DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2026.03.011
文章编号:1671-2579(2026)03-0089-11

三元工业固废混料优化设计及强度试验研究

杨术[1],艾毅[2],盛善望[2],李闯民[2*]
(1.广州市高速公路有限公司,广东 广州 510220;2.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

摘要:该文旨在探索粉煤灰、锂矿渣和矿渣粉(三元工业固废)是否可有效替代水泥,作为嵌锁大粒径碎石基层的胶凝材料。采用$U_9(9^4)$均匀设计表设计三元工业固废混料比例试验方案;通过Pearson分析胶砂强度与三元工业固废混料的相关性;借助数理统计软件SPSS 26.0,建立三元工业固废混料胶砂试件的抗折强度和抗压强度的数学模型。研究结果显示:粉煤灰与强度呈较强的线性负相关性,锂矿渣在14 d养护期内与强度相关性较弱,矿渣粉与强度之间存在较强的线性正相关性。通过数学模型的优化,确定了3种工业固废混料的最佳混合比例为:粉煤灰:锂矿渣:矿渣粉=40%:20%:40%。试验证实了三元工业固废混料胶砂的抗折、抗压强度显著提升,为三元工业固废混料在嵌锁结构中的应用提供了有力支持。

关键词:道路工程;工业固废混料;填充式大粒径水泥稳定碎石基层;均匀设计试验;强度试验
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Optimization Design and Experimental Study on Strength of Ternary Industrial Solid Waste Mixtures

YANG Shu[1], AI Yi[2], SHENG Shanwang[2], LI Chuangmin[2*]
(1. Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510220, China; 2. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: This paper aims to explore whether fly ash, lithium slag, and slag powder (ternary industrial solid wastes) can effectively replace cement as cementitious materials for interlocking large-particle crushed stone bases. A uniform design table $U_9(9^4)$ was used to design the test scheme for the mixing ratios of ternary industrial solid waste mixtures; the correlation between the mortar strength and the ternary industrial solid waste mixtures was analyzed by Pearson correlation; with the help of the mathematical statistical software SPSS 26.0, mathematical models for the flexural strength and compressive strength of the ternary industrial solid waste mixture mortar specimens were established. The research results show that there is a strong linear negative correlation between fly ash and strength; lithium slag has a weak correlation with strength within a 14-day curing period, and there is a strong linear positive correlation between slag powder and strength. Through the optimization of the mathematical models, the optimal mixing ratio of the three industrial solid waste mixtures is determined as fly ash : lithium slag : slag powder = 40% : 20% : 40%. The tests confirm that the flexural and compressive strengths of the ternary industrial solid waste mixture mortar are significantly improved, which provides strong support for the application of ternary industrial solid waste mixtures in interlocking structures.

Keywords: road engineering; industrial solid waste mixture; filling-type large-particle cement-stabilized crushed stone base; uniform design test; strength test

0 引言

近年来,长安大学、滁州市公路管理局等单位提出了填充式大粒径水泥稳定碎石基层。该结构介于半刚性和柔性之间,既保留了水泥稳定碎石半刚性基层和柔性基层各自的突出优点,又克服了两者的

收稿日期:2024-12-05 **修回日期:**2025-06-10
基金项目:江西省交通运输厅科技项目(编号:2024YB059)
作者简介:杨术,男,工程师.E-mail:602805375@qq.com
***通信作者:**李闯民,男,博士,教授.E-mail:lichuangmin@126.com

不足[1]。这种材料主要利用大粒径碎石的锁定效应，通过大粒径碎石之间的相互作用，在嵌挤、摩擦等力学作用下，产生一定的内聚力，从而具有较高的稳定性，能够承受较大交通荷载[2-3]。胶凝材料的功能包含两方面：一是填充大粒径碎石和细集料之间的间隙，降低大粒径碎石基层混合料的空隙率，提高混合料的密实度和强度；二是通过水化反应形成一定的胶凝能力，进一步提升大粒径碎石混合料的密实度和强度，能够使胶凝碎石成型并具备一定的抗折、抗压强度。因此，大粒径碎石混合料中的胶凝材料主要起填充和辅助胶凝作用。在“双碳”背景下，采用工业固废替代填充式大粒径水泥稳定碎石基层中的水泥，是一个值得研究探讨且具有社会、经济和环保价值的课题。

用工业固体废物混料代替普通硅酸盐水泥，有望减少水泥用量并缓解与工业固体废物相关的环境问题[4-5]。本文研究当地贮存量大但利用率低的粉煤灰、矿渣粉及锂矿渣的混料设计及其性能。目前，国内外对这3种固废材料进行了大量的试验研究和实践应用。粉煤灰的火山灰活性高，在室温下可与氢氧化钙反应形成胶凝化合物，且粉煤灰含量越高，混凝土耐久性越好[6]。Xin等[7]发现粉煤灰掺量为20%时，混凝土徐变系数较普通混凝土降低；当掺量为50%～80%时，混凝土徐变系数增加，增强了混凝土早期抗裂性；Klemczak等[8]研究了粉煤灰和矿渣粉掺量均为30%的混凝土，发现相较于普通硅酸盐水泥混凝土，掺入大量粉煤灰及矿渣粉等补充胶凝材料能显著降低收缩应变；He等[9]对添加锂矿渣作为胶凝材料的混凝土进行了试验研究，发现适量的锂矿渣有助于改善混凝土的抗压强度、弹性模量、干燥收缩率和蠕变等性能；Liu等[10]研究发现，当锂矿渣掺量为10%～20%时，可以提高混凝土的工作性能；Zhai等[11]研究了锂矿渣的离子熔解性能与掺锂矿渣粉水泥的水化反应与水化过程，发现在水化后期锂矿渣会促进水化产物中棒状斜长石的生成，从而提高强度；陈志友等[12]总结大量文献后发现，混凝土中锂矿渣掺量增加时，需水量增大，同时不利于强度提升，当掺入量高于20%时，砂浆的力学性能下降。矿渣粉与稳定煤矸石、邯钢细粒径钢渣（多在4.75 mm以下）及沥青拌和站回收粉混合，在适量水的作用下，会生成硅酸钙、铝酸钙等具有胶凝作用的水化产物[13]。Mapa等[14]通过分析不同氧化铝含量的矿渣粉对混凝土性能的影响，发现矿渣粉的添加增强了氯化物结合能力，并降低了氯化物扩散率；Song等[15]采用不同的微观方法对矿渣粉代替水泥进行研究，发现掺入矿渣粉可以提高混凝土耐久性、水密性和耐硫酸盐性，但由于早期强度降低和干燥收缩率增大而降低了混凝土质量；Wang等[16]研究低水泥含量及高含量矿渣形成的黏结砂浆，发现其与普通硅酸盐水泥具有不同的水化产物，且具有更好的强度发展效果；孙双月[17]研究发现，如果需要混凝土早期强度高，可以通过提高高炉矿渣粉的用量来实现；包惠明等[18]以粉煤灰为主要原料，矿渣微粉为掺加剂，水玻璃（$Na_2O\cdot nSiO_2$）和氢氧化钠为复合激发剂，标准砂为细集料进行配合比设计研究时发现，影响砂浆抗折强度因素的主次顺序为：水胶比＞矿渣微粉取代率＞胶砂比＞碱激发剂掺量。此外，矿渣微粉替代率增加时，砂浆初凝和终凝时间缩短，碱激发剂掺量越高，砂浆初凝和终凝时间越长。

