

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202205172024101976

文章编号:1674-599X(2024)05-0037-08

引用格式:聂欢, 彭晖, 钟卿瑜. 地聚物砂浆抗压强度及工作性能试验研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(5): 37-44.

Citation: NIE Huan, PENG Hui, ZHONG Qingyu. Experimental study on compressive strength and working performance of geopolymers mortar [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 37-44.

地聚物砂浆抗压强度及工作性能试验研究

聂欢¹, 彭晖^{1,2}, 钟卿瑜¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究砂浆体积分数对偏高岭土地聚物砂浆抗压强度及其工作性能的影响,将不同砂浆体积分数作为变量,分别进行地聚物砂浆和易性、流变性能和抗压强度试验。试验结果表明:随着砂浆体积分数的增大,矿渣偏高岭土地聚物砂浆的跳桌流动度与稠度均呈现出下降的趋势,同时,其屈服应力和塑性黏度则相应上升;当砂浆体积分数为35%~45%时,偏高岭土地聚物砂浆展现出较为优异的工作性能;矿渣偏高岭土地聚物砂浆的抗压强度随着砂体积分数的增大呈现出先增加后减小的趋势,当砂浆体积分数为45%时,其抗压强度达到最大值。因此,在制备矿渣偏高岭土地聚物砂浆时,应将砂浆的体积分数设定为45%,以确保其既具备良好的工作性能,又能达到较高的抗压强度。

关键词:地聚物; 砂体积分数; 抗压强度; 工作性能; 流变特性

中图分类号:U414

文献标志码:A

Experimental study on compressive strength and working performance of geopolymers mortar

NIE Huan¹, PENG Hui^{1,2}, ZHONG Qingyu¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To study the influence of mortar volume fraction on the compressive strength and working performance of metakaolin geopolymers mortar, the workability, rheological properties, and compressive strength of geopolymers mortar were tested with different mortar volume fractions as variables. The results show the hopping fluidity and consistency of slag-metakaolin geopolymers mortar decrease with the increase in mortar volume fraction, and the yield stress and plastic viscosity increase as the mortar volume fraction rises. The metakaolin geopolymers mortar exhibits excellent working performance when the mortar volume fraction is between 35% and 45%. The compressive strength of the slag-metakaolin geopolymers mortar increases first and then decreases with the increase in mortar volume fraction and reaches the maximum when the mortar volume fraction is 45%. Therefore, it is suggested that the mortar volume fraction should be 45% when slag-metakaolin geopolymers mortar is prepared, so as to ensure both good working performance and high compressive strength.

Key words: geopolymers; mortar volume fraction; compressive strength; working performance; rheological property

收稿日期:2022-05-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51878068)

通信作者:彭晖(1976—),男,教授,主要从事地聚物材料、纤维增强材料方面的研究工作。E-mail:huipeng@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

随着我国建筑行业的不断发展,普通硅酸盐水泥的需求量逐年攀升。然而,这一趋势也带来了严峻的环境问题。受限于技术条件,传统水泥生产过程中会大量释放二氧化碳,对生态环境造成显著破坏。为解决这一问题,地聚物材料应运而生,它不仅巧妙利用了自然界中富含硅、铝、氧元素的天然矿物以及工业领域产生的固体废弃物(诸如矿渣、粉煤灰等),也利用了煅烧获取的偏高岭土,将其作为核心原料。地聚物不仅具备成型迅速、能源消耗低的优势,更因其生产过程中碳排放量的大幅降低而备受瞩目,它呈现出一种独特的三维空间网状凝胶结构,为建筑材料领域带来了绿色、低碳的新选择^[1-6]。地聚物在强度和工作性能方面的优异表现使其未来有望替代水泥成为优良的建筑材料^[7-8]。

