提供,进口 自澳大利亚,呈淡黄色粉末状(表观密度为 3.226~3.237 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[14]</sup>,是硫酸法单水氢氧化锂 重结晶工艺的副产品<sup>[15]</sup>。

#### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 锂渣测试表征

采用激光粒度仪测量锂渣粉末粒度,测试前 需将原材料烘干至恒重;采用 X 射线荧光光谱仪 分析锂渣中元素种类及含量,测试前将原材料磨 成-0.074 mm 粉末;采用光学发射光谱技术测试经 过酸溶处理后的粉末样品的目标元素;采用 X 射 线衍射仪分析锂渣物相组成及碱激发后水化产 物,20 设为10~90°;采用傅里叶红外光谱仪对样 品进行化学键检测,采用溴化钾进行常规压片; 采用冷场发射扫描电子显微镜观察锂渣形貌;采 用比表面及孔隙度分析仪评价锂渣比表面积及表 面孔隙,吸附气体 N<sub>2</sub>,脱气温度 300 ℃,脱气时 间 8 h。

此外,为评估锂渣在自然环境中的污染物析 出风险,首先先将 70g 锂渣浸于 700 mL 浸取剂当 中,再以 30 r/min 的转速翻转 18 h 后静置 30 min, 最后用 0.45 µm 滤膜过滤得到浸出液。采用玻璃电 极法测定浸出液的 pH 值;采用离子色谱法测定浸 出液中的氟化物;采用分光光度法测定浸出液中 的氰化物。

#### 1.2.2 碱激发锂渣人造集料的制备与强度测试

采用圆盘冷造粒法制备碱激发锂渣人造集料。首先,取300g锂渣在110℃的烘箱中干燥 12 h。其次,配置10 mol/L的氢氧化钠溶液与 3.3 mol、40℃的水玻璃溶液,以1:3 的比例共混 搅拌5 min,静置24 h。然后,将锂渣倒入圆盘 造粒机中,造粒机圆盘与法线夹角45°,转速 55 r/min,打开圆盘造粒机开关。同时,通过喷雾 式喷射装置,将配置好的碱液喷入圆盘,继续滚 圆造粒5 min。最后,颗粒取出人造集料,在 25 ℃、相对湿度 85% 养生 28 d。采用颗粒强度仪 测试养生后人造集料的抗压强度,选取 5 颗直径 (6±1) mm 的球形颗粒,加载速度 50 mm/min 下测 试集料的极限破坏荷载,计算人造集料的抗压 强度。

## 2 实验结果与分析

#### 2.1 锂渣的测试表征结果

2.1.1 锂渣粒度分布特征

锂云母、锂辉石锂渣的粒度分布见图 1。其 中,锂云母锂渣 D50、D75 和 D100 粒径分别为 52.48、91.2 和 316.23 μm;锂辉石锂渣 D50、D75 和 D100 粒径分别为 26.30、69.18 和 724.44 μm。 可见,锂云母锂渣的粒径分布较锂辉石锂渣更加 集中,这对碱激发造粒过程中人造集料的均匀性 更加有利。





#### 2.1.2 锂渣的化学组成

宣春市锂矿石分为锂云母矿石和锂铁云母矿 石,其中锂云母主要成分是石英、钠长石、白云 母,铁锂云母则为花岗岩的副矿物。两种矿物均 主要产于钠长石化、锂云母化的花岗岩中,与钠 长石、黄玉、细晶石等矿物共生<sup>[16]</sup>。锂云母锂渣 的化学组成见表 1,主要成分为:SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 SO<sub>3</sub>。结合矿物成分 和生产工艺,锂渣中的 CaO 主要来源于锂矿石以 及碳酸锂生产过程中的熟石灰和石灰乳;SO<sub>3</sub>主要 来源于碳酸锂生产中的硫酸盐;SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主要来源于锂矿石;Na<sub>2</sub>O和K<sub>2</sub>O主要来源 于碳酸锂生产中的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,少 部分来源于锂矿石;而其他含量较小的氧化物则 全部来源于锂矿石中的杂质和共生物。 锂辉石来源于澳大利亚西澳耶尔岗地块西南部的格林布什锂辉石矿床,锂辉石与细晶岩、伟晶岩和石英脉伴生,主要的富矿体仅产在伟晶岩脉的钠长石化带中,通常产于钠长石化带内的富电气石亚带<sup>[16]</sup>。锂辉石锂渣的化学组成见表1,主