Lu等[19]通过在水泥砂浆中掺入锂矿渣和矿渣粉两种工业废渣，发现锂矿渣可以活化矿渣粉，提高砂浆的抗压强度；宋维龙等[20]在探究二源/三元工业废渣制备胶凝材料的过程中，制作了粉煤灰与高炉矿渣粉二源复合胶凝材料试样，粉煤灰掺量从50%变化至90%，发现二源复合胶凝材料的抗压强度随着高炉矿渣粉掺量的增加而增大；Talkeri等[21]以矿渣-粉煤灰比例、硅酸钠/氢氧化钠比和氢氧化钠浓度为主要变量，分析常温固化条件下形成的新拌混凝土性能。结果表明，粉煤灰掺入量从10%增加至40%时，混凝土的初凝时间、终凝时间均缩短，且抗压强度随之提高。

综上所述，针对粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉的单掺或双掺已有一定研究成果。研究发现，适量掺入粉煤灰、矿渣粉能有效改善混凝土的耐久性，但会对混凝土的早期强度产生不良影响。在此基础上，学者们发现掺入锂矿渣能有效改善混凝土的抗压强度。因此，本研究拟对粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉进行三掺，制备多元胶凝混料并开展研究。

虽然多元胶凝混料的概念已被提出，但如何确定各种材料的最佳配比仍然是一个问题。需要进一步研究以实现最佳性能和资源利用。研究表明：一种或几种工业固废混料作为胶凝材料可以改善混合料性能，但这些工业固废间的协同作用及其与性能的关系需要进一步研究，以确定适用于不同应用场景的最佳组合方式。为充分、科学地应用当地固废材料，在现有3种固废材料研究基础上，本文提出采

用当地工业固废粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉替代填充式大粒径水泥稳定碎石基层中的水泥。采用有约束的配方均匀设计方法，以抗折强度、抗压强度为优化指标，建立了三元工业固废胶砂试件的强度数学模型，并优化了三元工业固废混料配合比。根据三元工业固废在大粒径碎石混合料中的功能要求，进行了抗压强度、抗折强度验证试验，证实了其填充效果及胶凝性能。研究成果为多元工业固废混料配合比的优化设计提供了可行方法，同时为工业固废资源的合理利用提供了理论和实践基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

1.1.1　粉煤灰

粉煤灰是燃煤颗粒中的一种矿物，主要含有硅酸盐矿物和石英矿物。由于高温晶格的破坏而熔化，并在表面张力的作用下形成大量细颗粒。随着气体温度的突然下降，它固化成玻璃微珠，在气体排放到大气中形成飞灰之前，这些微珠通过湿排放或干排放进行收集和排放[6]。本试验选用粉煤灰为华能安源发电有限责任公司提供的Ⅱ级粉煤灰。

（1）化学组成

粉煤灰化学成分检测结果见表1。

表1　粉煤灰的化学成分

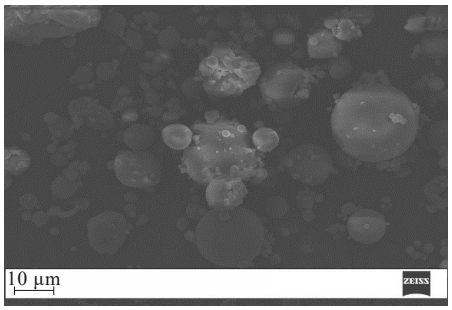
Table 1　Chemical composition of fly ash

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO_2	53.12	SO_3	0.34
Al_2O_3	24.13	K_2O	0.28
Fe_2O_3	7.48	Na_2O	0.17
CaO	2.75	Li_2O	0.83
MgO	0.78		

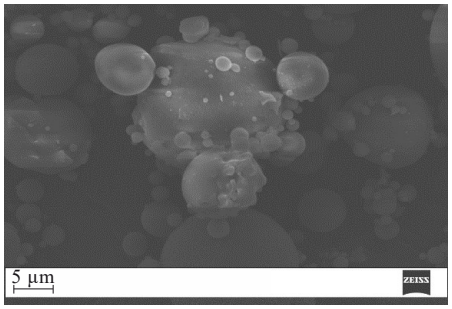
由表1可知：粉煤灰的主要活性成分是SiO_2和Al_2O_3，两者含量越高，粉煤灰活性越高。

使用SEM对粉煤灰进行颗粒细观形貌观察，如图1所示。

从图1可以看出：粉煤灰颗粒表面较为光滑，呈球状，粒径差异较大。大颗粒之间较分散，小颗粒附着在大颗粒粉煤灰表面，出现团聚现象，这种现象称为“子母珠”。这些球形颗粒主要物相是玻璃相，并且可以看到少量的多孔结构颗粒，根据文献可知，这些颗粒为未燃烧碳。



（a）放大1 000倍的粉煤灰颗粒



（b）放大2 000倍的粉煤灰颗粒

图1　粉煤灰SEM图

Figure 1　SEM image of fly ash

（2）物理性能

对粉煤灰各项物理性质指标进行试验测定，结果见表2。

表2　粉煤灰的物理性质指标

Table 2　Physical property indicators of fly ash

项目	细度/%	含水量/%	烧失量/%	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	强度活性指数/%
检测值	15.4	0.06	0.2	2.5	83
规范值	≤30.0	≤1.00	≤8.0	≤2.6	≥70