学者们对地聚物开展了诸多研究,发现以矿渣为原料的地聚物强度核心在于硅、铝元素的深度聚合反应,以及钙元素参与形成的C-S-H凝胶^[9-10]。碱激发矿渣地聚物具有高强度、快速硬化、低放热及卓越的抗冻性能等多种优势^[11],但也存在反应产物性能不稳定、体积收缩较大等劣势。以偏高岭土为主的低钙体系地聚物强度主要来自于地质聚合反应产生的三维硅铝酸钠凝胶“N-A-S-H”^[12-13]。傅博等^[14]的研究结果表明:激发剂的性质和矿物原料的构成比例对地聚物砂浆的性能有较大影响。诸华军等^[15]研究了矿渣掺量对偏高岭土地聚物抗压强度的影响,发现掺入矿渣可以显著地提高地聚物的抗压强度。张俊等^[16]的研究结果表明在适当掺量范围内,偏高岭土的加入能够显著提升砂浆的耐久性。WILLIAMS等^[17]以水泥为胶凝材料进行试验,证明了砂浆与混凝土流变性能的相似性。杨世玉等^[18]研究了地聚物反应原料的构成比例和环境温度对净浆强度及其流动性的影响,认为高温固化可提高地聚物的强度。崔潮等^[19]通过研究矿渣掺量对偏高岭土地聚物稠度和力学性能的影响,发现由于矿渣颗粒较细,其含量的增加会降低浆体的稠度。刘进琪等^[20]的研究表明:碱激发剂的性质及其用量对地聚物净浆的流动性和抗压强度有较大的影响。

目前,关于碱激发矿渣-偏高岭土地聚物砂浆的工作性能及力学性能的研究还相对较少,尤其缺乏砂浆体积分数对砂浆流动度、稠度和强度的影响研究。本文在确保地聚物原料中矿渣占40%、偏高岭土占60%的基础上,结合课题组的前期研究成果,

选取了五种不同强度等级的地聚物净浆配合比,通过调整砂浆的体积分数,研究了砂浆体积分数对地聚物砂浆的流变参数(屈服应力、塑性黏度)、和易性指标(稠度、流动度)和抗压强度的影响。

1 试验原材料

1.1 矿渣和偏高岭土

本试验采用矿渣和偏高岭土作为主要原料来制备地聚物砂浆。矿渣的成分包含CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO、SO₃和TiO₂,它们的质量分数分别为44.2%、30.1%、13.7%、5.5%、3.3%和1.8%。偏高岭土的平均粒径小于20 μm,其组成中SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O和Na₂O的质量分数分别为54.5%、43.0%、1.0%、0.8%、0.3%和0.2%

1.2 细骨料

本试验的天然细骨料为机制砂,测得砂的细度模数为3.0,属于中粗砂,其表观密度为2 752 kg/m³,符合试验要求。

1.3 碱激发剂

本文中的碱激发剂由水玻璃(Na₂SiO₃)溶液、片状氢氧化钠和蒸馏水三者混合配制而成。其中Na₂SiO₃溶液的模数为3.16,呈弱碱性,常温下测得其密度为1.381 g/cm³,片状氢氧化钠纯度为99.5%。

具体配制流程为:首先,精确称量所需的氢氧化钠,并将其与蒸馏水在烧杯中混合。在此过程中,需持续搅拌以确保氢氧化钠完全溶解,防止其固体颗粒附着在烧杯底部。待氢氧化钠溶液冷却至常温后,再将其缓缓倒入已预先称重的水玻璃(Na₂SiO₃)溶液中。接下来,将配制完成的碱激发剂放置于磁力搅拌机上,并用塑料保鲜膜密封烧杯口,以防氢氧化钠溶解放热导致水分蒸发。最后,让碱激发剂在搅拌机上静置4 h,以备后续使用。

2 试验方案及配合比设计

2.1 试验方案

砂浆的和易性常用跳桌流动度和砂浆稠度两个指标来衡量。其中跳桌流动度采用规范《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)中提供的方法。砂浆稠度试验参考工程建筑规范《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)。

本文采用德国生产的Anton Par Rheolab QC型

旋转黏度计来测试砂浆流变特性,该测试旨在探究不同试验参数下地聚物浆体的流变特性。测试过程分为四个阶段:1) 60 s的预剪切阶段;2) 30 s的静态稳定期;3) 90 s的剪切速率上升阶段,剪切速率从 0 s^{-1} 逐渐增加到 100 s^{-1} ;4) 90 s的剪切速率下降阶段,剪切速率由 100 s^{-1} 逐渐降至 0 s^{-1} 。整个测试流程共计270 s。考虑到在剪切速率下降阶段,浆体的性质趋于稳定,因此这一阶段测试得出的数据更接近真实状态。本文选用这一阶段的数据,通过最小二乘法拟合得到曲线,以便进行后续的试验分析。同时,为了评估地聚物砂浆的抗压强度,本文共设计了25组试验,每组包含三个试件并取其平均值作为测试结果。

