

盾构渣土-锂渣基可控低强度材料抗压强度及预测模型

闫长斌¹, 阿晓玉¹, 覃坚鹏², 肖翔², 石雨萱¹, 杨捷³, 卢高明⁴

(1.郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2.中国建设基础设施有限公司, 北京 100029; 3.黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 4.盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:【目的】针对隧道掘进盾构渣土和矿山生产锂渣等固废资源化利用率低的问题,从固废资源化利用角度出发,以盾构渣土作为单一细骨料、锂渣与粉煤灰作为复合胶凝材料,制备了一种可控低强度材料(CLSM)。【方法】开展了可控低强度材料工作性能及抗压强度影响因素研究,分析了盾构渣土掺量及粉煤灰占胶凝材料总质量比例($FA/(FA+L)$)对 CLSM 工作性能和抗压强度的影响规律,建立了基于 SSA-LSSVR 的 CLSM 抗压强度性能预测模型,该模型可为 CLSM 配合比优化设计提供基础支持。【结果】①当水固比为 0.24 时,盾构渣土掺量 80% 的 CLSM 抗压强度低于 2.10 MPa,当盾构渣土掺量降至 65%~75% 时,抗压强度为 2.42~4.31 MPa。②当水固比为 0.24 时, $FA/(FA+L)$ 比例从 0% 增加至 30% 时,抗压强度降幅为 5%~15%。③当水固比增大至 0.25 时,抗压强度降幅扩大至 9%~25%。LSSVR 模型预测结果评价指标 MRE 为 8.62%, RMSE 为 0.287, R^2 为 0.882, 基于 SSA-LSSVR 的 CLSM 抗压强度预测模型评价指标 MRE 为 3.96%, RMSE 为 0.207, R^2 为 0.935。【结论】SSA 在 LSSVR 的超参数的优化方面起到了显著的作用,提高了模型的拟合能力和泛化性能,耦合效果较好。在实际应用过程中,可利用构建的基于 SSA-LSSVR 的 CLSM 抗压强度预测模型进行配合比优化设计。

关键词:盾构渣土;锂渣;可控低强度材料;抗压强度;预测模型

中图分类号:TU528; U25

文献标识码:A

我国城市化进程和矿业生产催生了巨量的工程渣土与工业副产物,其高效资源化利用已成为可持续发展面临的核心挑战^[1]。其中,盾构渣土作为典型的工程固废,目前绝大多数仍采用简单填埋和露天堆放的处理方式,这不仅增加了处置成本,更可能引发环境污染、地质灾害及交通安全隐患等一系列问题^[2]。同时,锂渣作为锂盐生产的主要工业副产品,生产每吨锂盐会产出约 8~10 t 锂渣^[3],仅江西宜春地区年产量即高达 200 万 t^[4]。可控低强度材料(Controlled Low Strength Material, 简称 CLSM)^[5],是一类具备高流动特性的胶凝性回填材料,常被称为可流动填料或自密实回填材料。该类材料在自重作用下即具备良好的填充能力,无需或仅需少量振捣即可实现自密实成型。早期制备 CLSM 的原材料主要是水泥、粉煤灰和细骨料,随着固废种类日益繁多、产量逐步增大,学者们尝试利用不同类型的固废材料替代胶凝材料或细骨料

制备绿色 CLSM,水泥窑粉尘、高炉矿渣、钢渣等固体废弃物在 CLSM 的制备中均取得了良好的效果,满足了 CLSM 的应用场景,促进了固废的多样化处理,“以废治废”的特点也日益凸显。

盾构渣土的组成成分受地质条件影响显著,具有成分复杂、粒径分布范围广的特点,主要包含粉质黏土、黏土、砂土、泥岩和砾石等多种组分。当前盾构渣土资源化利用主要聚焦于路基填料与盾构壁后注浆两种方式。杨磊^[6]利用室内典型土工试验以及微观表征试验分析沿江地区盾构渣土作为公路路基材料填筑的可行性,发现盾构渣土中的有害元素较少,固化后的土体满足规范指标要求。王红军等^[7]通过均匀试验证实,可利用粉质黏土地层中的泥水平衡盾构渣土完全替代膨润土并部分替代砂,以配制同步注浆浆液,该方法具备可行性。Cui Ying 等^[8]用红粘土代替细骨料制备符合施工要求的同步注浆材料。

收稿日期/Received: 2025-11-18

修回日期/Revised: 2026-01-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41972270);河南省自然科学基金(262300421773);水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹)开放基金(2022-SYSJJ-06)。

第一作者:闫长斌(1979—),男,教授,博导,博士,从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: yanchangbin@zzu.edu.cn。

有关锂渣资源化利用的研究成果主要聚焦于其火山灰活性在建筑材料领域的应用,包括作为水泥掺合料和混凝土矿物掺合料等。万军等^[9]研究发现采用锂渣等量替代普通硅酸盐水泥时,20%取代率下的砂浆抗压与抗折强度均高于10%和30%取代率,为该试验条件下最优掺量。Li Shitong等^[10]发现锂渣可部分替代磷酸铵镁水泥和氯氧镁水泥,其掺入不仅影响砂浆的力学性能与微观结构,还能显著提升材料的耐水性能。Dong Peng等^[11]研究了锂渣部分替代磷酸铵镁水泥对砂浆性能的影响,发现锂渣的掺入不仅改善了材料的力学性能与微观结构,还在一定程度上提升了其耐水性能。胡明华等^[12]通过分析不同锂渣取代率下混凝土的立方体抗压强度与抗折强度,发现随着取代率增加,性能先增后降,在20%掺量时达到最佳。

目前用于制作 CLSM 的固废主要包含水泥窑粉尘、高炉矿渣、钢渣等。Wu Hao等^[13]用粉煤灰替代水泥,底灰部分替代细骨料,发现掺入较高含量的粉煤灰代替水泥时,CLSM 的强度降低,而当用底灰代替较多的河砂时,强度增加。LACHEMI M 等^[14]利用四种不同类型的水泥窑粉尘(Cement Kiln Dust, CKD)、水泥和砂子开发了16种 CLSM 混合物,其中 CKD 和水泥含量分别为总质量的4%至45%和2%至4%,结果发现 CKD 含量的增加从而增加了 CLSM 混合物的需水量,降低了泌水率,抗压强度随着 CKD 和水泥的增加而增加,CKD 的掺入亦可有效提高 CLSM 的抗冻融性。LEE N K 等^[15]和 LACHEMI M 等^[16]利用废弃钢渣制备无水泥 CLSM,增加了固体废弃物的利用率。LE D H 等^[17]发现其他钢渣比如不锈钢还原渣随着其对水泥的低水平替代的增加(从0增加到30%)而导致 CLSM 坍落度的增大。

尽管国内外学者在锂渣、盾构渣土等固废资源化利用及固废制备 CLSM 方面取得一定进展,但在将盾构渣土与锂渣协同用于 CLSM 的开发及其抗压性能系统研究方面,仍有待深入探索。当前研究存在以下不足:首先,锂渣在 CLSM 中的应用研究尚不充分,尤其缺乏其与盾构渣土的协同利用研究探索;其次,现有成果多集中于将固废部分替代水泥,而未见盾构渣土-锂渣基 CLSM 的研究成果;最后,现有成果多集中于工作性能和力学性能的影响因素简单分析,而缺乏对盾构渣土-锂渣基 CLSM 力学特性开展系统深入研究,尤其是盾构渣土-锂渣基 CLSM 的抗压强度预测研究。