由表2可知：各项指标均满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)技术要求。

粉煤灰富含硅和铝等成分，具有一定的胶凝性能，可以与水反应形成硅酸盐胶凝。这些硅酸盐胶凝物质在混合和养护过程中有助于形成胶砂的坚固结构。

从XRD测试结果可以看出：粉煤灰的结晶矿物主要以莫来石和石英为主，并含有少量的方解石和氧化铁，说明粉煤灰结晶矿物的晶相元素以硅铝为主。

1.1.2　矿渣粉

矿渣粉与水混合时虽无胶凝性，但与碱溶液混合可表现出一定的胶凝性能。其潜在活性高低主要取决于化学成分与玻璃体结构[22]。本次试验采用S95级矿渣粉，产自江西联达新科建材厂。

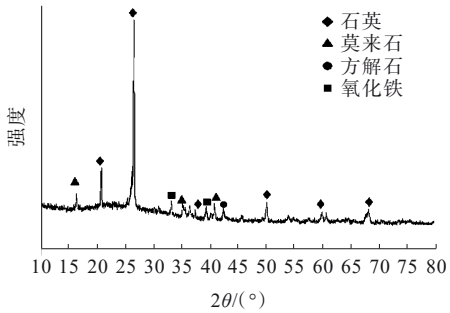


图2 粉煤灰的XRD测试结果

Figure 2 XRD test results of fly ash

(1) 化学组成

矿渣粉的化学成分分析方法与粉煤灰的检测方法相同。检测结果见表3。从表3可知:矿渣粉主要包含的化学成分有CaO、SiO_2和Al_2O_3。

表3 矿渣粉的化学成分

Table 3 Chemical composition of slag powder

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO_2	34.11	MgO	8.49
Al_2O_3	15.31	Fe_2O_3	0.73
CaO	37.25	TiO_2	1.94

(2) 物理性能

对矿渣粉进行物理性质试验测定,矿渣粉物理性能指标如表4所示。

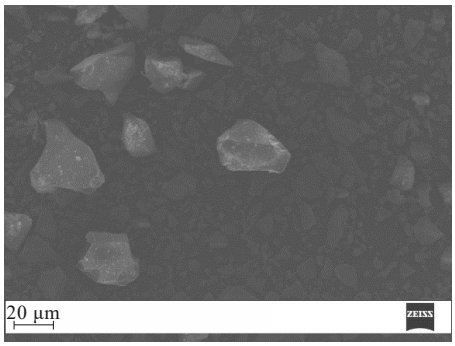
表4 矿渣粉的物理性质指标

Table 4 Physical property indicators of slag powder

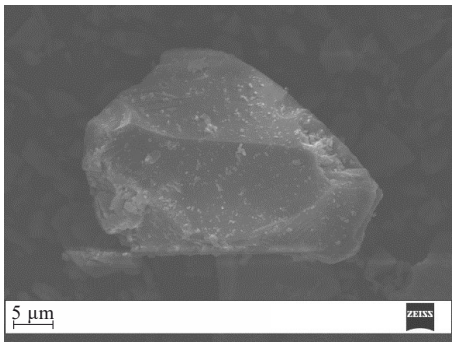
项目	流动度比/%	含水量/%	烧失量/%	密度/(g·cm^{-3})	7 d强度活性指数/%
检测值	96	0.2	0.4	2.84	90
规范值	≥95	≤1.0	≤1.0	≥2.80	≥70

从表4可知:本试验所用的矿渣粉符合《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2017)S95级标准要求。其中,矿渣粉富含硅和铝,通常也具有一定的胶凝性能。它可以与粉煤灰和锂矿渣中的成分相互作用,形成胶结凝胶。

使用扫描电镜对高炉矿渣粉进行细观形貌特征观察,细观结构见图3。矿渣粉主要由玻璃体和结晶体组成,且玻璃体的含量较高,矿渣粉的主要化学成分CaO和Al_2O_3存在于玻璃体物质中。观察矿渣粉的SEM图,可以发现矿渣颗粒存在明显棱角,形状大多是不规则的,并且颗粒表面光滑,颗粒之间较分散,无团聚现象。



(a) 放大500倍的矿渣粉颗粒



(b) 放大2 000倍的矿渣粉颗粒

图3 高炉矿渣粉SEM图

Figure 3 SEM image of blast furnace slag powder

对高炉矿渣粉进行XRD测试,测试结果见图4。矿渣粉的结晶矿物以石英、镁黄长石和方解石的形式存在,无其他矿物相出现,主要以玻璃体结构为主。

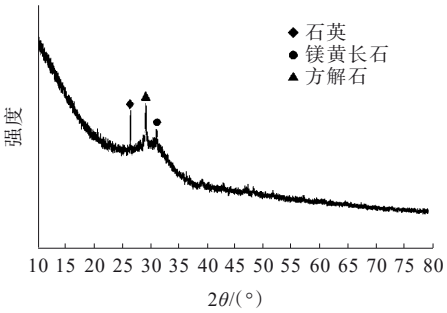


图4 高炉矿渣粉的XRD测试结果

Figure 4 XRD test results of blast furnace slag powder

1.1.3 锂矿渣

本次使用的锂矿渣是对锂云母矿石进行浮选富集后,采用食盐压煮法提炼有价金属后产生的副产物[23]。本试验选择宜春市万载南氏锂业新能源有限公司所产生的锂矿渣。

(1) 化学组成

试验所用锂矿渣化学成分见表5。从表5可知:锂矿渣的主要成分为SiO_2和Al_2O_3,从化学组成上看与粉煤灰相似,因此也具有较好的火山灰活性[24]。

表5　锂矿渣的化学成分

Table 5　Chemical composition of lithium slag

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO_2	55.61	TiO_2	1.47
Al_2O_3	24.12	CaO	1.17
Na_2O	8.64	Fe_2O_3	0.32
SO_3	6.26	MgO	0.12
K_2O	2.29		

锂矿渣中含有一些碱性成分，如氧化钠（Na_2O）和氧化钾（K_2O）。这些碱性成分在与硅和铝等成分反应时可能促进硅酸盐胶凝，有助于三元工业固废材料的胶凝。

（2）物理性能

锂矿渣物理性质指标检测结果见表6。

表6　锂矿渣的物理性质指标

Table 6　Physical property indicators of lithium slag

需水比/%	烧失量/%	细度/%
107	5.34	10.8

1.1.4　水

本次试验用水为洁净饮用水。水的用量是混料形成胶砂的关键因素。水与粉煤灰、锂矿渣和矿渣粉中的硅酸盐成分反应，形成胶凝物质。这些胶凝物质通过黏合集料颗粒，从而形成坚固的大粒径碎石结构。