2.2 试验配合比

为了深入研究砂体积分数对砂浆抗压强度和流动性的影响,基于课题组内前期的研究成果,在确保净浆工作性能满足要求的前提下,选取了五个

强度等级(10、20、30、40、50 MPa)的矿渣-偏高岭土地聚物净浆。同时,考虑了五个不同的砂体积分数(35%、40%、45%、50%、55%)来配制地聚物砂浆,以此研究砂体积分数对不同强度等级的地聚物砂浆和易性、流变特性和抗压强度的影响。试验配合比设计和结果见表1。

2.3 试件制备

地聚物砂浆的制作流程如下:先在砂浆搅拌机中倒入地聚物原料,搅拌2 min使其充分混合,再倒入配置好的碱激发剂搅拌3 min,最后倒入砂继续搅拌3 min。该方法能确保地聚物净浆充分地包裹细骨料,从而使地聚物砂浆的流动性更接近实际应用状态。完成搅拌后,将浆体装入尺寸为 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ 的模具中,然后放置在振动台上进行振捣,直至浆体密实且不再冒出气泡。通常振捣时间为2 min。在振捣过程中,需用铲刀刮去模具表面多余的浆体。

表1 试验配合比及结果

Table 1 Test coordination ratios and results

编号	激发剂模数	激发剂体积分数/%	液固比	砂体积分数/%	稠度/mm	流动度/mm	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	7 d抗压强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
M10-1	1.8	23	1.1	55	62	179	284.2	4.1	10.2	13.6
M10-2	1.8	23	1.1	50	75	218	201.2	3.5	10.8	14.2
M10-3	1.8	23	1.1	45	100	240	146.3	2.7	13.5	16.8
M10-4	1.8	23	1.1	40	110	249	103.7	1.9	12.2	16.2
M10-5	1.8	23	1.1	35	113	265	72.6	0.9	11.3	15.5
M20-1	1.4	23	1.1	55	78	160	267.1	4.9	17.6	24.5
M20-2	1.4	23	1.1	50	100	203	197.4	2.9	20.3	25.4
M20-3	1.4	23	1.1	45	111	242	129.4	2.4	24.5	30.8
M20-4	1.4	23	1.1	40	119	260	79.8	1.2	23.7	28.6
M20-5	1.4	23	1.1	35	122	267	57.8	0.9	21.8	25.8
M30-1	1.8	27	1.1	55	68	174	254.2	6.0	26.4	28.2
M30-2	1.8	27	1.1	50	85	213	183.6	5.7	26.8	32.0
M30-3	1.8	27	1.1	45	95	250	110.5	5.4	29.8	36.5
M30-4	1.8	27	1.1	40	107	260	85.4	3.4	28.1	35.9
M30-5	1.8	27	1.1	35	116	280	67.4	1.9	23.4	30.1
M40-1	1.6	31	1.1	55	75	142	241.5	7.3	32.2	38.2
M40-2	1.6	31	1.1	50	92	186	174.5	7.0	33.5	38.7
M40-3	1.6	31	1.1	45	103	228	91.5	6.9	38.2	45.9
M40-4	1.6	31	1.1	40	113	246	71.2	4.9	35.7	44.6
M40-5	1.6	31	1.1	35	120	260	60.5	4.4	34.0	42.0
M50-1	1.6	35	1.1	55	66	170	230.3	7.0	40.0	46.7
M50-2	1.6	35	1.1	50	80	210	164.5	6.6	41.5	48.5
M50-3	1.6	35	1.1	45	106	234	87.2	6.5	44.8	52.6
M50-4	1.6	35	1.1	40	115	256	70.2	5.9	41.5	50.2
M50-5	1.6	35	1.1	35	125	275	50.2	5.1	39.0	47.9

注:M10-1表示抗压强度为10 MPa的第一组地聚物砂浆,其余以此类推。

3 试验结果分析

3.1 砂浆和易性指标分析

依据上述操作流程和规范要求,本文测得的地聚物砂浆稠度和流动度结果分别如图1及图2所示。由图1可知,当砂体积分数为35%~55%时,砂浆的和易性指标随着砂体积分数的增大而逐渐减小。不同强度等级的砂浆和易性变化趋势一致,这表明地聚物砂浆的工作性能与其净浆强度的相关性并不显著。

