

土聚物水泥砂浆的制备及其性能研究

左李萍, 郭 浩, 王 娟, 葛 涵, 岳朝德

(江苏现代工程检测有限公司, 江苏 南京 210049)

摘要:为提升水泥基材料在高温、冻融等严苛环境下的性能与耐久性,发展新型耐高温、抗冻融且力学性能优良的建筑材料具有重要意义。文章制备了土聚物水泥砂浆,系统对比其与普通水泥砂浆在早期强度、收缩率、保水率及黏结强度等方面的差异,并重点研究高温(800 ℃)与冻融循环后的性能变化,同时分析了不同长度聚丙烯纤维对砂浆力学性能的增强效应,以期拓展该材料在防火、耐候等特殊工程中的应用潜力。研究结果表明:1)土聚物水泥砂浆在早期强度、28 d收缩率、保水率及黏结强度方面均优于普通水泥砂浆;2)该材料具备优异的高温稳定性,800 ℃作用后抗压强度保持率可达61.6%,远高于普通砂浆的25.5%;3)冻融循环后质量变化率与动弹性模量保持良好,抗冻性能突出;4)掺入15 mm聚丙烯纤维可显著提高抗折强度,7 d与28 d增长率分别为22.9%和16.7%;掺入12 mm纤维对抗压强度的提升效果最佳,7 d与28 d增长率分别为12.1%和9.5%。

关键词:土聚物;早期强度;黏结强度;抗冻性;聚丙烯纤维

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0007-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.04.036

Study on the preparation and performance of geopolymer cement mortar

ZUO Liping, GUO Hao, WANG Juan, GE Han, YUE Chaode

(Jiangsu Modern Engineering Testing Co., Ltd., Nanjing 210049, Jiangsu, China)

Abstract: To enhance the performance and durability of cement-based materials under severe environmental conditions such as high temperatures and freeze-thaw cycles, the development of novel building materials with superior thermal resistance, frost resistance, and mechanical properties is of considerable significance. In this study, geopolymer cement mortar was prepared, and its performance was systematically compared with that of ordinary portland cement mortar in terms of early-age strength, shrinkage rate, water retention capacity, and bond strength. The performance variations after exposure to high temperature (800 ℃) and freeze-thaw cycling were specifically investigated. Furthermore, the reinforcing effects of polypropylene fibers with different lengths on the mechanical properties of the mortar were analyzed. The results indicate that: 1) The geopolymer cement mortar outperforms ordinary mortar regarding early-age strength, 28 d shrinkage rate, water retention, and bond strength. 2) The material exhibits excellent high-temperature stability, retaining 61.6% of its compressive strength after exposure to 800 ℃, which is significantly higher than the 25.5% retention rate of ordinary mortar. 3) After freeze-thaw cycling, the mass change rate and dynamic elastic modulus remain favorable, demonstrating outstanding frost resistance. 4) The addition of 15 mm polypropylene fibers significantly improves the flexural strength, with growth rates of 22.9% and 16.7% at 7 d and 28 d, respectively. The addition of 12 mm fibers yields the optimal

收稿日期: 2025-03-28

基金项目: 镇江市科研创新项目(FZ2013024)

作者简介: 左李萍(1987—), 女, 高级工程师, 从事工程材料的研究及检测。

enhancement in compressive strength, with growth rates of 12.1% and 9.5% at 7 d and 28 d, respectively.

Key words: geopolymer; early strength; bond strength; frost-resistance; polypropylene fibers

随着可持续发展理念的不断深化,建筑行业正面临着资源节约和环境保护的双重挑战。传统水泥砂浆作为最广泛使用的建筑材料之一,其生产与使用过程中的高能耗和碳排放问题日益凸显。因此,研发新型环保材料以替代或部分替代传统水泥砂浆,已成为当前无机非金属材料研究的重点方向之一^[1-3]。

传统水泥行业依赖“两磨一烧”的工艺,需要消耗煤炭等资源较多,与此同时对环境也产生较多的污染与破坏。土聚物水泥的原材料来源较为广泛,含硅铝酸盐矿物的废渣都可以成为其原料来源,如偏高岭土、煤矸石、矿渣、粉煤灰和黏土等。这既能解决工业废弃物的堆放和污染环境的问题,又能解决传统水泥行业生产水泥所用石灰石等原材料短缺的问题。土聚物水泥砂浆的生产和使用过程对环境的负面影响较小,符合当前环保和可持续发展的要求。土聚物水泥砂浆以其良好的工作性能、优异的力学性能和良好的环境适应性,被认为是一种有潜力的绿色建筑材料^[4-5]。研究土聚物水泥砂浆的配制方法及其性能,对于推动工程材料向节能、环保的方向发展具有重要意义,同时有助于降低工程成本,提高工程实体的耐久性和安全性。