1.2　试验方法

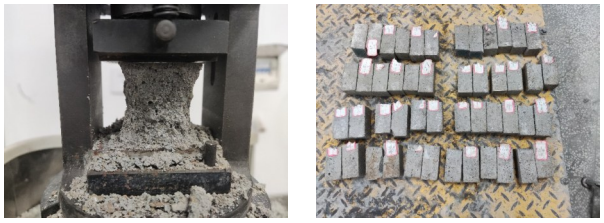
1.2.1　混料的制备及强度测试方法

制作几何尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的胶砂试块，3个试件为一组，记录好试件制作时间，三元固废混料与标准砂的比值统一为1∶3，水灰比为0.5，使用水泥胶砂搅拌机搅拌成型。

根据《水泥胶砂强度检验方法（ISO法）》（GB/T 17671—2021）规定方法测定三元固废胶砂的抗压强度及抗折强度。三元固废胶砂试件及抗压破坏形态如图5所示。

1.2.2　有约束的配方均匀设计方法

均匀试验设计方法是在试验条件范围内挑选出具有代表性点位的方法，均匀试验仅考虑试验点在试验范围内的均匀分散，在因素及水平众多的情况下，可以大大减少试验量[25]。众多学者在均匀设计的基础上进行开发设计，研究有约束的配方均匀设计，即通过确定某几个因素的含量范围，设置好水平数，按独立变量的均匀设计来安排这几个因素，最后通过填补法计算出剩下一个因素对应的掺量水平。



（a）试件照片　　（b）抗压破坏形态

图5　三元固废胶砂试件及抗压破坏形态

Figure 5　Ternary solid waste mortar specimens and compressive failure modes

Li等[26]为检验粉煤灰在水泥混凝土中的适应性，设置粉煤灰掺量为40%～80%，发现随着粉煤灰含量升高，抵抗氯离子渗透能力提高；赵奇才等[27]研究认为，40%掺量的粉煤灰有助于提高混凝土的弹性模量和抗渗性；Dong等[28]研究了锂矿渣在制备磷酸镁铵水泥的物理力学性能方面的应用，发现锂矿渣量的逐渐增加会降低锂矿渣-水泥砂浆的流动性并延长凝固时间，当锂矿渣掺量为20%时为最佳剂量，能有效改善砂浆的机械性能；Qin等[29]使用工业废物中的锂矿渣代替水泥，发现当锂矿渣含量为20%时，可获得最优立方抗压强度、轴向抗压强度和弹性模量；胡艳香等[30]研究了不同掺量工业废料锂矿渣对水泥砂浆抗折、抗压强度的影响，发现10%掺量的锂矿渣可以使水泥砂浆的抗折和抗压强度平均提高20%；20%锂矿渣掺量使抗折强度平均提高19%，抗压强度提高8%；30%锂矿渣掺入后强度略有下降；Wu等[31]测试发现，适当添加矿渣粉有利于提高混凝土的工作性能，能有效降低混凝土流动性的时间损失；李金京等[32]通过对掺加矿渣粉的水泥混凝土的初始开裂时间、裂缝宽度和抗压强度进行研究，结果表明，矿渣粉掺量为30%～40%时，水泥混凝土的综合性能可以得到显著提高。

本文选定3种工业固废，分别为粉煤灰（X_1）、锂矿渣（X_2）、矿渣粉（X_3），胶凝材料总量为100%。结合相关学者研究成果，本研究将锂矿渣掺量设为（0.0，0.2），矿渣粉掺量设为（0.2，0.4），粉煤灰掺量设为（0.4，0.8）。试验约束条件如式（1）所示。

$$\begin{cases} 0.4 \leqslant X_1 \leqslant 0.8 \\ 0 \leqslant X_2 \leqslant 0.2 \\ 0.2 \leqslant X_3 \leqslant 0.4 \\ X_1 + X_2 + X_3 = 1 \end{cases} \tag{1}$$

按照有约束的配方均匀设计方法，在安排试验方案的过程中，需要先将占比较小的锂矿渣与矿渣粉掺量的水平在试验范围内按照独立变量的均匀设计进行水平安排，因此需先确定锂矿渣与矿渣粉掺量水平。

为保证均匀设计试验结果的显著性，更准确地确定锂矿渣与矿渣粉的最佳取值范围，控制锂矿渣掺量X_2及矿渣粉掺量X_3均在约束取值范围内各取9个水平，按照式(1)所示，取矿渣粉掺量和锂矿渣掺量水平的步长均为2.5%，各水平编号及参数见表7。

表7 锂矿渣与矿渣粉掺量因素水平

Table 7 Factor levels of lithium slag and slag powder contents

因素水平编号	锂矿渣掺量X_2/%	矿渣粉掺量X_3/%	因素水平编号	锂矿渣掺量X_2/%	矿渣粉掺量X_3/%
1	0	20.0	6	12.5	32.5
2	2.5	22.5	7	15.0	35.0
3	5.0	25.0	8	17.5	37.5
4	7.5	27.5	9	20.0	40.0
5	10.0	30.0			

9个水平的均匀设计表可选择$U_9(9^4)$或$U_9(9^5)$，当因素数为2时，$U_9(9^4)$、$U_9(9^5)$的偏差值分别为0.157 4、0.198 0，$U_9(9^4)$均匀性更佳。因此，从试验实际和保证试验均匀性方面考虑，采用$U_9(9^4)$均匀设计表设计试验。当因素数取2时，根据$U_9(9^4)$均匀设计表可以得到锂矿渣掺量与矿渣粉掺量的试验方案，然后根据式(1)计算得到粉煤灰的掺量。

根据有约束的配方均匀设计安排的试验方案见表8。

表8 试验安排表

Table 8 Test schedule

试验序号	粉煤灰X_1/%	锂矿渣X_2/%	矿渣粉X_3/%
1	75	0	25.0
2	65	2.5	32.5
3	55	5.0	40.0
4	70	7.5	22.5
5	60	10.0	30.0
6	50	12.5	37.5
7	65	15.0	20.0
8	55	17.5	27.5
9	45	20.0	35.0

由表8可知：粉煤灰掺量水平在设置的掺入量范围内均匀分布，试验设计较为合理，均匀性良好，满足试验设计要求。

1.2.3 Pearson相关性分析

皮尔森相关系数(Pearson Correlation Coefficient)也称皮尔森积矩相关系数，是用来反映两个变量线性相关程度的统计量，常用样本变异系数除以X的标准差与Y的标准差之乘积计算得到，其中相关系数用R表示，n为样本量，分别为两个变量的观测值和均值，R描述的是两个变量间线性相关强弱的程度，取值为$-1\sim+1$，大于0时为线性正相关，小于0时为线性负相关，$|R|$越大，表明相关性越强[33]。一般认为，当$|R|\geqslant0.7$时，相关性较强；当$0.7>|R|\geqslant0.4$时，两变量之间具有中度相关性；当$|R|<0.4$时，则相关性较差。