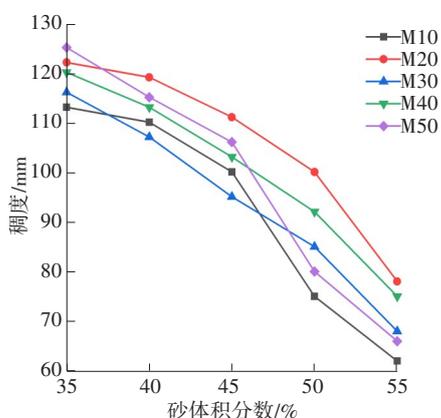


图1 砂体积分数对砂浆稠度的影响

Fig. 1 Influence of mortar volume fraction on mortar consistency

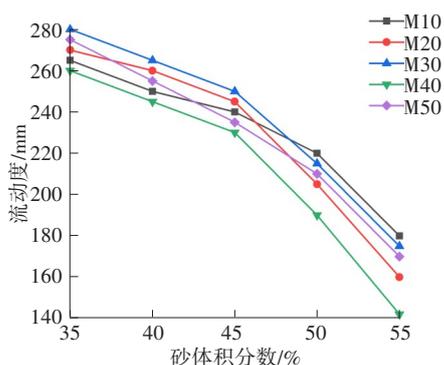


图2 砂体积分数对砂浆流动度的影响

Fig. 2 Influence of mortar volume fraction on mortar fluidity

从图2可以看出,流动度的数据曲线在砂体积分数为45%时出现了明显的转折点。以变化最为显著的M40试验组为例进行分析:当砂体积分数从35%增加至45%时,砂浆流动度由260 mm减少到228 mm,下降比例为12.3%;当砂体积分数从45%增加至55%时,砂浆流动度由228 mm减少到142 mm,下降比例为37.7%,下降幅度明显增大,其余四

组试验的砂浆流动度结果也呈现类似规律。

以变化趋势最显著的五组数据(编号分别为M40-5、M40-4、M40-3、M40-2、M40-1)为例分析上述规律,当砂体积分数分别为35%、40%、45%、50%、55%时,对应的砂浆流动度分别为260、246、228、186、142 mm,砂浆流动度分别对应减少了5.4%、7.3%、18.4%、23.7%,流动度的总体降低幅度为45.4%;对应的砂浆稠度分别为120、113、103、92、75 mm,砂浆稠度分别对应减少了5.8%、8.8%、10.7%、18.5%,稠度的整体降低幅度为37.5%。可以看出,虽然砂浆的稠度也随着砂体积分数的增加而有所减小,但砂体积分数对砂浆流动度的影响更为显著。

3.2 地聚物砂浆流变性能分析

研究表明,砂体积分数会显著影响砂浆的流变性能。砂浆的流变参数主要与屈服应力和塑性黏度有关,屈服应力的大小影响浆体发生流动的难易程度,屈服应力过大则不利于浆体发生初始流动,而浆体的塑性黏度大小则主要与浆体的流动速度有关^[21-23]。本节探究了砂体积分数对砂浆流变特性的影响,试验结果如图3及图4所示。由图3~4可以看出,各组砂浆的流变参数(屈服应力和塑性黏度)均随着砂体积分数的增加而增加。其中,屈服应力最小为50.2 Pa,最大为284.2 Pa,塑性黏度最小为0.9 Pa·s,最大为7.3 Pa·s。这主要是因为浆体的流变参数受浆体中固体颗粒的形貌、粒径和比表面积的影响,而地聚物砂浆中矿物原料与激发剂结合形成的地聚物净浆包裹于砂的表面,随着砂含量的增加,颗粒间的相互作用力也随之增强,从而导致砂浆的屈服应力和塑性黏度上升。

砂体积分数对M10试验组和M30试验组流变参数的影响如图5和图6所示。由图5~6可知,在砂体积分数从35%增加到55%的过程中,塑性黏度的变化相对较小,且其变化趋势较为平稳,增幅始终保持在10 Pa·s以内。对于砂浆的屈服应力而言,当砂体积分数小于45%时,砂浆屈服应力的增长较为缓慢,在砂体积分数从35%增加到45%的过程中,M10组的屈服应力由72.6 Pa增长至146.3 Pa,提高了101.5%,M30组的屈服应力由67.4 Pa增长至110.5 Pa,提高了63.9%。但是当砂体积分数由45%增长至55%时,砂浆的屈服应力急剧增长,M10组的屈服应力由146.3 Pa增长至284.2 Pa,增加了137.9 Pa,M30组的屈服应力由110.5 Pa增长至