基于此,提出以盾构渣土作为单一细骨料,锂渣(Lithiumslag, L)与粉煤灰(Fly Ash, FA)复配作为胶凝材料,从多种固废资源化联合利用角度出发,

制备了氧化钙激发下的盾构渣土-锂渣基 CLSM。通过材料和力学试验,深入分析水固比、盾构渣土掺量、粉煤灰与锂渣和粉煤灰总量的比值(简称 FA/(FA+L))对 CLSM 工作性能和抗压强度的影响规律,并据此提出 CLSM 配合比优化建议。在此基础上,将麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)与最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Regression, LSSVR)有机结合,构建 CLSM 抗压强度预测模型,以期为 CLSM 材料配合比优化设计提供科学依据与支撑。

1 CLSM 工作性能及其影响因素分析

1.1 试验材料

试验用的锂渣购自江西永兴特钢新能源科技有限公司,其表观呈黑灰色粉末状,微观形貌特征与粉煤灰接近。盾构渣土取自郑州市地铁七号线某盾构掘进段,土工试验结果表明其为砂性土。渣土在使用前经105℃烘干至恒重,并通过2.36mm方孔筛去除杂质,其颗粒级配主要分布在0.15~0.6mm区间内,见表1所示。

表1 盾构渣土颗粒级配

Tab. 1 Particle size distribution of shield tunnelling soil							
筛子孔径/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	底盘
筛余率/%	0	2.3	29.46	24.5	32.84	7.4	3.4
累计筛余率/%	0	2.3	31.76	56.26	89.1	96.5	99.9

图1为试验用的锂渣与盾构渣土样品。试验用的I级粉煤灰符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596-2017)^[18]技术要求,其具体指标见表2。外加剂为聚羧酸系高效减水剂,化学激发剂为天津市致远化学试剂有限公司提供的氧化钙(CaO),纯度不低于98%。采用X射线衍射分析仪对锂渣及水泥进行化学成分分析,结果见表3。

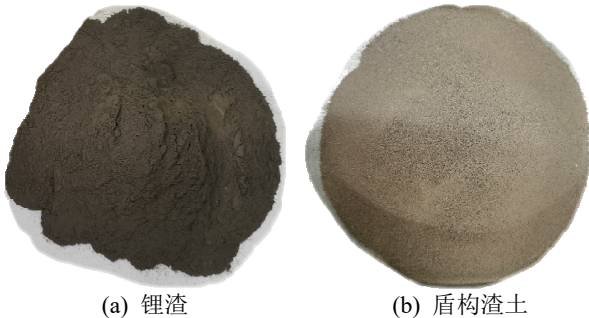


图1 锂渣和盾构渣土试验样品

Fig. 1 Samples of lithium slag and shield tunnelling spoil

表 2 粉煤灰性能指标

Tab. 2 Performance indicators of fly ash

指标	细度/%	需水量比	烧失量/%	含水量
标准	≤12.0	≤95	≤5.0	≤1.0
测试值	10.8	86	3.9	0.21

表 3 锂渣和水泥的主要化学组成

Tab. 3 Major chemical composition of lithium slag and cement

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
锂渣	42.26	23.87	7.19	5.93	0.37	1.67
水泥	21.48	6.46	2.11	59.03	1.98	4.07

1.2 CLSM 试块制备

依据试验配合比准确称取锂渣、盾构渣土、粉煤灰及氧化钙等原料，投入 JJ-5 型水泥胶砂搅拌机，先以低速搅拌 60 s，再转高速搅拌 30 s，使干料混合均匀。随后将已混匀的减水剂水溶液缓慢加入搅拌机，继续以低速搅拌 180 s 后切换至高速搅拌 60 s，直至形成流动性良好的均匀浆体。

抗压强度测试选用边长为 70.7 mm 的立方体试模。将拌合后的 CLSM 浆体注入试模内，无需振捣，采用刮刀抹平表面后覆盖保鲜膜进行密封保湿。试件经 48 小时静置养护后脱模，移入标准养护箱中持续养护至规定龄期。

1.3 试验配合比范围确定

在实际工程中，要确保 CLSM 混合料能够顺利流到相应位置，特别是一些狭窄的地方，以充分填

充形成致密结构，因此流动度至关重要。对于凝固时间有特定要求的工程来说，材料的释水性也起着关键作用，过高的泌水率会使水分快速蒸发，产生干燥收缩效应进而影响施工质量。基于此，选取水固比、盾构渣土掺量、FA/(FA+L)(粉煤灰占粉煤灰和锂渣总和的比值)作为配合比设计的参数，根据最终试验结果，总结满足工作性能的配合比。

1.3.1 激发剂和减水剂掺量的确定

由王奕仁^[19]对于不同 CaO/锂渣值的锂渣-Ca(OH)₂-H₂O 系统中锂渣的火山灰反应活性的研究可知，当 CaO/锂渣取值为 0.25 时，锂渣具有较高的化学反应量，过量的 CaO 掺入会使钙离子迅速与锂渣表面的活性分子结合生成水化产物包裹在锂渣表面从而阻止进一步反应。所以，本文固定 CaO 掺量为胶凝材料的 20%。本文选择最常见的聚羧酸高效减水剂，参考减水剂在混凝土中的用量，即一般为固体胶凝材料的 0.1%~0.3%，所以固定聚羧酸高效减水剂掺量为胶凝材料的 0.1%。

1.3.2 盾构渣土掺量及水固比范围的确定

考虑到 CLSM 材料本身强度要求较低，同时借鉴其他固废在 CLSM 中的应用，发现 CLSM 制备中细骨料占比甚至达到 70%左右，因此盾构渣土掺量设计为：80%、75%、70%、65%。对于水固比，根据以往研究初步选取为 0.2、0.25、0.3，通过检测 12 组试样的工作性能，依据试验结果进行调整，即用试错法来探究水固比合理的大致范围。

表 4 预试验结果

Tab. 4 Preliminary test results

材料组号	减水剂/%	生石灰掺量/%	锂渣掺量/%	盾构渣土掺量/%	水固比	泌水率/%	流动性/mm
1	0.1	20	20	80	0.20	3.9	149
2					0.25	6.7	247
3					0.30	离析	离析
4			25	75	0.20	3.3	121
5					0.25	5.6	221
6					0.30	13.6	298
7			30	70	0.20	2.9	103
8					0.25	4.9	189
9					0.30	9.6	276
10			35	65	0.20	2.4	89
11					0.25	4.7	173
12					0.30	8.9	237