2 试验结果与分析

2.1 抗折强度

2.1.1 龄期对强度的影响

试验养护周期最长为90 d。表9为粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉三元工业固废混料试样在不同龄期条件下的抗折强度值。

表9 胶砂抗折强度平均值

Table 9 Average flexural strength of mortar

试验序号	不同龄期(d)时的抗折强度/MPa					
	3	7	14	28	60	90
1	0.270	0.491	0.632	0.751	1.041	1.197
2	0.362	0.871	0.994	1.327	1.725	1.869
3	0.620	0.956	1.027	1.297	1.931	2.197
4	0.159	0.358	0.513	0.750	1.127	1.273
5	0.356	0.749	0.835	0.994	1.524	1.751
6	0.735	1.032	1.444	1.755	2.336	2.457
7	0.191	0.352	0.637	0.940	1.461	1.609
8	0.587	0.878	1.097	1.550	2.072	2.261
9	0.526	1.069	1.345	1.831	2.987	3.297

从表9中可知：9组试件的抗折强度随龄期变化分为3个阶段：在养生周期7 d内，强度增加较快；在7～60 d龄期内，抗折强度持续增长，但相较于7 d龄期前增长速度放缓，在60～90 d的养生周期内，强度增长进一步放缓。

2.1.2 相关性分析及回归分析

利用Pearson相关系数(R)对试验结果进行定量分析。根据表9的数据进行整理分析，得出粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉与不同龄期抗折强度的Pearson相关系数，见表10。

表10　固废混料与抗折强度的相关系数

Table 10　Correlation coefficients between solid waste mixtures and flexural strength

龄期/d	三元固废与抗折强度的相关系数 R		
	粉煤灰	锂矿渣	矿渣粉
3	−0.820	0.319	0.840
7	−0.847	0.292	0.906
14	−0.899	0.469	0.803
28	−0.916	0.586	0.709
60	−0.954	0.676	0.673
90	−0.955	0.671	0.680

由表10可知：在不同养生龄期下，粉煤灰与抗折强度之间的相关系数绝对值均大于0.8，且相关系数为负值，说明两个指标之间具有较强的线性负相关；当粉煤灰掺量为50%～80%时，随着粉煤灰掺量的增加，抗折强度降低。锂矿渣在养护14 d之后，随着锂矿渣掺量的增加，抗折强度增大，这与文献中所描述的现象相符[34]。矿渣粉在14 d养生龄期之前相关性系数大于0.8，表明矿渣粉与抗折强度之间具有较强的线性相关；当养生龄期超过28 d后，矿渣粉与抗折强度之间表现出中度的线性相关，分析原因为，矿渣粉的初期水化过程是其中的Ca^{2+}等阳离子与水中的H^+之间的置换，H^+与矿渣粉中的Si—O^-结合生成Si—OH；随置换反应的进行，溶液中的pH值不断升高，硅酸离子和溶液中的$Ca(OH)_2$生成水化硅酸钙凝胶[35]。

本试验组采用有约束的配方均匀设计，各因素水平满足式(1)，在进行数据拟合时，实际只有2个自变量，另一个自变量通过式(1)计算得出。通过分析龄期对强度的影响规律，发现90 d龄期时强度稳定，因此本研究在进行回归拟合的过程中选择90 d龄期强度结果。锂矿渣粉在整个养护龄期内与强度的相关性不强，因此本研究选择粉煤灰和矿渣粉的掺量水平作为数据拟合过程中的自变量，锂矿渣掺量根据粉煤灰和矿渣粉的掺量，由式(1)计算得到。

由表9可知：养生前期的强度增长速率较快，而60 d龄期后强度增长速度变缓。因此，本研究对表9中90 d抗折强度数据，采用二次多项式进行回归拟合分析。

$$y = A_1 + A_2X_1 + A_3X_3 + A_4X_1^2 + A_5X_3^2 + A_6X_1X_3 \tag{2}$$

式中：A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6为二次多项式系数；X_1为粉煤灰掺量(%)；X_3为矿渣粉掺量(%)；y为90 d抗折强度(MPa)。

采用数理统计软件SPSS 26.0对试验数据进行筛分、处理及回归拟合分析，最终输出结果见表11、表12、表13。据此建立了粉煤灰掺量、矿渣粉掺量和90 d抗折强度之间的回归预测方程。

表11　方差分析表

Table 11　Analysis of variance

源	自由度	平方和	均方	F值	显著性
模型	4	3.296	0.824	31.074	0.003
误差	4	0.106	0.027		
校正合计	8	3.402			

表12　拟合效果表

Table 12　Fitting effect

R^2	调整后R^2	德宾-沃森值
0.969	0.938	2.121

表13　回归系数表

Table 13　Regression coefficients

变量	自由度	估计参数值	标准误差	T值	显著性
截距	1	20.362	6.648	3.063	0.038
X_1	1	−45.636	16.286	−2.802	0.049
X_3	1	−19.004	12.610	−1.507	0.206
X_{11}	1	24.752	9.333	2.652	0.057
X_{13}	1	31.815	20.922	1.521	0.203

由表11可以看出：回归方程的显著性为0.003，模型显著有效；表12中自相关检验德宾-沃森值为2.121，接近2，说明该模型具有良好的解释能力，虽然多次回归之后的R^2与调整后的R^2均有所下降，但仍有93.8%的解释能力；观察表13中回归系数的显著性可以看到，部分回归系数的显著性较好，有效性进一步提高，可以认为该二次多项式回归方程是最佳方程。因此，最终建立的粉煤灰掺量、矿渣粉掺量和90 d抗折强度y回归预测方程如式(3)所示。

$$y = 20.362 - 45.636X_1 - 19.004X_3 + 24.752X_1^2 + 31.815X_1X_3 \tag{3}$$

从式(3)可以看出：变量X_1的最高次幂为二次，说明90 d抗折强度与粉煤灰掺量大致呈二次函数关系；而变量X_3及粉煤灰与矿渣粉交互作用X_{13}的最高次幂是一次，说明90 d抗折强度与矿渣粉掺量、粉煤灰与矿渣粉的交互作用呈线性关系。使用Origin 2018作图工具，根据式(3)绘制曲面图如图6所示。