要成分为: SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SO<sub>3</sub>。结 合矿物成分和生产工艺, 锂渣中的CaO、SiO<sub>2</sub>、 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主要来源于锂矿石; SO<sub>3</sub>主要来源 于氢氧化锂生产过程中的浓硫酸; 其他含量较小 的氧化物来源于锂矿石中的杂质和共生物。

表 1 锂云母锂渣和锂辉石锂渣的主要化学成分/% Table 1 Chemical composition of lithium mica slag and lithium flint lithium slag

					1			U			2			
化合物	$SiO_2$	$Al_2O_3$	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	$F_2O_3$	$Rb_2O$	MgO	MnO	SrO	$Y_2O_3$	$Cs_2O_3$	$SO_3$	F
锂云母锂渣	20.85	17.22	3.01	5.36	28.55	3.21	1.56	1.26	1.02	0.30	0.26	0.21	13.21	3.57
锂辉石锂渣	39.51	20.06	0.28	0.82	19.62	4.67	0.18	1.22	0.32	0.06	0	0.11	12.90	0

除原矿成分不同外,两种锂渣主要差别在 于,锂云母通过 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 等硫酸盐把高温 焙烧后的锂渣转化为硫酸锂,而锂辉石则是直接 用浓硫酸,故锂辉石锂渣 Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 含量远低 于锂云母锂渣。

锂云母锂渣和锂辉石锂渣的钙/硅铝比值分别 为 0.750 和 0.329<sup>[17]</sup>。当此比值大于 1 时,胶凝材 料被认为具有很好的水化活性;小于 1 时,则具 有潜在的火山灰活性所以。因此,锂云母锂渣和 锂辉石锂渣都具有潜在的火山灰活性,且前者的 火山灰活性大于后者,以锂云母锂渣为前驱体材 料生产的人造集料可以获得更优秀的力学性能。

锂云母锂渣和锂辉石锂渣的碱度系数分别为 0.783 和 0.350<sup>[18]</sup>。其中,碱度系数小于 0.5 为酸性 渣,大于 0.5 为碱性渣。因此,锂云母锂渣为碱性 渣,锂辉石锂渣为酸性渣。在人造集料的生产过 程中掺入过多锂辉石需要消耗更多的碱液,增大 了生产成本。

此外,由于锂元素是世界上最轻的金属元素 (相对原子质量仅为3),XRF无法测试其含 量,所以采用 ICP-OES 实验检测锂渣中锂元素的 含量,见表2。可见,锂元素在锂渣中的含量极 低,对碱激发造粒无明显影响。

表 2 锂云母锂渣和锂辉石锂渣的氧化锂含量

Table 2	Lithium oxide content of lithium mica slag and
	lithium flint lithium slag

锂渣	测试溶液 元素浓度 C <sub>o</sub> / (mg/L)	稀释 倍数f	消解液/原样品 溶液元素浓度 C <sub>1</sub> /(mg/L)	样品元素 含量C <sub>x</sub> / (mg/kg)	样品元素 含量 W/%
锂云母	0.67	10	6.69	2404.83	0.24%
锂辉石	1.94	1	1.94	939.92	0.09%

2.1.3 锂渣孔隙分布特征

(1) 氮气吸附/脱附等温曲线

锂云母锂渣和锂辉石锂渣的吸附/脱附等温曲

线见图 2。可见, 二者均为第Ⅲ类等温线, 在 P/P0≦0.01的初始阶段等温线上升但并不陡峭, 未 见单分子层形成, 表明试样中存在少量微孔。在 0.01≦P/P0≦0.8(锂辉石锂渣为0.01≦P/P0≦0.4) 的多层吸附区, 吸附曲线进入平台区。在 0.8≦P/P0(锂辉石锂渣为0.4≦P/P0)的毛细凝聚 区,吸附线急剧上升。这表明, 两种锂渣都属于 无孔或大孔固体材料。对比 Ⅱ型等温线, 在饱和 压力点的吸附量有限。两种锂渣的迟滞回环均为 H3型, 这种类型的回滞环是片状颗粒的非刚性聚 集体的典型特征, 说明两种锂渣都属于层状结构 聚集体、产生狭缝的介孔或大孔材料。