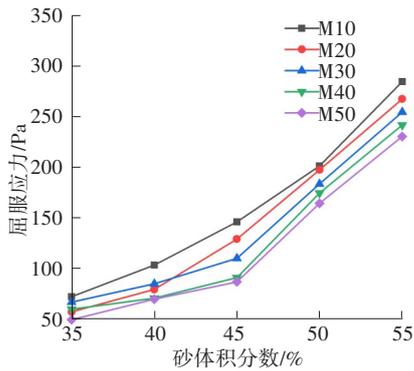


图3 砂体积分数对屈服应力的影响

Fig. 3 Influence of mortar volume fraction on yield stress

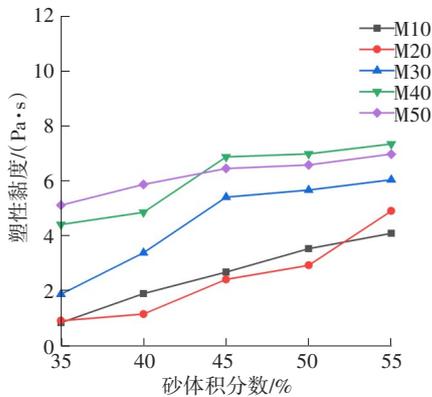


图4 砂体积分数对塑性黏度的影响

Fig. 4 Influence of mortar volume fraction on plastic viscosity

254.2 Pa,增加了143.7 Pa,这种急剧的增长不利于浆体的流动。因此,为了确保矿渣-偏高岭土地聚物砂浆具有良好的流变性能,建议将砂体积分数控制在35%~45%。

3.3 砂浆的流变参数与和易性指标之间的关系

通过前面的分析可以得出:地聚物砂浆的和易性指标(稠度、流动度)随着砂体积分数的增大而减小。但砂浆的和易性指标与流变参数的变化趋势相反,随着流变参数的增大,砂浆的稠度和流动度反而均有所下降。为了进一步探究和易性指标与流变参数的相关性,本文进行了详细的数据分析,如图7所示。由图7可知,砂浆稠度可以很好地反映砂浆的屈服应力大小,两者之间存在较强的相关性,且两者有超过90%的数据点在变化比例上基本保持一致,但未发现流变参数与砂浆流动度有明显的相关关系。尽管砂浆的流动度增大时屈服应力也相应地增大,但这仅反映出趋势上的一致性,并非严格的相关性。这一发现表明任何一个传统的

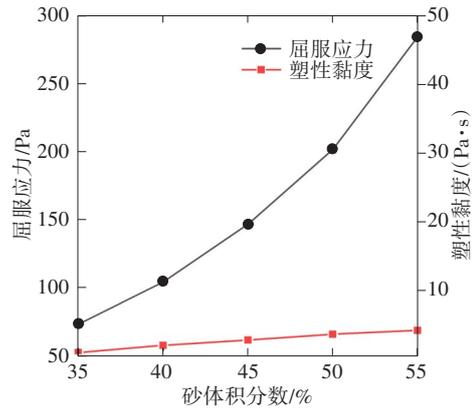


图5 砂体积分数对M10组砂浆流变参数的影响

Fig. 5 Influence of mortar volume fraction on rheological parameters of M10 group

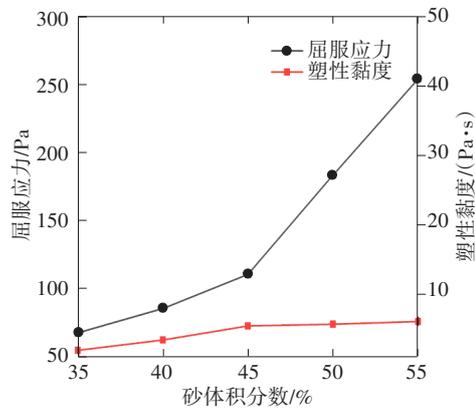


图6 砂体积分数对M30组砂浆流变参数的影响

Fig. 6 Influence of mortar volume fraction on rheological parameters of M30 group