临界点为粉煤灰掺量增加过程中，矿渣粉掺量增加后，抗折强度由逐渐下降变成逐渐上升的关键

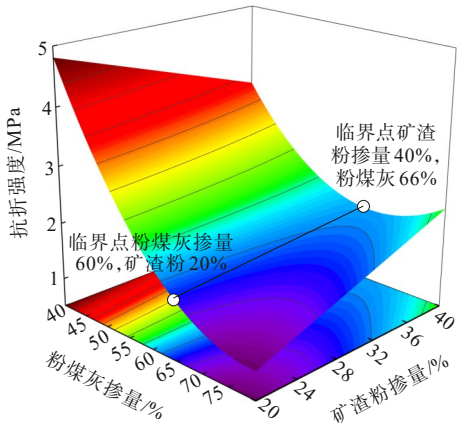


图6 抗折强度回归方程曲面图

Figure 6 Surface plot of regression equation for flexural strength

点。因此,对X_1、X_3求偏导,得到式(4)、式(5),以求出式(3)中X_1、X_3的临界点。

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1}=-45.636+49.504X_1+31.813X_3 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_3}=-19.004+31.815X_1 \quad (5)$$

令式(4)和式(5)等于0,联立求解临界点。由式(5)解得X_1=0.60,代入式(4)求得X_3=0.51。

通过式(4)、式(5)得出临界点处粉煤灰掺量为60%、矿渣粉掺量为51%,结合图6可以更加直观地看出粉煤灰与矿渣粉之间的变化关系,粉煤灰掺量与矿渣粉掺量交互作用的临界点粉煤灰掺量为60%。由表10可知:锂矿渣与抗折强度之间的相关性系数随着龄期的增加而逐渐增大,且14 d前R值较小,相关性较低;后期相关性较高,均呈现正相关。这表明锂矿渣在养护前期基本不参与反应,抗折强度随掺量的变化不大,参与化学反应程度不高,可能仅起到物理填充作用[29]。根据Pearson相关性分析,粉煤灰的$|R|$值更大,相关性最高[33]。当固定粉煤灰掺量为60%时,通过式(5)得出X_3=51%,结合图6可知:① 当粉煤灰掺量小于60%时,随着矿渣粉掺量的增加,抗折强度降低,但降低幅度不大;② 当粉煤灰掺量大于60%时,随着矿渣粉掺量增加,抗折强度增加;③ 当粉煤灰掺量为40%时,无论矿渣粉掺量多少,此时的抗折强度均处于最高水平。由于粉煤灰与抗折强度的相关性呈负相关,粉煤灰掺量从40%增至60%时,抗折强度下降50%左右。因此,粉煤灰掺量应越小越好;而矿渣粉掺量与抗折强度呈正相关,矿渣粉掺量应越大越好。当粉煤灰掺量为40%时,随着矿渣粉掺量的增加,抗折强度降低幅度不超过15%。综合考虑粉煤灰及矿渣粉对抗折强度的影响程度,粉煤灰掺量应越小越好,矿渣粉的掺量应越大越好。

2.2 抗压强度

2.2.1 龄期对强度的影响

表14为粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉三元工业固废混料试样在不同龄期条件下的抗压强度值。

表14 三元工业固废混料胶砂抗压强度值

Table 14 Compressive strength values of ternary industrial solid waste mixture mortar

试验序号	不同龄期(d)的抗压强度/MPa					
	3	7	14	28	60	90
1	0.784	1.170	2.309	2.922	3.165	3.320
2	1.245	1.599	2.161	2.808	3.752	3.980
3	2.568	3.592	4.389	6.008	6.726	7.379
4	1.032	1.436	1.933	2.401	3.607	3.941
5	1.608	2.265	3.557	4.344	6.953	7.384
6	2.146	3.157	4.557	5.901	9.386	9.730
7	1.388	1.744	2.092	2.417	3.223	3.656
8	1.180	2.272	3.287	5.117	8.129	8.446
9	2.432	3.164	5.059	6.630	10.621	10.907

由表14可知:9组试验方案的抗压强度随龄期变化可分成3个阶段:在3~14 d养护龄期内,抗压强度增长速率最快;在14~60 d龄期内增长速率减缓,但强度一直在增加;在60~90 d龄期内,抗压强度增长速率进一步减缓。

2.2.2 相关性分析及回归分析

对表14中不同龄期的抗压强度数据进行整理分析,得到各个龄期下3种胶凝材料与抗压强度的Pearson相关系数,见表15。

表15 固废混料与抗压强度的相关系数

Table 15 Correlation coefficients between solid waste mixtures and compressive strength

龄期/d	三元固废与抗压强度的相关系数R		
	粉煤灰	锂矿渣	矿渣粉
3	−0.838	0.368	0.816
7	−0.893	0.424	0.839
14	−0.910	0.472	0.815
28	−0.918	0.488	0.809
60	−0.946	0.668	0.670
90	−0.954	0.667	0.681

由表15可以看出:在不同养生龄期下,粉煤灰掺量与抗压强度的相关系数为−0.8~−1.0,表明两者之间存在显著线性负相关;当养生龄期达到7 d后,

锂矿渣与抗压强度之间为中度线性正相关，这表明随着锂矿渣掺量增加，抗压强度得到提升；在养生龄期 28 d 之前，矿渣粉与抗压强度存在较强的线性相关，且粉煤灰与抗压强度的相关性最强。

对表 14 中 90 d 龄期的抗压强度进行二次多项式回归拟合，如式(6)所示：

$$y = B_1 + B_2X_1 + B_3X_3 + B_4X_1^2 + B_5X_3^2 + B_6X_1X_3 \tag{6}$$

式中：B_1、B_2、B_3、B_4、B_5、B_6为二次多项式系数；X_1为粉煤灰掺量(%)；X_3为矿渣粉掺量(%)；y为 90 d 抗压强度(MPa)。

回归拟合输出结果显示，回归方程的显著性为 0.001，极显著，说明方程与数据吻合较好，因此可以认定该回归方程是最佳拟合方程。建立的粉煤灰掺量 X_1、矿渣粉掺量 X_3和 90 d 抗压强度 y 回归预测方程如式(7)所示：

$$y = -8.389 + 157.916X_3 - 168.188X_3^2 - 94.529X_1X_3 \tag{7}$$

式中：X_3的最高次幂为二次，而粉煤灰与矿渣粉交互作用 X_{13}的最高次幂为一次，说明 90 d 抗压强度与矿渣粉掺量大致呈曲线关系。对回归方程的各掺量求偏导，得到各个掺量的线性方程组，将所得到的回归方程绘制成曲面图，如图 7 所示。