试验结果见表 4 所示，由表 4 可见，用水量对 CLSM 的流动度与泌水率影响显著，水固比每增减 0.05，流动度变化幅度较大。根据详细数据，水固

比为 0.2 时，不同锂渣掺量下 CLSM 的流动性能较差，均小于 150 mm；而水固比为 0.3 时，一部分组分出现了离析现象，剩下的组分虽然流动度性能较

好，但泌水率仍较大。因此，在水固比设计中，减小水固比的变化梯度，以 0.25 为基准，适度上下调整，分别设置为 0.23、0.24、0.25、0.26。

1.3.3 FA/(FA+L)范围的确定

参考将粉煤灰作为 CLSM 原材料的已有相关研究成果^[13, 20]，这里将 FA/(FA+L)的范围设计确定为：10%、20%和 30%。

1.4 水固比对 CLSM 工作性能的影响

根据前期配合比初步探究，详细配合比设计见表 5。按照表 5 中的配合比设计对工作性能进行测试，试验结果见表 6 所示。这里，将盾构渣土掺量

等于 80%、75% ($T=80\%$ 、 75%)定义为以大比例掺量，70%、65% ($T=70\%$ 、 65%)定义为小比例掺量。

表 5 基于 CLSM 工作性能影响分析的配合比设计

Tab. 5 Mixing proportion design based on impact analysis of CLSM performance

编号	锂渣掺量/%	盾构渣土掺量/%	水固比
A	20	80	
B	25	75	0.23/0.24/
C	30	70	0.25/0.26
D	35	65	

表 6 CLSM 工作性能试验结果

Tab. 6 Test results of CLSM working performance

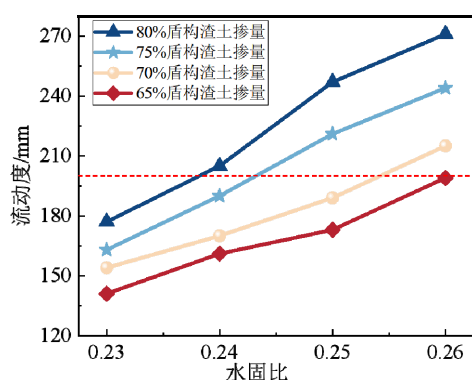
材料组号	锂渣掺量/%	盾构渣土掺量/%	水固比	泌水率/%	流动性/mm
A-1	20	80	0.23	4.7	177
A-2			0.24	5.6	205
A-3			0.25	6.7	247
A-4			0.26	7.2	271
B-1	25	75	0.23	3.9	163
B-2			0.24	5.0	190
B-3			0.25	5.6	221
B-4			0.26	6.9	244
C-1	30	70	0.23	3.6	154
C-2			0.24	4.7	170
C-3			0.25	4.9	189
C-4			0.26	6.0	215
D-1	35	65	0.23	3.1	141
D-2			0.24	4.3	161
D-3			0.25	4.7	173
D-4			0.26	5.6	199

不同盾构渣土掺量下水固比与工作性能的关系见图 2。从图 2(a)中分析可得：随着水固比的增大，流动度均呈现增长的趋势。当水固比从 0.23 增长到 0.26 时，四种盾构渣土掺量下的增长率分别是：45.7%、43.4%、39.6%、42.6%。其主要原因在于：一方面，水分在 CLSM 浆体内起到润滑作用，当水固比增大时，有更多的自由水，减少了颗粒间的摩擦力，使流动度增大。另一方面，水分会降低颗粒间的粘聚力，CLSM 浆体内的颗粒在水分的作用下粘聚力会变弱，使其在外力作用下更容易移动，从而提高了 CLSM 的流动度。

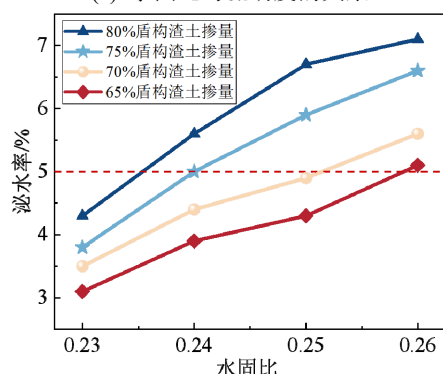
泌水率也是反映 CLSM 工作性能的重要指标之一，合理的泌水率不仅可以确保 CLSM 拥有合适的流动度，还有助于 CLSM 中水泥颗粒的均匀

分散和充分水化，对强度发展和抗渗性能至关重要，从而提高整体的耐久性和抗压强度。CLSM 一般要求 2 小时泌水率低于 5%。按照表 5 中的各组分配合比拌制得到 CLSM 并测试其泌水率，结果如图 2(b)所示。从图中的曲线走势来看，水固比对 CLSM 泌水率的影响十分明显。无论哪种盾构渣土掺量，泌水率均随水固比的增大而增大。水固比增大，意味着在固体质量不变的情况下，拌合物中有更多的自由水，过多的水分会使 CLSM 浆体释放水分的速率增加。因此，当水固比增大时，泌水率增大。当水固比从 0.23 增加到 0.26，四种盾构渣土掺量下 CLSM 的泌水率均从最初满足规范到超过 5%的限值，分别提高了 53.2%、76.9%、66.7%和 80.6%。此外，分析泌水率数据发现，有一部分

配合比下的泌水率超过 5%，甚至达 7.2%。



(a) 水固比与流动度的关系



(b) 水固比与泌水率的关系

图 2 水固比与 CLSM 工作性能的关系

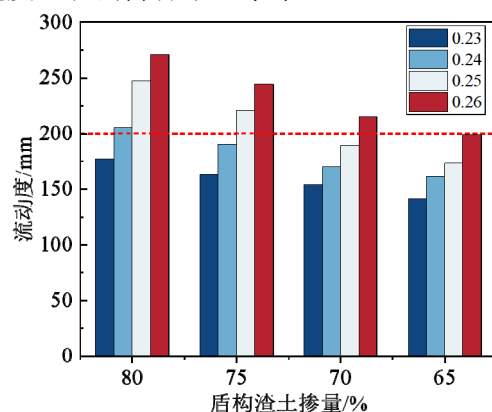
Fig. 2 Relationships between solid-liquid ratio and working performance of CLSM

1.5 盾构渣土掺量对 CLSM 工作性能的影响

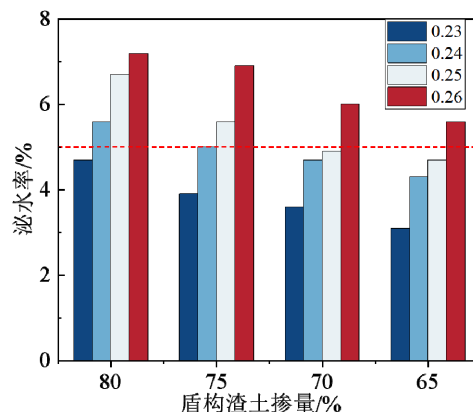
不同水固比下盾构渣土掺量与工作性能的关系见图 3。由图 3(a)可见，盾构渣土掺量与 CLSM 的流动度之间呈正相关。在同种水固比下，盾构渣土掺量的减少使流动度显著降低，比如 0.26 水固比时，80% 锂渣掺量的 CLSM 流动度竟达到 271mm，而 65% 锂渣掺量下仅刚满 200 mm。不同水固比系列下，小比例盾构渣土掺量下的流动度基本在 200 mm 以下，相反大比例盾构渣土掺量下的流动度普遍维持在 200 mm 以上。主要原因是锂渣比表面积较盾构渣土大得多，从而比渣土吸收更多的水分，且锂渣具有火山灰效应，会与水分发生一定反应，较小的盾构渣土掺量意味着混合料中有更多的锂渣，将会消耗更多的自由水，盾构渣土含量少的混合料会有更小的流动度。

由图 3(b)可见，CLSM 的泌水率随着盾构渣土掺量的增加而呈增加趋势。具体而言：①水固比为 0.23 时，当盾构渣土掺量由 65% 增加到 80% 时，CLSM 的泌水率分别增加了 7.1%、15% 和 4.3%，然而此时泌水率均小于 5%；②水固比为 0.24 和 0.25 时，当盾构渣土掺量 $\geq 75\%$ 时，泌水率基本满