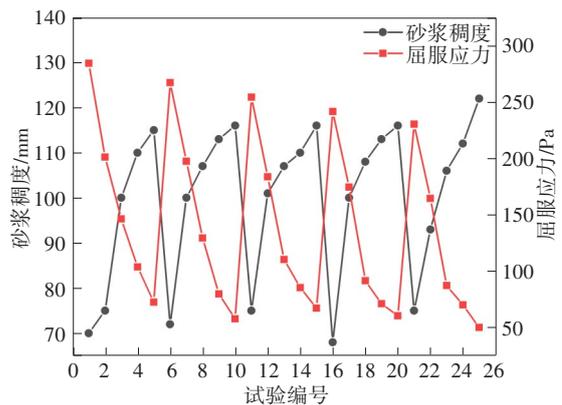


图7 砂浆稠度与砂浆屈服应力之间的相关性

Fig. 7 Correlation between mortar consistency and yield stress of mortar

宏观试验都无法全面地反映地聚物砂浆的流变性能。因此,在评估地聚物砂浆的性能时,需要综合考虑多个指标和试验方法,以获得更全面、准确的结果。

3.4 砂浆抗压强度结果分析

将不同组别的地聚物砂浆养护至7 d和28 d后,分别测得其抗压强度。砂体积分数与砂浆7 d和28 d抗压强度的关系分别如图8和图9所示。由图8~9可知,砂浆的抗压强度随着砂体积分数的增长呈先增大后减小的趋势。在砂体积分数为45%时,砂浆抗压强度均达到峰值。龄期为7 d的地聚物砂浆最大抗压强度为44.8 MPa,龄期为28 d的地聚物砂浆最大抗压强度为52.6 MPa。对比分析25组砂浆7 d和28 d的抗压强度可以发现:超过95%的地聚物砂浆在7 d时的抗压强度已经达到了其在28 d抗压强度的85%。这说明相比于传统的水泥砂浆,矿渣-偏高岭土地聚物砂浆具有更高的早期强度。同时,在一定范围内,增加砂体积分数能有效提高砂浆强度。然而,过高的体积分数又会导致砂浆强度的降低。造成以上现象的原因可能是:矿渣、偏高岭土与砂的微观形貌、粒径有较大差异,且

随着砂体积分数的增加,砂浆内部的摩擦力和地聚物胶凝材料对砂颗粒表面的附着力都在不断变化。因此,在某一合适的砂体积分数下,砂浆体系内部的地聚物胶凝材料和砂能充分融合,这样既发挥了砂的骨架作用,又充分利用了地聚物的早强特性。此时,砂对于地聚物胶凝材料有增强作用,从而使得砂浆的强度比净浆的高。但是,如果砂体积分数过大,则会导致由矿渣和偏高岭土组成的胶凝材料含量相对减少,没有足够的净浆来包裹砂颗粒。这不仅可以降低砂浆的流动性,不利于颗粒间的充分接触,还会造成地质聚合反应不完全,最终导致生成的地聚物砂浆强度比净浆的低。

4 结论

通过测试不同砂体积分数的地聚物砂浆试件的和易性指标、流变性能和抗压强度,得到如下结论:

1) 在砂体积分数为35%~55%时,地聚物砂浆的稠度和流动度均随着砂体积分数的增大而减小,且不同强度等级砂浆的和易性指标随砂体积分数的变化趋势一致。相比于砂浆稠度,砂体积分数对流动度的影响更为明显。

2) 地聚物砂浆的屈服应力和塑性黏度均随着砂体积分数的增大而增大。当矿渣偏高岭土地聚物砂浆的砂体积分数取为45%时,砂浆具有优良的工作性能和较高的强度。

3) 传统的地聚物砂浆稠度试验只能较好地反映地聚物砂浆的屈服应力这一流变参数,任何一个传统的宏观试验并不能全面地反映地聚物砂浆的流变性能。

4) 地聚物砂浆的抗压强度随着砂体积分数的增大呈现先增大后减小的趋势,在砂体积分数为45%时砂浆强度达到最大,且地聚物砂浆拥有较高的早期强度。

参考文献(References):

- [1] 孙道胜,王爱国,胡普华.地质聚合物的研究与应用发展前景[J].材料导报,2009,23(7):61-65. DOI: 10.3321/j.issn:1005-023X.2009.07.016.
SUN Daosheng, WANG Aiguo, HU Puhua. Research of geopolymer and its applications and development prospects [J]. Materials Reports, 2009, 23 (7) : 61-65. DOI: 10.3321/j.issn: 1005-023X.2009.07.016.