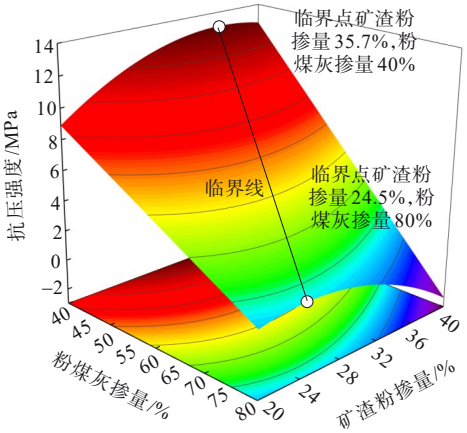


图 7　抗压强度回归方程曲面图

Figure 7　Surface plot of regression equation for compressive strength

联立方程组式(8)、式(9)，可得到各掺量具体值、临界值，由海森矩阵和各阶主子式可知，在掺量设置范围内该方程无极值点。

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = -94.529X_3 \tag{8}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_3} = 157.916 - 336.376X_3 - 94.529X_1 \tag{9}$$

结合式(8)、式(9)及回归方程曲面图 7 中的临界点可知：抗压强度随粉煤灰掺量的增加而减小，且下降的幅度随矿渣粉掺量的增加而增大，这与相关性分析结果一致，因此无论矿渣粉掺量为多少，均在粉煤灰掺量为 40% 时，抗压强度最大；当粉煤灰掺量取 40% 时，随矿渣粉掺量增加，抗压强度先增加后减小。由式(9)、图 7 可得，当粉煤灰掺量为 40% 时，矿渣粉掺量为 35.7%，偏导为 0，即此时抗压强度达到最大，且矿渣粉掺量为 35%～40% 时，抗压强度变化不大；结合表 15 中粉煤灰与抗压强度呈负相关、矿渣粉与抗压强度呈正相关的结果，在仅考虑抗压强度的前提下，粉煤灰掺量应越小越好，矿渣粉掺量建议不低于 35%。

2.3　优化配合比

综合试验数据与回归结果，可得到粉煤灰与矿渣粉掺量的合理取值范围：对于抗折强度，粉煤灰掺量应越小越好，取 40% 掺量为最优；对于抗压强度，粉煤灰掺量也是越小越好，取 40% 掺量为最优；综合分析矿渣粉掺量对抗折强度及抗压强度的影响，矿渣粉掺量从 20% 增至 40% 时，抗折强度下降 15% 左右，抗压强度提升 40% 左右。因此，矿渣粉的掺量应越大越好。

结合三元工业固废胶凝材料的强度性能以及社会经济效益，最终确定 3 种混料掺量的比例为：粉煤灰掺量 40%、锂矿渣掺量 20%、矿渣粉掺量 40%。对该组配合比进行强度试验验证，代入式(3)、式(7)，得出优化配合比下的抗折强度、抗压强度预测值。对该配合比进行强度试验，结果如表 16 所示。

表 16　试验预测结果

Table 16　Experimental prediction results

检测项目	预测值/MPa	试验值/MPa	差值/MPa
90 d 抗折强度	3.557	3.712	0.155
90 d 抗压强度	12.743	12.576	−0.167

由表 16 可知：验证试验值与预测值相差不大。同时，将检测结果与表 9 及表 14 中的最优值进行对比，可以明显发现，优化后配合比下的抗折强度与抗压强度均显著增强。

3　结论

本文采用有约束的配方均匀设计方法进行试验

设计，并安排试验方案，对三元工业固废混合料配合比进行了优化设计。分析了抗折强度、抗压强度与粉煤灰、锂矿渣、矿渣粉之间的相关性，建立了不同龄期的抗折强度、抗压强度与粉煤灰掺量、锂矿渣掺量、矿渣粉掺量之间的数学模型，通过分析模型得到最佳配合比，并进行相关验证试验。得出以下结论：

（1）采用基于约束的配方均匀设计方法优化了三元工业固废混料配合比，从而显著提高了混料的抗折和抗压强度。在优化配合比下，90 d养护期的强度性能明显优于其他掺量组合，验证了该方法的有效性。

（2）试验分析表明：锂矿渣和矿渣粉与混料的强度性能呈正相关，而粉煤灰与强度呈负相关。同时，建立了抗折强度和抗压强度与三元固废掺量之间的数学模型，揭示了三元固废掺量及交互作用对强度的影响机制，为工业固废的合理利用提供了理论依据。

（3）基于均匀设计试验方案，得到粉煤灰、高炉矿渣粉和锂矿渣3种工业废渣作为胶凝材料的掺量推荐质量配合比为：粉煤灰∶锂矿渣∶矿渣粉＝40%∶20%∶40%。对该掺量配合比进行强度试验验证，强度试验结果与预测结果相差不大，该配合比可用于后续试验配合比研究。

参考文献：

References：

[1] 张业轩，吴海清，王善亮. 填充式大粒径水泥稳定碎石基层材料级配及施工工艺的改进优化[J]. 工程技术研究，2021, 6(8): 143-145.
ZHANG Yexuan, WU Haiqing, WANG Shanliang. Improvement and optimization of material gradation and construction technology of filled large-particle cement stabilized macadam base[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(8): 143-145.

[2] 丁希昆，甘新众，刘群艳，等. 基于再生胶凝材料的超大粒径碎石基层级配设计方法研究[J]. 公路，2023, 68(9): 42-49.
DING Xikun, GAN Xinzhong, LIU Qunyan, et al. Research on the gradation design method of super large particle size gravel base based on recycled cementitious materials[J]. Highway, 2023, 68(9): 42-49.

[3] 谭波，杨涛. 基于振动旋转压实制样方式骨架密实型大粒径级配碎石性能研究[J]. 中外公路，2022, 42(5): 161-167.
TAN Bo, YANG Tao. Research properties of skeleton-density large graded macadam based on gyratory and vibration compaction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 161-167.

[4] ZHANG X R, TANG Z, KE G J, et al. Mechanical properties and durability of sustainable concrete containing various industrial solid wastes[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(12): 797-810.

[5] 于楠，宋杨，秘贝，等. 路基填料建筑固废混凝土的力学特性及颗粒破碎研究[J]. 中外公路，2025, 45(2): 73-82.
YU Nan, SONG Yang, BEI Bei, et al. Research on mechanical properties and particle crushing of construction solid waste concrete as subgrade filler[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(2): 73-82.

[6] 刘全，白志民，王东，等. 我国粉煤灰化学成分与理化性能及其应用分析[J]. 中国非金属矿工业导刊，2021(1): 1-9.
LIU Quan, BAI Zhimin, WANG Dong, et al. Chemical composition and physicochemical properties of fly ash and its application[J]. China Non-metallic Mining Industry, 2021(1): 1-9.