足条件；③当水固比为 0.26 时，锂渣掺量为 65% 时 CLSM 的泌水率刚刚超过最大限度，为 5.1%，而锂渣掺量为 80% 时 CLSM 的泌水率竟达到 7.1%。可见，由盾构渣土掺量 65% 增加到 80% 时，CLSM 泌水率分别增加了 7.1%、15% 和 4.3%。主要原因是盾构渣土掺量的减少，意味着 CLSM 混合料中有更多锂渣，而锂渣粉末具有更强的吸水性。较多的锂渣粉末在 CLSM 浆体中吸收更多水分，减少了水分在 CLSM 拌合物表面的自由释放，从而降低了泌水率。此外，盾构渣土掺量减少，意味着拌合物中有更多锂渣，锂渣含量增加会增加 CLSM 中锂渣浆液的总量和浓度，使得锂渣浆液更加粘稠，粘稠的浆液有助于水分在拌合物内部的均匀分布和充分利用，减少了水分在拌合物表面的挥发速度，从而降低了泌水率。



(a) 盾构渣土与流动度的关系



(b) 盾构渣土与泌水率的关系

图 3 盾构渣土掺量与 CLSM 工作性能的关系

Fig. 3 Relationships between shield slag mixing ratio and working performance of CLSM

1.6 FA/(FA+L)对 CLSM 工作性能的影响

由上述分析可知，水固比为 0.23 时，CLSM 的流动度过小，而粉煤灰对 CLSM 的流动度具有一定的调节作用，然而由于其并非高效减水剂，即使通过添加粉煤灰进行改善，流动度的提升幅度也较为有限。水固比为 0.26 时，虽然流动度基本满足要求，但 CLSM 的泌水率远超 5%。因此，盾构

渣土掺量为 80%、75%、70%、65% 时，水固比为 0.24 和 0.25，最终配合比见表 7。

表 7 考虑粉煤灰掺量的 CLSM 配合比设计
Tab. 7 Mix proportions design of CLSM considering fly

材料组号	ash content		FA/ (FA+L)	水固比
	锂渣掺量 /%	盾构渣土 掺量/%		
E	20	80		
F	25	75	0/10%/20%	0.24/0.2
G	30	70	/30%	5
H	35	65		

2 CLSM 抗压强度及其影响因素分析

2.1 CLSM 抗压强度试验

抗压强度是衡量 CLSM 力学特性的关键性能指标之一。当 28 d 龄期的抗压强度处于 0.30~0.70 MPa 范围内时，被认为与高品质的土壤夯实效果相当；而以 28 d 抗压强度 2.10 MPa 为界，CLSM 又可划分为可开挖与不可开挖两种类型^[21]。

根据 CLSM 试件在不同养护龄期的抗压强度测试结果可知，所有配比下的 CLSM 均表现出良好的抗压性能，其 7 d 抗压强度为 1.25~3.22 MPa，28 d 强度提高至 1.70~4.31 MPa。由此可见，制备的 CLSM，其抗压强度能够分别满足工程中对可开挖与不可开挖材料的强度需求。

2.2 盾构渣土掺量对 CLSM 抗压强度的影响

对比不同龄期下 CLSM 的抗压强度发现，当养护龄期从 7 d 增加到 28 d 时，所有组分的强度增长率平均值为 33%，这表明盾构渣土-锂渣基 CLSM 的前期强度增长显著。具体分析 FA/(FA+L)=0 系列的组分，CLSM 的 7 d 抗压强度在 1.46~3.22 MPa 范围内，CLSM 的 28 d 抗压强度在 1.70~4.31 MPa 范围内，这表明即使没有水泥掺入，CLSM 拌合物在碱激发锂渣后，会发生一系列化学反应生成胶凝材料，可有效胶结颗粒，从而形成具有一定强度的材料。在保证 FA/(FA+L) 不变时，可分析不同盾构渣土掺量对 CLSM 抗压强度的影响。当盾构渣土掺量为 80% 时，所有配合比下 CLSM 的 28 d 抗压强度基本小于 2.10 MPa，均处于可开挖强度范畴，而当盾构渣土掺量为 65%~75% 时，CLSM 抗压强度总体上在 2.42~4.31 MPa 范围内波动，均属不可开挖范畴。

此外，CLSM 的 7 d 和 28 d 抗压强度均随着盾构渣土掺量的增加而减小。比如 FA/(FA+L)=10% 系列的组分，盾构渣土掺量为 80% 时，两种水固比下的 28 d 抗压强度分别为 1.89 MPa 和 1.84 MPa，

属于可开挖范畴，但增长到 65% 时其抗压强度甚至达到 4.19 MPa 和 4.06 MPa，增长幅度超过 100%。盾构渣土掺量越少，则锂渣掺量越多，就有更多的活性硅铝氧化物在碱性环境中发生化学反应，生成水化硅酸胶凝材料，从而提高 CLSM 的抗压强度。不同用途对 CLSM 拌合物的抗压强度要求亦不相同，可根据工程应用情况对材料的不同需求调整实际配比中锂渣的掺量。

值得注意的是，根据对比结果，发现水固比与盾构渣土掺量之间存在弱正向交互效应。当水固比从 0.24 提高至 0.25 时，CLSM 的抗压强度降低幅度随渣土掺量的增加而增大。以 FA/(FA+L)=0% 为例，水固比增加导致的抗压强度损失在渣土掺量 65% 时为 0.08 MPa（相对降幅 1.9%），而在 75% 和 80% 时分别增大至 0.21 MPa（相对降幅 7.6%）和 0.16 MPa（相对降幅 7.7%）。尤其是在渣土掺量 $\geq 75\%$ 时，水固比的不利影响会显著增强。由此可见，当渣土掺量较高时，控制较低水固比（例如 0.24）对保证抗压强度至关重要。

2.3 FA/(FA+L) 对 CLSM 抗压强度的影响

不同 FA/(FA+L) 下 CLSM 的 7 d 和 28 d 抗压强度测试结果如图 4 所示。

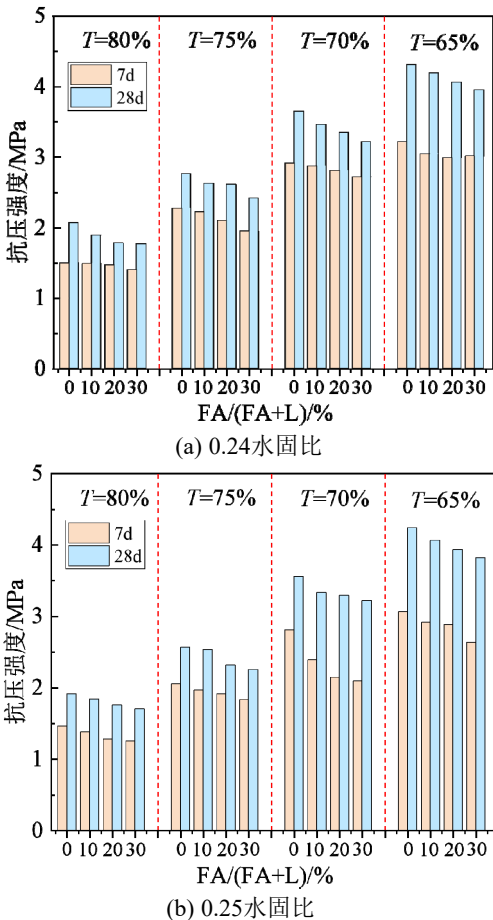


图 4 FA/(FA+L) 与 CLSM 抗压强度关系图
Fig. 4 Relationship between FA/(FA+L) and compressive strength of CLSM