#### (2) 累计孔体积

锂云母锂渣和锂辉石锂渣的累计孔体积见 图 3,二者表面所含孔体积分别为 10.4、30.4 m<sup>3</sup>/kg,表明锂辉石锂渣表面的孔含量远大于锂云 母锂渣<sup>[18]</sup>。锂云母锂渣孔径在-2 nm 占总孔体积的 0.25%,-50 nm 的孔占总孔体积的 71.7%,平均孔 径为 33.6 nm;锂辉石锂渣孔径-2 nm 的孔占总孔 体积的 1.7%, 在-50 nm 的孔占总孔体积的 52.9%, 平均孔径为 11.3 nm。综上分析, 锂辉石 锂渣的大孔含量更高、孔深更大, 而锂云母锂渣 平均孔径更高。在碱激发造粒中, 锂辉石锂渣的 空隙特征可能导致人造集料的空隙率显著提高, 不利于达到理想的力学强度。







图 4 锂云母渣 (a) 和锂辉石锂渣 (b) 的 BJH 微分孔径 吸附和解吸分布

Fig.4 BJH differential pore size adsorption and desorption distribution of lepidolite lithium slag (a) and spodumene lithium slag (b)

两种锂渣的 BJH 孔径分布见图 4(a)、 (b),通常情况下 BJH 孔径分布图以脱附曲线微 分图为准,但由于两种锂渣的脱附曲线孔径分布 均出现 3.8 nm 假峰,故采用吸附曲线微分图为标 准。可见,锂云母锂渣孔径分布广,呈多峰的态 势,最可几孔径为 0.8 nm;锂辉石锂渣孔径集中 于 2~6 nm,呈双峰分布,最可几孔径为 2.8 nm。 此外,两种锂渣的微分孔径分布见图 5,二者微孔 孔径均主要集中于 0.8 nm,但锂辉石锂渣比锂云 母集中度更高。



图 5 锂渣的 HK 微孔微分孔径分布 Fig.5 HK microporous differential pore size distribution of lithium slag

#### (4) 比表面积

两种锂渣的比表面积分别为 1.8544 m<sup>2</sup>/g 和 11.7022 m<sup>2</sup>/g,见图 6。在碱激发造粒中,由于锂 辉石锂渣的比表面积是锂云母锂渣的 6 倍以上, 锂辉石锂渣与碱液之间的接触面更大,能够使反 应更加充分,因此锂辉石基颗粒可能会获得更好 的早期强度。



图 6 锂渣的比表面积微分分布 Fig.6 Specific surface area differential distribution of lithium slag

第1期 2024年2月

#### 2.1.4 锂渣的物相组成分析

图 7 (a) 表明,锂云母锂渣含方沸石、钠长 石、正长岩、天青石、方解石、萤石等矿物以及 硫酸钙、氧化锌、氧化钽、氮化锰等无机物。其 中,方沸石、钠长石和正长岩为主要矿物,其含 量分别为44.5%、23.6%、7.4%,主要来自于锂云 母的伴生矿物;硫酸钙为主要无机物,其含量为 20%,主要来自于生产过程中的硫酸盐和生石灰。 图 7 (b)表明,锂辉石锂渣含锂辉石、石英以及 硫酸钙水合物,其含量分别为:63%、26.1%、 10.9%。其中锂辉石、石英主要来自于锂辉石原 矿,硫酸钙水合物主要来自于生产过程中的浓硫 酸和石灰石。