[7] XIN J D, LIU Y, ZHANG G X, et al. Evaluation of early-age thermal cracking resistance of high w/b, high volume fly ash (HVFA) concrete using temperature stress testing machine[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00825.

[8] KLEMCZAK B, GOŁASZEWSKI J, SMOLANA A, et al. Shrinkage behaviour of self-compacting concrete with a high volume of fly ash and slag experimental tests and analytical assessment[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132608.

[9] HE Z H, LI L Y, DU S G. Mechanical properties, drying shrinkage, and creep of concrete containing lithium slag[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 296-304.

[10] LIU D X, MA PF W U X. Research and application of high performance lithium slag concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2018, 1: 96-100.

[11] ZHAI M Y, ZHAO J H, WANG D M, et al. Hydration properties and kinetic characteristics of blended cement containing lithium slag powder[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102287.

[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 Zhiyou, SU Xiaoqiong, YANG Zhiwen, 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] QI A, LIU X H, WANG Z W, et al. Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117120.

[14] MAPA D G, ZHU H, NOSOUHIAN F, et al. Chloride binding and diffusion of slag blended concrete mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2023, 388: 131584.

[15] SONG T H, PARK J S, LEE S H, et al. Hydrate characteristics of cement paste with massive ground granulate blast furnace slag powder[J]. Journal of Korea Society of Waste Management, 2016, 33(2): 111-118.

[16] WANG S L, BAAJ H. Impact of supplementary cementitious materials on the hydration and strength properties of hydraulic road binders[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022, 23(5): 1181-1206.

[17] 孙双月. 利用矿渣和粉煤灰制备地聚物胶凝材料的正交试验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(11): 118-122, 127.
SUN Shuangyue. Orthogonal experiment research on geopolymer synthesis by utilizing slag and fly ash as raw material[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 118-122, 127.

[18] 包惠明, 汤铭锋, 迟恩涛, 等. 半柔性路面用地聚物砂浆配合比设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 744-751.
BAO Huiming, TANG Mingfeng, CHI Entao, et al. Mix proportion design of geopolymer mortar for semi flexible pavement[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2020, 41(6): 744-751.

[19] LU J H, YU Z X, ZHU Y Z, et al. Effect of lithium-slag in the performance of slag cement mortar based on least-squares support vector machine prediction[J]. Materials, 2019, 12(10): 1652.

[20] 宋维龙, 朱志铎, 浦少云, 等. 碱激发二元/三元复合工业废渣胶凝材料的力学性能与微观机制[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22070-22077.
SONG Weilong, ZHU Zhiduo, PU Shaoyun, et al. Mechanical performance and micro-mechanism of alkali-activated binary/ternary composite industrial waste residues cementitious materials[J]. Materials Reports, 2020, 34(22): 22070-22077.

[21] TALKERI A, RAVI SHANKAR A U. Alkali activated slag-fly ash concrete incorporating precious slag as fine aggregate for rigid pavements[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022, 9(1): 78-92.

[22] 孙冠东, 焦华喆, 陈新明, 等. 常见炉渣水泥复合胶凝材料性能研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4084-4089, 4096.
SUN Guandong, JIAO Huazhe, CHEN Xinming, et al. Review on properties of common permetallurigcal cement composite cementitious materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(12): 4084-4089, 4096.

[23] 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 Baoliang, YOU Nanqiao, CAO Ruilin, et al. Composition of lithium slag powder and its physical and chemical reaction characteristics in cement paste[J]. Materials Review, 2020, 34(10): 10046-10051.

[24] 王奕仁. 锂渣的火山灰活性评价及其复合胶凝材料微结构特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
WANG Yiren. Evaluation of pozzolanic activity of lithium slag and study on microstructure characteristics of composite cementitious materials[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2019.

[25] 王元, 方开泰. 关于均匀分布与试验设计(数论方法)[J]. 科学通报, 1981, 26(2): 65-70.
WANG Yuan, FANG Kaitai. On uniform distribution and experimental design (number theory method)[J]. Chinese Science Bulletin, 1981, 26(2): 65-70.

[26] LI M G, TAN H B, HE X Y, et al. Enhancement in compressive strength of foamed concrete by ultra-fine slag [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 138: 104954.

[27] 赵奇才, 许鸽龙, 李正昊, 等. 大掺量粉煤灰自密实混凝土的性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(6): 1-5.
ZHAO Qicai, XU Gelong, LI Zhenghao, et al. Investigation on the properties of high volume fly-ash self-compacting concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 42(6): 1-5.

[28] DONG P, AHMAD M R, CHEN B, et al. Preparation and study of magnesium ammonium phosphate cement from waste lithium slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316: 128371.

[29] QIN Y J, CHEN J J, LI Z X, et al. The mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete with lithium slag[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 8974625.

[30] 胡艳香, 任雪琪, 涂佳辉, 等. 锂渣和橡胶粉掺量对水泥砂浆力学性能影响研究[J]. 混凝土, 2022(6): 117-120, 124.
HU Yanxiang, REN Xueqi, TU Jiahui, et al. Effect of lithium slag and rubber powder on mechanical properties of cement mortar[J]. Concrete, 2022(6): 117-120, 124.

[31] WU R D, SHEN Y, LIU J H, et al. Effect of iron tailings and slag powders on workability and mechanical properties of concrete[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 723119.

[32] 李金京, 刘占良. 矿渣粉对水泥混凝土抗裂性及强度的影响研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(9): 86-88.
LI Jinjing, LIU Zhanliang. Research on impact of slag powder on crack-resistance and strength of cement concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2015, 32(9): 86-88.

[33] 张露康, 王海蓉, 古可言, 等. 基于Pearson相关性分析的交通枢纽站客运量预测模型分析研究[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(3): 137-139.
ZHANG Lukang, WANG Hairong, GU Keyan, et al. Research on passenger volume prediction model of transportation hub station based on Pearson correlation analysis[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2023, 46(3): 137-139.

[34] 翟梦怡, 赵计辉, 王栋民. 锂渣粉作为辅助胶凝材料在水泥基材料中的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 139-144.
ZHAI Mengyi, ZHAO Jihui, WANG Dongmin. Applying lithium slag powders to cement-based materials as supplementary cementitious component: an overview[J]. Materials Review, 2017, 31(5): 139-144.

[35] 潘庆林. 粒化高炉矿渣的水化机理探讨[J]. 水泥, 2004(9): 6-10.
PAN Qinglin. Study on mechanism of hydration of granulated blast furnace slag[J]. Cement, 2004(9): 6-10.