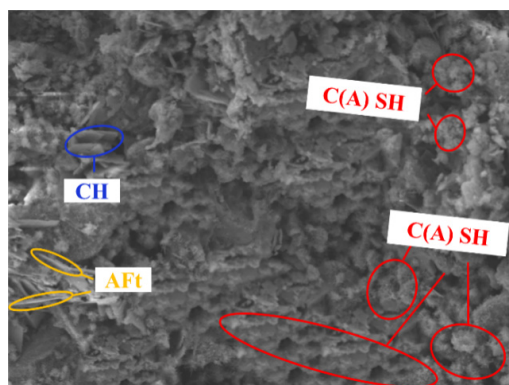
由图 4 可见,无论是 7 d 还是 28 d 抗压强度,与 $FA/(FA+L)=0$ 相比,粉煤灰部分替代锂渣后的 CLSM 抗压强度均有所下降且基本随 $FA/(FA+L)$ 增大而减小。分析具体数据可知,当水固比为 0.24 时, $FA/(FA+L)$ 由 0% 增加到 30% 时,四种盾构渣土掺量下 CLSM 的 28 天抗压强度分别由 2.07MPa、2.77 MPa、3.65 MPa 和 4.31 MPa 降至 1.77 MPa、2.42 MPa、3.22 MPa 和 3.95 MPa,下降幅度介于 8%~14%;同理,当水固比为 0.25 时,四种盾构渣土掺量下,随着 $FA/(FA+L)$ 增加,CLSM 的 28 d 抗压强度下降幅度介于 9%~12%。说明粉煤灰代替一定锂渣对 CLSM 的抗压强度具有显著的削弱作用,相同质量下锂渣生成的水化产物胶凝材料较粉煤灰多。主要原因是锂渣表面结构疏松多孔,液体容易渗透到其内部,从而更容易发挥活性。而相比之下,粉煤灰的表面结构较为致密,颗粒内部的可溶性 SiO_2 和 Al_2O_3 比较难以释放。因此,若为调节流动性而以粉煤灰等质量替代锂渣,需注意控制粉煤灰掺量。

3 CLSM 微观机理及耐久性分析

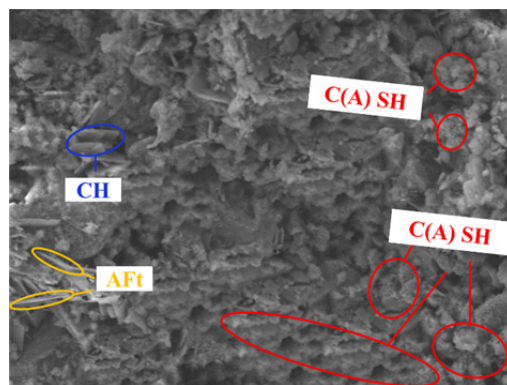
3.1 水化机理、微观结构与强度成因分析

CLSM 的力学性能本质上源于锂渣中无定形 SiO_2 和 Al_2O_3 在碱性环境下的火山灰反应:活性组分溶出生成 SiO_3^{2-} 和 AlO_2^- ,进而与 Ca^{2+} 结合形成 CSH、CAH 等胶凝产物,构建稳定的三维网络结构。强度变化的成因机制为:盾构渣土为惰性骨料,其高掺量稀释了活性硅铝的含量,导致水化产物生成量不足,难以充分包裹颗粒并填充孔隙;反之,降低渣土掺量可提升活性组分浓度,促进 CSH 等沉淀生成,优化网络结构,增强粘结力。

电镜扫描试验结果直观地验证了上述机理,见图 5 所示。



(a) 70%盾构渣土



(b) $FA/(FA+L) = 10\%$

图 5 典型微观样貌示意图

Fig. 5 Typical microstructure schematic diagram

渣土掺量为 70% 时, $C(A)SH$ 已紧密附着骨料,孔隙较少;而 $FA=0\%$ 时,纤维状 $C(A)SH$ 交织成密实网状结构。相比之下,高渣土掺量或高 FA 配比下骨料外露、孔隙增多,结构松散。微观形貌差异直接对应宏观强度演化规律,从“组成-反应-结构-性能”链条完整揭示了 CLSM 强度调控的内在机制。

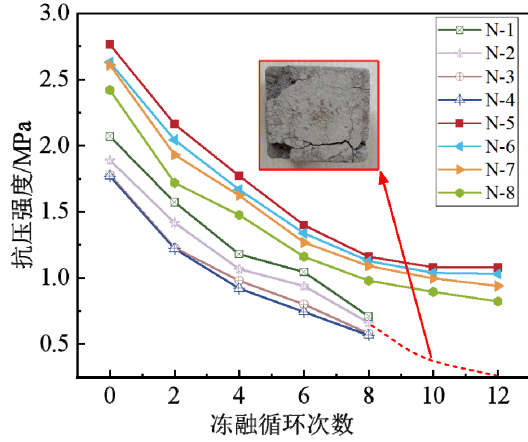
3.2 干湿与冻融循环下耐久性分析

CLSM 在实际工程应用中常暴露于干湿交替或冻融环境,其长期稳定性至关重要。为此,针对不同配合比的 CLSM 开展了干湿与冻融循环下耐久性试验。其中,根据前述分析可知,水固比为 0.24 时 CLSM 的工作性能和力学性能相对较优,因此这里选取水固比为 0.24。盾构渣土掺量分别为 80%、75%、70%、65%, $FA/(FA+L)$ 分别为 0%、10%、20%、30%,共计 16 组。

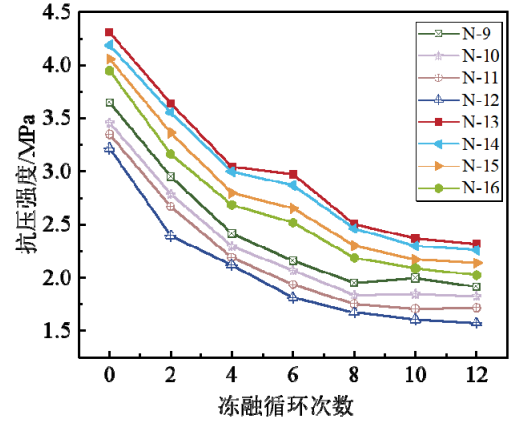
图 6 和图 7 分别给出了冻融循环和干湿循环下 CLSM 抗压强度试验结果。分析可知,CLSM 抗压强度均随循环次数增加呈非线性变化。图中编号为 N-1~N-4、N-5~N-8、N-9~N-12 及 N-13~N-16 的 CLSM 样品,其 $FA/(FA+L)$ 比例依次为 0%、10%、20% 和 30%。①冻融循环初期,孔隙水结冰膨胀对结构造成显著损伤,强度急剧下降。例如,盾构渣土掺量为 80% 时,首次冻融循环后,抗压强度就出现大幅降低,经历八次循环后几乎完全丧失承载能力。而渣土掺量降至 65% 时,抗压强度衰减明显减缓,表现出更好抗冻性。②干湿循环试验中,干湿循环初期因未反应活性物质继续水化,强度略有提升;但是随着干湿循环次数增加,水分反复迁移引发微裂缝扩展,强度持续减小。例如,80% 盾构渣土掺量组在第 14 次循环后严重损坏,而 65% 盾构渣土掺量组的抗压强度损失不超过 25%。