2.1.5 锂渣的红外光谱分析结果

锂云母锂渣的红外光谱见图 8(a),其中 3163.07、3563.27 和 1620.65 cm<sup>-1</sup>处振动对应于结 晶水的伸缩振动,1429.82 cm<sup>-1</sup>处的振动对应于含 有的碳酸盐,1151.87 cm<sup>-1</sup>处的振动对应于含有的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,1098~1004.97 cm<sup>-1</sup>处的振动对应于 Si-O-Si 的不对称拉伸振动,660.78、599.42 cm<sup>-1</sup>处的 振动对应于锂渣中的硫酸盐。这表明锂云母锂渣 内含碳酸盐、硫酸盐、石英等物相。锂辉石锂渣 的 红 外 光 谱 见 图 8(b),3611.87、3561.08、 1620.65 cm<sup>-1</sup> 处振动对应于结晶水的伸缩振动, 1164.97 cm<sup>-1</sup> 和 1096.60 cm<sup>-1</sup> 代表硫酸盐 SiO<sub>4</sub><sup>-2</sup>反对称, 1096.5~1008.1 cm<sup>-1</sup> 处的之间的振动带对应锂 辉石中 Si-O-Si 的不对称拉伸振动, 795.68 cm<sup>-1</sup> 处 代表硫酸盐 S-O 伸缩。表明锂云母锂渣内含锂辉 石、硫酸盐、石英等物相。



图 8 锂云母锂渣 (a) 和锂辉石锂渣 (b) 的红外光谱 Fig.8 FTIR spectrum of lepidolite lithium slag (a) and spodumene lithium slag (b)

#### 2.1.6 锂渣的微观形貌

图 9 (a~d)可见,锂云母锂渣呈不规则碎石 状的颗粒,主要为方沸石、钠长石和硫酸钙。 图 9 (e~h)可见,锂辉石锂渣呈现层状碎石颗粒 和棒状晶体,分别是锂辉石、石膏和石英。从微 观形貌可以看出两种锂渣均不具备粉煤灰的滚珠 效应,最终成粒效果与球形可能差距较大。

#### 2.2 碱激发锂渣人造集料的抗压强度

以锂云母锂渣和锂辉石锂渣为前驱体材料生产的人造集料的抗压强度见图 10。可见,锂云母锂渣人造集料在 3、7、14、28 d 的抗压强度分别为 1.87、1.92、1.79 和 2.01 MPa;锂辉石锂渣人造集料在 3、7、14、28 d 的抗压强度分别为 0.92、0.88、1.02 和 0.95 MPa。显然,锂云母锂渣人造集料抗压强度比锂辉石锂渣高 75.5%~111.6%,说明锂云母锂渣的火山灰活性远超锂辉石锂渣,更适

合作为前驱体材料生产人造集料。这主要是因为 锂云母锂渣中的无定形铝硅相材料含量高于锂辉 石锂渣,可以在碱激发剂的作用下生成更多的水 化铝硅酸钙或者水化铝硅酸钠凝胶,增大颗粒的 抗压强度。此外,由于锂辉石锂渣是酸性渣,其 无定形铝硅相材料在碱激发剂中分解成铝硅单体 结构单元的速度低于锂云母锂渣,降低颗粒抗压 强度。



图 9 锂云母锂渣  $(a \sim d)$  和锂辉石锂渣的 SEM $(e \sim h)$ Fig.9 SEM of lepidolite lithium slag  $(a \sim d)$  and spodumene lithium slag  $(e \sim h)$ 





#### 2.3 环境影响分析

工业废渣对环境的污染主要是经过雨水的冲

刷后,有害物质溶出进入土地或地下水,最终通 过食物或饮水的方式进入人体当中,因此通过锂 渣浸出液判断锂渣对环境污染的风险。固废浸出 液的检测有无机元素及化合物、有机农药类、非 挥发性有机化合物和挥发性有机化合物等四大 类。锂渣中不含有机物和铜、镉、铅、铬、汞、 钡、镍、银、砷、硒等元素。因此,重点检测 pH 值、铍元素、锌元素、氟化物、氰化物,结果 见表 3。锂云母锂渣的固废浸出液各项标准均未达 到浸出液中危害成分浓度限值,不是具有浸出毒 性特征的危险废物,可以用于碱激发人造集料。 此外,锂云母锂渣固废浸出液呈碱性也与前文分 析一致。