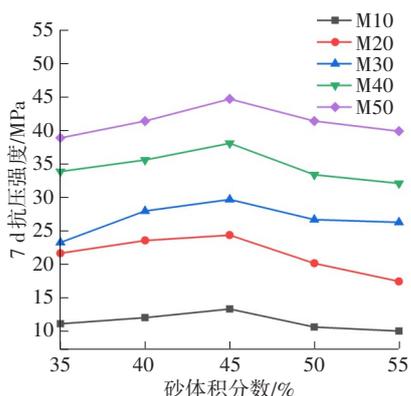


图8 砂体积分数对砂浆7 d抗压强度的影响

Fig. 8 Influence of mortar volume fraction on compressive strength of mortar on 7th day

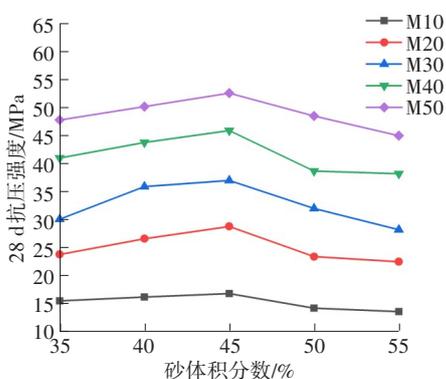


图9 砂体积分数对砂浆28 d抗压强度的影响

Fig. 9 Influence of mortar volume fraction on compressive strength of mortar on 28th day

- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymers [J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1991, 37 (8) : 1633-1656. DOI: 10.1007/bf01912193.
- [3] VAN DEVENTER J S J, PROVIS J L, DUXSON P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 29: 89-104. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.
- [4] 倪文, 王恩, 周佳. 地质聚合物: 21世纪的绿色胶凝材料[J]. *新材料产业*, 2003(6): 24-28.
NI Wen, WANG En, ZHOU Jia. Geopolymer: green cementitious material in 21st century [J]. *Advanced Materials Industry*, 2003(6): 24-28.
- [5] 贾屹海. Na-粉煤灰地质聚合物制备与性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
JIA Yihai. Preparation and properties of Na-fly ash geopolymer[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2009.
- [6] 马艳霞, 聂思凡, 郭佳庆. 硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
MA Yanxia, NIE Sifan, GUO Jiaqing. Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19 (1) : 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
- [7] 张君毅. 粉煤灰作为可持续路面材料的稳定再生沥青路面研究[J]. *公路与汽运*, 2022(1): 92-94, 98. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.024.
ZHANG Junyi. Study on stable recycled asphalt pavement with fly ash as sustainable pavement material [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2022 (1) : 92-94, 98. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.024.
- [8] KOMNITSAS K, ZAHARAKI D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry [J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20(14): 1261-1277. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.07.011.
- [9] PUERTAS F, PALACIOS M, MANZANO H, et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31 (12) : 2043-2056. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036.
- [10] BROUGH A R, ATKINSON A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I: strength, hydration and microstructure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(6): 865-879. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00717-2.
- [11] 蒲心诚, 甘昌成, 嵇亚俊, 等. 高强碱矿渣混凝土的结构与性能[J]. *混凝土与水泥制品*, 1991(6): 4-8. DOI: 10.19761/j.1000-4637.1991.06.001.
PU Xincheng, GAN Changcheng, JI Yajun, et al. Structure and properties of high alkali slag concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 1991 (6) : 4-8. DOI: 10.19761/j.1000-4637.1991.06.001.
- [12] HUSEIEN G F, MIRZA J, ISMAIL M, et al. Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9(4): 1557-1566. DOI: 10.1016/j.asej.2016.11.011.
- [13] BERNAL S A. Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 217-226. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.013.
- [14] 傅博, 程臻贇, 韩静云, 等. 碱偏高岭土矿渣地聚物砂浆强度及新拌性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(12): 4013-4020. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.12.045.
FU Bo, CHENG Zhenyun, HAN Jingyun, et al. Strength and fresh properties of alkali activated metakaolin slag geopolymer mortar [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38 (12) : 4013-4020. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.12.045.
- [15] 诸华军, 姚晓, 张祖华, 等. 矿渣掺量对偏高岭土基土聚水泥抗压强度及孔结构的影响[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(2): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2009.02.001.
ZHU Huajun, YAO Xiao, ZHANG Zuhua, et al. Effect of slag dosage on compressive strength and pore structure of metakaolin-based geopolymeric cement [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 31 (2) : 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2009.02.001.
- [16] 张俊, 丛钢, 杨长辉. 偏高岭土对碱矿渣水泥砂浆干缩性能的影响[J]. *混凝土*, 2010(10): 115-117. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2010.10.038.
ZHANG Jun, CONG Gang, YANG Changhui. Effect of metakaolin on dry-shrinkage of alkali-activated slag cement mortar [J]. *Concrete*, 2010(10): 115-117. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2010.10.038.
- [17] WILLIAMS D A, SAAK A W, JENNINGS H M. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29 (9) : 1491-1496. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00124-6.
- [18] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 地聚物砂浆的力学性能与孔结构分形特征分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 126-135. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190495.
YANG Shiyu, ZHAO Renda, JIN Hesong, et al. Analysis on mechanical properties and fractal characteristics of micropore structure of geopolymer mortar [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48 (3) : 126-135. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190495.