由此可见, CLSM 的耐久性与其初始力学性能呈正相关性。通过适当降低盾构渣土掺量和 FA 的比例, 可有效提升其在复杂环境下的长期稳定

性, 从而为高寒、多雨等严苛气候区的 CLSM 工程应用提供科学参考。



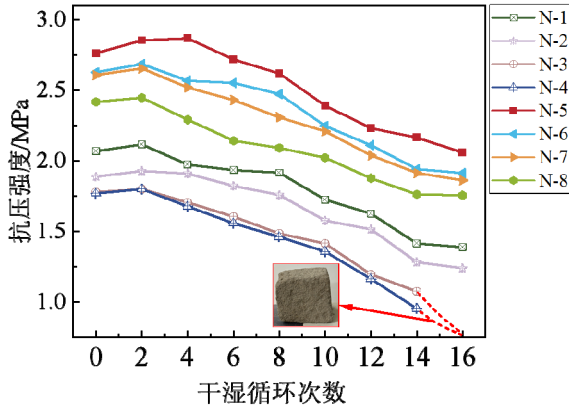
(a) 80%和75%盾构渣土掺量



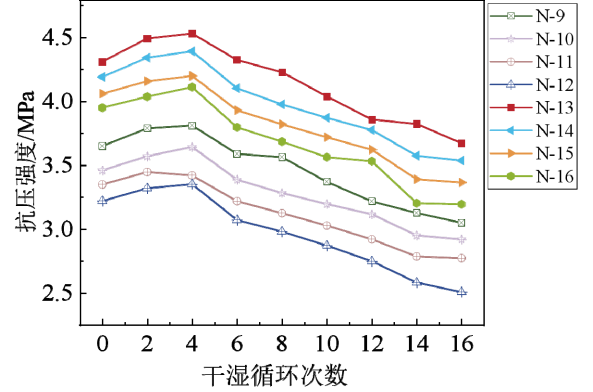
(b) 70%和65%盾构渣土掺量

图 6 冻融循环下 CLSM 的抗压强度变化规律

Fig. 6 The Variation law of compressive strength of CLSM under freeze-thaw cycles



(a) 80%、75%盾构渣土掺量



(b) 70%、65%盾构渣土掺量

图 7 干湿循环下 CLSM 的抗压强度变化规律

Fig. 7 The Variation law of compressive strength of CLSM under dry-wet Cycle

4 基于 SSA-LSSVR 的抗压强度预测

针对配合比设计中传统试错法效率低、难以处理多因素非线性关系的问题, 利用最小二乘支持向量回归(LSSVR)进行小样本强度预测并引入麻雀搜索算法(SSA)优化其超参数(C 与 g), 以克服传统寻优易局部收敛的缺陷。SSA-LSSVR 耦合算法具有在全局搜索和小样本建模方面的优势, 可为 CLSM 强度预测提供高效可靠的新途径。

4.1 预测模型的基本原理

支持向量回归(SVR, Support Vector Regression)模型在处理小样本数据、非线性问题以及高维模式识别任务时展现出独特的优势。很多学者^[22-23]提出了加快算法速度、降低参数调节不确定性的改进后的 SVR, LSSVR 是其中的一种。其核心思想是找到一个最优超平面(在二维空间中是一条直线, 在更高维度的空间中是一个平面或者超平面), 使得

所有数据到这个超平面的距离最小, 即保证尽可能多的样本数据位于间隔内, 并让数据尽可能靠近间隔范围。麻雀搜索算法(SSA)是由薛建凯^[24]于 2020 年提出的一种新型群体智能优化算法, 其灵感来源于麻雀在自然界中的觅食行为以及躲避天敌的策略。该算法的独特之处在于, 它无需依赖目标函数的可微性、可导性或连续性, 从而在适用范围上具有更大的灵活性且在多个维度上均优于现有的其他优化算法, 展现了出色的稳定性以及高效的搜索速度^[25]。

留一法交叉验证^[26](Leave One Out Cross Validation, LOOCV)是交叉验证的一种特殊情况, 取样本中一个作为测试集, 其余的全部为训练集, 直至每个样本都被作为一次测试集, 适用于小样本数据, 尽可能保留更多的训练数据。因其在小样本数据中的独特优势, 被广泛运用在各种领域, 并被大量研究和实践证明是一种有效的模型评估方法。

4.2 预测模型的构建

选取影响 CLSM 工作性能和力学性能的三个特征参数作为输入变量,包括盾构渣土掺量、水固比、FA/(FA+L),选取流动度和 28 d 抗压强度作为输出变量,分别训练两组数据以建立 CLSM 流动度预测模型和 28 d 抗压强度预测模型。

LSSVR 模型性能受到多个参数的影响,主要参数包括惩罚参数 C 和核函数参数 g ,需要一种高效的策略来确定这两个关键参数的最佳组合。SSA 算法通过动态调整麻雀个体的身份和位置来避免陷入局部最优解,用于寻找最佳的惩罚因子 C 和核函数参数 g 以获得理想的参数组合十分适合。因此,采用麻雀搜索算法优化最小二乘支持向量回归机,用于构建小样本数据的 CLSM 抗压强度预测模型。基于 SSA-LSSVR 的 CLSM 抗压强度预测模型构建流程,主要包括如下步骤:

1) 确定输入和输出变量,并对数据进行统一的归一化处理并划分数据为训练集和测试集。

2) 选择留一交叉法的均方误差作为适应度函数。

3) 初始化麻雀搜索算法的各个参数,包括惩罚参数 C 和核函数参数 g 的搜索范围、麻雀种群规模 N 、算法最大迭代次数、发现者比例 PD、加入者比例(1-PD)、警戒者比例 SD、安全值 ST 等。

4) 计算初始适应度值并排序,找出当前较佳和较劣适应度值及其所对应的位置,选择部分适应度值较佳的麻雀为发现者,剩余为加入者,并从中随机选择一定量警戒者,警戒者可以是发现者也可以是加入者。

5) 不断地更新发现者、加入者和警戒者的位置,即不断进行觅食与反捕食行为,发现者在觅食过程中不断更新位置,加入者搜索发现者的最优位置,从而夺取食物并更新位置,处于危险位置的麻雀迅速靠近其他安全区域的麻雀。

6) 计算每只麻雀更新位置后的适应度值,判断此时适应度值最优值是否优于上次迭代的最优值,实时更新最优适应度值及最优位置。

7) 判断是否满足迭代终止条件,若不满足返回至步骤(5),否则停止并输出最优参数 C 和 g ,从而建立 SSA-LSSVR 预测模型。

4.3 CLSM 抗压强度预测评价指标构建

预测误差是指测试集的预测值与真实值之间的差值大小,当预测误差小时,说明预测模型的精度高,拟合效果好。为了对预测模型的优劣性进行科学评价,通常引入预测误差的某种形式作为模型评价标准,常用的评价指标主要有三种,即:平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)、均方根误差

(Root Mean Square Error, RMSE)以及决定系数(Coefficient of determination, R^2)。

基于 MATLAB 构建 CLSM 抗压强度的样本集,执行 SSA-LSSVR 算法,使用传统的网格搜索法对 LSSVR 模型的参数寻优,可得到 CLSM 抗压强度预测模型适应度值随迭代次数的关系曲线。结果表明,适应度值曲线呈快速收敛趋势,当迭代次数为 8 时,适应度已经接近最佳值,之后随着迭代次数增加逐渐趋于平稳,说明 SSA-LSSVR 收敛速度较快。输出的优化参数 C 和 g 分别是 (10.076,1.318)。

为进一步验证 SSA 对 LSSVR 模型参数寻优的有效性及其预测精度提升作用,同样建立未优化的 LSSVR 基准模型对 CLSM 抗压强度进行预测,通过对比两种模型在测试集上的表现以揭示 SSA 与 LSSVR 耦合的好处,值得注意的是:采用留一法交叉验证时,每次循环中,真实值是被留出的 1 个数据点的真实值,预测值是用剩余的 31 个数据点训练得到的模型对该留出数据点的预测值。对于每一组参数组合,交叉验证会进行 32 次循环,最终得到 32 个预测值,评价指标即为 32 个预测值与真实值差距的平均值。图 8 展示了两模型在测试集上的预测结果,表 8 对两种模型在测试数据集上得到的评价指标进行了统计。