	Table 3 Test results of solid v	vaste leaching solution of lithium mi	ica lithium slag	
检测项目	检测方法	仪器设备	最低标准	检测结果
pH值	玻璃电极法	pH计		8.46
Be	电感耦合等离子体质谱法	电感耦合等离子体质谱仪	$20 \ \mu g/L$	0.24 µg/L
Zn	电感耦合等离子体质谱法	电感耦合等离子体质谱仪	100 mg/L	1.10 µg/L
氟化物	离子色谱法	离子色谱仪	100 mg/L	11.9 mg/L
氰化物	分光光度法	蒸馏装置及分光光度计	5 mg/L	未检测出

表 3 锂云母锂渣固废浸出液检测结果

## 3 结 论

(1) 锂辉石锂渣属于酸性渣,锂云母锂渣为 碱性渣。锂云母锂渣的潜在火山灰活性大于锂辉 石锂渣,锂辉石在碱激发中需要消耗碱性更强的 碱激发剂。锂云母锂渣的组成成分较锂辉石锂渣 更复杂,但其成分均来自于锂原矿中的杂质、在 提锂过程中的添加以及二者的反应产物。 (2)两种锂渣都属于层状结构聚集体、产生 狭缝的介孔材料,孔主要为2~50 nm的介孔,但 锂辉石锂渣表面的孔含量、表面孔的深度均远大 于锂云母锂渣,平均孔径为锂云母锂渣的1/3,比 表面积为锂云母锂渣的6倍。两种锂渣的微孔孔 径均主要集中于0.8 nm,但锂辉石锂渣比锂云母 集中度更高。

(3)两种锂渣均不含有机物和重金属元素, 锂渣浸出液中 pH 值、铍元素、锌元素、氟化物、 氰化物等物质均未达到浸出液中危害成分浓度限 值,不属于危险废物。

(4) 锂云母锂渣造粒的 28 d 抗压强度为 2.08 MP, 远大于锂辉石造粒的 0.95 MP。相比之下, 锂云母较锂辉石更适合碱激发制备人造 集料。

## 参考文献:

[1] 蒋晨啸, 陈秉伦, 张东钰, 等. 我国盐湖锂资源分离提取进 展[J]. 化工学报, 2022, 73(2):481-503.

JIANG C X, CHEN B L, ZHANG D Y, et al. Progress in isolating resources from China salt lakes brine[J]. CIESC Journal, 2022, 73(2):481-503.

[2] 王丁, 陈树. 锂云母-氧化钙高压蒸汽法提锂工艺研究[J]. 应用化工, 2020, 49(12):3043-3045.

WANG D, CHEN S. Study on the process of extracting lithium from lepidolite-calcium oxide by high pressure steam[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12):3043-3045.

[3] Samoilov V I, Onalbaeva Z S, Adylkanova M A, et al. Complex loosening of lepidolite concentrate by sulfuric acid[J]. Metallurgist, 2018, 62(1):29-33.

[4] 何飞, 高利坤, 饶兵, 等. 从锂云母中提锂及综合利用的研 究进展[J/OL]. 矿产综合利用: 1-9[2022-11-01].

HE F, GAO L K, RAO B, et al. Research progress on lithium extraction and comprehensive utilization from lepidolite[J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1-9[2022-11-01].

[5] TAN H B, ZHANG X, HE X, et al. Utilization of lithium slag by wet-grinding process to improve the early strength of sulphoaluminate cement paste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205:536-551.

[6] TAN H B, Li X G, He C, et al. Utilization of lithium slag as an admixture in blended cements: Physico-mechanical and hydration characteristics[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed, 2015, 30(1):129-133.

[7] ZHANG L, LV S Z, LIU Y, et al. Influence of lithium slag on cement properties[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(3):23-27.

[8] THOMS J, HARILAL B. Properties of cold bonded quarry dust coarse aggregates and its use in concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62:67-75.

[9] KUEHL H. Slag cement and process of making the same: US, 900939, A[P]. 1908-10-13.