- [19] 崔潮, 彭晖, 刘扬, 等. 矿渣掺量及激发剂模数对偏高岭土基地聚物常温固化的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 535-542. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.04.008.
CUI Chao, PENG Hui, LIU Yang, et al. Influence of GGBFS content and activator modulus on curing of metakaolin based geopolymer at ambient temperature[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 535-542. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.04.008.
- [20] 刘进琪, 王世玉, 彭晖, 等. 碱激发剂对粉煤灰基地聚物性能影响研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002.
LIU Jinqi, WANG Shiyu, PENG Hui, et al. Study on the effect of alkali activator on the properties of fly ash-based geopolymer[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002.
- [21] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 246-252. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.10.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Influence of calcium carbonate whisker on rheology of cement mortar with different water-cement ratios and sand-cement ratios [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 246-252. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.10.
- [22] 刘龙武, 周斌, 宁泽宇. 吹填泥浆快速处理方法的室内试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 16-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.019.
LIU Longwu, ZHOU Bin, NING Zeyu. Experimental study on rapid treatment method for dredged slurry [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 16-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.019.
- [23] 吕小武, 赵永伟, 闫永亮. 石灰石粉对水泥砂浆强度影响及作用机理[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 167-173. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.030.
LYU Xiaowu, ZHAO Yongwei, YAN Yongliang. Effect of limestone powder on strength of cement mortar and its mechanism [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 167-173. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.030.

(责任编辑:薛仪)

(上接第7页)

- 技术[J]. 上海公路, 2020(2): 30-34, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2020.02.009.
FU Xiangrong. Anti-overturning reinforcement and synchronous jacking replacement technology of single pier bridge [J]. Shanghai Highways, 2020(2): 30-34, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2020.02.009.
- [8] 刘毅, 刘年朋, 卓子, 等. 考虑刚度折减的弹性二阶分析法在双跨排架结构中的运用[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(9): 1-7. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.001.
LIU Yi, LIU Nianpeng, ZHUO Zi, et al. The application of elastic second-order method with considering stiffness reduction to two-span bent structure [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(9): 1-7. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.001.
- [9] 邓继华, 许斌林, 黄学文, 等. 大跨径体内混合配束连续刚构桥有限元分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1): 51-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.008.
DENG Jihua, XU Binlin, HUANG Xuewen, et al. Finite element analysis for long-span concrete continuous rigid frame bridge with mixed arrangement of internal and external tendons [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(1): 51-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.008.
- [10] 刘宇飞, 李传习, 于孟生, 等. 大跨拱桥拱肋拼装温差效应分析及控制方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.01.011.
LIU Yufei, LI Chuanxi, YU Mengsheng, et al. Analysis and control method of temperature difference effect in arch rib assembly of large span concrete-filled steel tube arch bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.01.011.
- [11] 周帅, 于鹏, 聂建国, 等. 群钉连接组合轨道梁刚度调整系数研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(1): 1-7, 36. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.002.
ZHOU Shuai, YU Peng, NIE Jianguo, et al. Study on stiffness adjustment coefficient of assembled composite track beam connected by group nails [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(1): 1-7, 36. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.002.
- [12] 唐利科, 宋随弟, 张扬. 大跨连续刚构桥桥墩计算长度系数的取值研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 190-196. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.04.022.
TANG Like, SONG Suidi, ZHANG Yang. Value of effective length coefficient of pier of long-span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 190-196. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.04.022.

(责任编辑:石月珍)