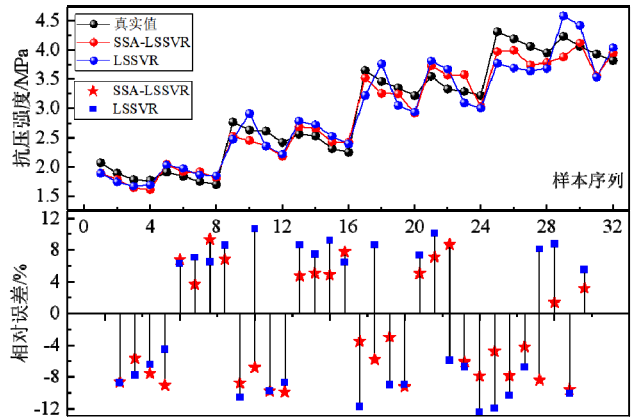


图 8 测试集的 CLSM 抗压强度预测结果

Fig. 8 Prediction results of CLSM compressive strength test set

表 9 CLSM 抗压强度预测模型评价指标对比

Tab. 9 Comparison of evaluation indicators for compressive strength models of CLSM

评价指标	MRE	RMSE	R^2
LSSVR	8.62%	0.287	0.882
SSA-LSSVR	3.96%	0.207	0.935

4.4 预测模型有效性与参数敏感性分析

基于留一法交叉验证评价结果表明,基于 SSA-LSSVR 的 CLSM 抗压强度预测模型表现优

异。由图 15 和表 9 可见，相比其他预测模型，该模型的预测值与实测值更为接近，其平均相对误差 (MRE) 和均方根误差 (RMSE) 分别为 3.96% 和 0.207，显著优于未优化 LSSVR 模型的 8.62% 和 0.287。此外，SSA-LSSVR 模型的决定系数 R^2 达到 0.935，明显高于 LSSVR 模型的 0.882。上述研究表明，麻雀搜索算法 (SSA) 在优化 LSSVR 超参数方面发挥了关键作用，有效提升了预测模型的拟合精度与泛化能力，二者耦合效果良好。因此，基于 SSA-LSSVR 构建的 CLSM 抗压强度预测模型具有较高的准确性与可靠性，可为实际工程应用中 CLSM 配合比设计提供有效支持。

为提升模型的工程实用性，进一步解析各输入变量对抗压强度的相对影响程度。基于 SSA-LSSVR 预测模型开展了 Sobol 全局敏感性分析。结果表明：盾构渣土掺量对强度的总效应显著高于其他变量，FA/(FA+L) 比例与水固比的影响相对较小且相近。参数敏感性分析结果排序如下：盾构渣土掺量 > FA/(FA+L) $\approx$ 水固比。该结果与试验规律吻合，说明模型不仅具备良好预测精度，还能准确反映材料内在作用机制，可为 CLSM 配合比快速优化提供可靠依据。

4.5 工程适用性与对比分析

为凸显“全固废”基 CLSM 的应用价值，将其与传统 CLSM 进行对比，并结合实际工程需求开展适用性分析。传统水泥基 CLSM（水泥 113 kg/m³、粉煤灰 320 kg/m³）的 28 d 抗压强度为 1.9 MPa^[27]，而文中制备的无水泥 CLSM 在盾构渣土掺量为 65%~75% 时，28 d 抗压强度达 2.42~4.31 MPa，抗压强度提升 27%~127%，且每制备 1 m³ CLSM 节约水泥 113 kg。同时，其性能覆盖高/普通流动度、可/不可开挖等多类工程需求（见表 9），并且能够满足北京副中心和天府机场等项目对流态回填材料的强度与施工性能要求（3d $\geq$ 0.3 MPa，流动度 220 $\pm$ 20 mm）^[28-29]。由此可以充分证明，文中提出的盾构渣土-锂渣基 CLSM 在实现全固废资源利用的同时，兼具性能优越性与经济环保等优势。

表 9 考虑不同用途“全固废”CLSM 的性能范围

Tab. 9 Performance range of "full solid waste" based

CLSM for different purposes		
用途	流动度/mm	抗压强度/MPa
高流动度可开挖	233~263	1.75~1.89
高流动度不可开挖	207~253	2.31~2.63
普通流动度可开挖	190	2.42
普通流动度不可开挖	161~200	3.82~4.31

5 结论

制备了以盾构渣土为单一细骨料、锂渣与粉煤灰的复配为胶凝材料的可控低强度材料，系统研究了盾构渣土掺量及 FA/(FA+L) 比例对其抗压强度的影响，基于 SSA-LSSVR 构建了 CLSM 抗压强度预测模型，主要结论如下：

1) CLSM 在不同配合比下均表现出良好的抗压性能，7 d 抗压强度为 1.25~3.22 MPa，28 d 强度提升至 1.70~4.31 MPa，可满足工程中可开挖与不可开挖等情况下的 CLSM 强度要求。

2) CLSM 的抗压强度与盾构渣土掺量及 FA/(FA+L) 比例均呈负相关关系，随着二者比例的降低，CLSM 的抗压强度逐渐增大。

3) 基于 SSA-LSSVR 的 CLSM 抗压强度预测模型效果较好，预测精度较高，可用于 CLSM 抗压强度预测和配合比优化设计。

需要指出的是，由于研究条件限制，盾构渣土-锂渣基 CLSM 工作性能与力学性能有待继续深入研究，例如可结合实例分析其在各类回填工程中的适用性，并系统地分析其优势与不足。此外，可以考虑引入多种外加剂，优化 CLSM 的工作性能与力学性能，不断提升其实际应用效果。

参 考 文 献

- [1] 王笃波,王刚,张中善,等.多元固废基胶凝材料配比设计及优化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2026,47(3):141-151.[Wang Dubo,Wang Gang,Zhang Zhongshan,et al.Research on proportion design and optimization of multi-solid waste-based cementitious materials [J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2026,47(3):141-151.]
- [2] 郭卫社,王百泉,李沿宗,等.盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J].隧道建设(中英文),2020,40(8): 1101-1112.[Guo Weishe,Wang Baiquan,Li Yanzong,et al.Status quo and prospect of harmless disposal and reclamation of shield muck in China[J].Tunnel Construction,2020,40(8):1101-1112.]
- [3] Ali Shah S F,Shah A,Chen B,Ahmad M R,et al. Development of cleaner one-part geopolymer from lithium slag [J].Journal of Cleaner Production,2020,291:125241.
- [4] Liu Ze,Wang Jixiang,Jiang Qikan,et al.A green route to sustainable alkali-activated materials by heat and chemical activation of lithium slag[J].Journal of Cleaner Production, 2019,225:1184-1193.