[10] RAKHIMOVA N R, RAKHIMOV R Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 509:31-41.

[11] Kiventer J, Perumal P, Yliniemi J, et al. Mine tailings as a raw material in alkali activation: A review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(8):1009-1020.

[12] 陈志友, 苏小琼, 杨志文, 等. 锂云母锂渣性质及利用研 究现状[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3):877-882.

CHEN Z Y, SU X Q, YANG Z W, et al. Research status of properties and utilization of lepidolite lithium Slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3):877-882.

[13] 余裕森, 崔立雪, 王云帆, 等. 锂云母提锂技术的研究进展[J/OL]. 中国有色金属学报: 1-32[2022-11-01].

YU Y S, CUI L X, WANG Y F, et al. Research progress of lithium extraction technology from lepidolite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1-32[2022-11-01].

[14] 李保亮, 尤南乔, 朱国瑞, 等. 蒸养条件下锂渣复合水泥的水化产物与力学性能[J]. 材料导报, 2019, 33(24): 4072-4077. LIBL, YOUNQ, ZHUGR, et al.

Hydration products and mechanical properties of steam curedlithium slag blended cement[J]. Materials Reports, 2019, 33(24): 4072-4077.

[15] 李保亮, 尤南乔, 曹瑞林, 等. 锂渣粉的组成及在水泥浆体中的物理与化学反应特性[J]. 材料导报, 2020, 34(10):10046-10051.

LI B L, YOU N Q, CAO R L, et al. Composition of lithium slag powder and its physical and chemical reaction characteristics in cement paste[J]. Materials Reports, 2020, 34(10):10046-10051.

[16] 王核, 黄亮, 白洪阳, 等. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望[J/OL]. 大地构造与成矿学: 1-19[2022-11-01].

WANG H, HUANG L, BAI H Y, et al. Types, distribution,

development and utilization of lithium mineral resources in China: review and perspective[J/OL]. Geotectonica et Metallogenia, 1-19[2022-11-01].

[17] NATH S K, KUMAR S. Evaluation of the suitability of ground granulated silico-manganese slag in Portland slag

cement[J]. Construction & Building Materials, 2016, 125(OCT.30):127-134.

[18] ZHAO B, JAK E, HAYES P C, et al. Phase equilibria in high MgO ferro-manganese and silico-manganese smelting slags[J]. ISIJ International, 2005, 45(7):1019-1026.

## Physical and Chemical Properties of Lithium Slag and Experiment on Preparation of Artificial Aggregate Using Alkali-activation

ZOU Zhou<sup>1</sup>, SONG Liang<sup>1,2,3</sup>, XIE Xiaodong<sup>1</sup>, HOU Lulu<sup>1</sup>, GAO Jie<sup>1,4</sup>

(1.School of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830091, Xinjiang, China; 2.School of Transportation Engineering, Xinjiang University, Xinjiang, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 3.Xinjiang Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Xinjiang, Urumqi 830099, Xinjiang, China; 4.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. With the growth of lithium smelting scale in China, the production of lithium slag increases year by year, the need for its resource utilization is becoming more and more obvious. To explore the physical and chemical properties of lithium slag and its potential as a cementitious material to prepare artificial aggregate, the composition and properties of lithium mica lithium slag in Yichun, China and lithium slag from spodumene in Australia were characterized, and their effects on alkali excitation performance were analyzed. Secondly, two kinds of lithium slag artificial aggregates were prepared by disk cold granulation method with sodium hydroxide as alkali activator, and their compressive strength was tested. Finally, the environmental risks of artificial aggregates were demonstrated by glass electrode method, inductively coupled plasma mass spectrometry, ion chromatography and spectrophotometry. The results show that the physical and chemical properties of lithium mica lithium slag are more suitable for the preparation of artificial aggregates by alkali excitation than lithium pyroxene lithium slag, and the resulting artificial aggregates are stronger and the liquid leachate is not environmentally hazardous.

**Keywords:** Ceramics and composites; Lithium mica lithium slag; Spodumene lithium slag; Alkali activated; Artificial aggre