- [5] 刘长有,卢金山.锂渣理化特性及其资源化利用研究进展[J].化工矿物与加工,2023,52(6):56-64.[Liu Changyou,Lu Jinshan.Research progress on physical and chemical properties of lithium slag and its resource utilization[J].Industrial Minerals and Processing,2023,52(6): 56-64.]
- [6] 杨磊.盾构隧道固化渣土用于公路路基填筑的可行性研究[J].公路交通技术,2024,40(2):33-41.[Yang Lei.Feasibility study on the use of solidified muck in shield tunnels for highway subgrade filling [J].Technology of Highway and Transport,2024,40(2):33-41.]
- [7] 王红军,陈健,效明哲,等.粉质黏土地层泥水平衡盾构渣土制备同步注浆液性能试验研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(增刊 2):201-210.[Wang Hongjun,Chen Jian,Xiao Mingzhe,et al.Experimental investigation of slurry performance in synchronous grouting using silty clay for slurry shield[J].Tunnel Construction,2024,44(S2):201-210.]
- [8] Cui Ying,Tan Zhongsheng.Experimental Study of high-performance synchronous grouting materials prepared with clay[J].Materials,2021,14(6):1362.]
- [9] 万军,朱安南.锂渣对水泥砂浆力学性能的影响研究[J].混凝土,2022,(7):130-133.[Wan Jun,Zhu Annan.Influence of lithium slag on the mechanical properties of cement mortars[J].Concrete,2022,(7):130-133.]
- [10] Li Shitong,Liu Siru,Du Yongsheng,et al.Effect of mineral-generated lithium slag on the properties of magnesium oxychloride cement[J].Crystals,2023,13(3): 513.
- [11] Dong Peng,Ahmad M R,Chen Bing,et al.Preparation and study of magnesium ammonium phosphate cement from waste lithium slag[J].Journal of Cleaner Production,2021, 316:128371.
- [12] 胡明华,苏翠平,梁炯丰,等.锂渣混凝土力学性能试验研究[J].混凝土,2023,(5):113-114.[Hu Minghua,Su Cuiping,Liang Jiongfeng,et al.Study on mechanical properties of lithium slag concrete[J].Concrete,2023,(5): 113-114.]
- [13] Wu Hao,Huang Baoshan,Shu Xiang,et al.Utilization of solid wastes/byproducts from paper mills in Controlled Low Strength Material (CLSM)[J].Construction and Building Materials,2016,118:155-163.
- [14] Lachemi M,Hossain K M A,Shehata M,et al. Controlled low strength materials incorporating cement kiln dust from various sources[J].Cement and Concrete Composites,2008, 30(5):381-392.
- [15] Lee N K,Kim H K,Park I S,et al. Alkali-activated, cementless, controlled low-strength materials (CLSM) utilizing industrial by-products[J].Construction and Building Materials,2013,49:738-746.
- [16] Lachemi M,Sahmaran M,Hossain K M A,et al.Properties of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust and slag [J].Cement and Concrete Composites,2010, 32(8):623-629.
- [17] Le D H,Nguyen K H.An assessment of eco-friendly controlled low-strength material[J].Procedia Engineering, 2016,142:260-267.
- [18] 中国国家标准化管理委员会.GB/T1596-2017.用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].北京:中国标准出版社,2017.[Standardization Administration of the People's Republic of China.GB/T 1596-2017.Fly ash used for cement and concrete [S].Beijing: Standards Press of China,2017.]
- [19] 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 volcanic ash activity in lithium slag and microstructure characteristics of composite cementitious materials[D].Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing),2019.]
- [20] Jamali S,Naganathan S.Performance assessment of cementless controlled Low-Strength material (CLSM) utilizing coal ashes[J].Jordan Journal of Civil Engineering, 2015,9(1):102-116.
- [21] Kaliyavaradhan K S,Ling T C,Guo M Z,et al. Waste resources recycling in controlled low-strength material (CLSM):A critical review on plastic properties[J]. Journal of Environmental Management,2019,241: 383-396.
- [22] Lin Chunfu,Wang Shengde.Fuzzy support vector machines [J].IEEE Transactions on Neural Networks,2002, 13(2): 464-471.
- [23] Scholkopf B,Smola A J,Williamson R C,et al. New Support Vector Algorithms [J].Neural Computation, 2000,12(5): 1207-1245.
- [24] 薛建凯.一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D].上海:东华大学,2020.[Xue Jiankai.Research and application of a novel swarm intelligence optimization technique[D].Shanghai:Donghua University,2020.]
- [25] Xue Jiankai,Shen Bo.A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering,2020,8(1):22-34.
- [26] 文冰梅,赵联文,黄磊.AIC 准则与留一法交叉验证渐近等价的证明[J].统计与决策,2022,38(6):40-43.[Wen Bingmei,Zhao Lianwen,Huang Lei.Proof of asymptotic equivalence between AIC criterion and leave-one-out cross-validation[J].Statistics and Decision,2022,38(6):

40-43.]

- [27] KIM Y,DINH B H,DO T M, et al.Development of thermally enhanced controlled low-strength material incorporating different types of steel-making slag for ground-source heat pump system[J].Renewable Energy, 2020,150:116-127.
- [28] 网易.流态固化土技术应用分析与案例详解[EB/OL].[2025-11-10].<https://www.163.com/dy/article/G928TM2F05389P8K.html>. [NetEase. Research Progress on CLSM Prepared with Tunneling Spoil and Lithium Slag [EB/OL].[2025-11-10].<https://www.163.com/dy/article/G928TM2F05389P8K.html>.]
- [29] 周永祥,王继忠.预拌固化土的原理及工程应用前景[J].新型建筑材料,2019,46(10):117-120.[Zhou Yongxiang,Wang Jizhong.Principles and engineering application prospects of ready-mixed solidified soil[J].New Building Materials, 2019,46(10):117-120.]

Compressive Strength and Its Prediction Model of CLSM Based on Shield Tunnelling Spoil-Lithium Slag

YAN Changbin¹, A Xiaoyu¹, QIN Jianpeng², XIAO Xiang², SHI Yuxuan¹, YANG Jie³, LU Gaoming⁴

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. China Construction Infrastructure Co., Ltd, Beijing 100029, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Zhengzhou 450003, China; 4. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology China Railway Tunnel Group, Zhengzhou, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】 Addressing the issue of low utilization rates for solid waste resources such as tunnel shield excavation waste and lithium slag from mining tailings, a controlled low-strength material (CLSM) from a holistic perspective of solid waste resource utilization was developed. This material utilizes shield excavation waste as a single fine aggregate and lithium slag combined with fly ash as a composite cementitious material. **【Methods】** This study investigates the factors affecting the compressive strength and operational performance of controlled low-strength materials. It analyzes how the proportion of shield spoil and fly ash in the total cementitious material mass ($FA/(FA+L)$) influences the compressive strength and working performance of CLSM. A compressive strength prediction model based on SSA-LSSVR was developed, which provides a foundation for optimizing CLSM mix design. **【Results】** (1) When the water-solid ratio is 0.24, the compressive strength of CLSM with 80% of the shield slag is less than 2.10 MPa, and when the shield slag content is reduced to 65%~75%, the compressive strength is 2.42~4.31 MPa. (2) When the water-to-solid ratio is 0.24, the compressive strength decreases by 5% to 15% when the $FA/(FA+L)$ ratio increases from 0% to 30%. (3) When the water solid ratio increases to 0.25, the decrease of compressive strength increases to 9%~25%. The evaluation metrics for the LSSVR model's prediction results are as follows: MRE is 8.62%, RMSE is 0.287, and R^2 is 0.882. In contrast, while the evaluation metrics for the CLSM compressive strength prediction model based on SSA-LSSVR are as follows: MRE is 3.96%, RMSE is 0.207, and R^2 is 0.935. **【Conclusion】** SSA plays a significant role in optimizing the hyperparameters of LSSVR, enhancing the model's fitting ability and generalization performance, and achieving a good coupling effect. In practical applications, the constructed compressive strength prediction model of CLSM based on SSA-LSSVR can be utilized for the optimization of mix proportions.

Keywords: shield tunnelling spoil; lithium slag; controlled low-strength material; compressive strength; prediction model