近年来,关于土聚物水泥砂浆的研究逐渐增多。国外学者主要集中于土聚物的改性机理及其在水泥基材料中的应用效果,而国内研究则更侧重于土聚物的本地化利用和成本效益分析。然而,目前关于土聚物水泥砂浆综合性能系统研究的文

献仍相对匮乏,尤其是针砂浆耐高温后强度性能的研究。本文通过自制土聚物水泥砂浆,研究了土聚物水泥砂浆与普通预拌砂浆的强度、保水率、28 d 收缩率、黏结强度的区别,以及两种砂浆高温后的强度的对比,从而得到合理的土聚物水泥砂浆配比。

纤维改性砂浆是指在传统的水泥砂浆中添加一定比例的纤维材料,以改善其性能。通过添加纤维,可以提高砂浆的抗裂、力学等性能,从而延长其使用寿命并提高工程结构的安全性。

1 试验材料

1.1 原材料

试验采用的偏高岭土产地为河北省,其化学成分见表 1。选用 II 级粉煤灰,其化学成分如表 2 所示。选用 S95 级磨细矿粉,其化学成分如表 3 所示。

1.2 激发剂

(1) 固体激发剂:氢氧化钠(分析纯),纯度 $\geq 95\%$ 。

(2) 液体激发剂:水玻璃(硅酸钠),表 4 为水玻璃的技术指标,所需水玻璃模数采用水和氢氧化钠来进行调节。

根据试验所需的模数,水玻璃可以按如下公式进行调节。

$$G = \frac{M_1 - M_2 \times N \times G_1}{M_1 \times P} \times 1.29 \quad (1)$$

式中: G 为加入的氢氧化钠的质量, g; G_1 为选用

表 1 原料的化学成分(质量分数)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	%
55.06	44.12	0.76	0.24	0.17	0.06	0.55	0.06	

表 2 II 级粉煤灰的化学组成(质量分数)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	%
50.24	11.71	25.61	5.06	0	0.60	1.80	2.18	

表 3 矿粉的化学组成(质量分数)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	%
35.29	31.21	18.66	1.084	0.5	5.00	2.71	4.16	

表 4 水玻璃技术指标

密度(20 ℃) / (g·mL ⁻¹)	氧化钠质 量分数/%	二氧化硅 质量分数/%	模数
1.381	8.3	26.4	3.2

水玻璃的质量, g; N 为水玻璃中氧化钠的质量分数; M_1 为水玻璃初始模数; M_2 为水玻璃目标模数; P 为氢氧化钠纯度。

1.3 试验设备

试验所用到的主要仪器及型号如表 5 所示。

表 5 试验仪器及型号

仪器名称	型号
电子天平	JA3002
微机控制电液伺服万能试验机	WAW-100
水泥胶砂搅拌机	JJ-5
水泥净浆搅拌机	NJ-160A
水泥胶砂振实台	ZS-15
箱式电阻炉	SXC-4-10
混凝土快速冻融试验机	KDR-10 型
动弹模量测定仪	NELD-DTV

1.4 土聚物水泥砂浆的配制

采用前期研究 E7 得到的土聚物水泥配方, 详见表 6。其中, 土聚物水泥组成配比是偏高岭土: 矿粉: 粉煤灰 = 80% : 15% : 5%。

表 6 土聚物水泥配合比

编号	偏高岭 土/%	粉煤 灰/%	矿粉/%	水玻璃 模数	激发剂 碱度
E7	80	5	15	1.4	18

土聚物水泥砂浆配比如表 7 所示。其中, 土聚物水泥砂浆加水量均为其干重的 17% (并包含加入水玻璃的质量), 振捣成型, 标准养护, 激发剂碱度按照引入 Na_2O 质量分数来计算。

表 7 土聚物水泥砂浆配比

强度等级	偏高岭土胶 凝材料/kg	粉煤灰/kg	砂/kg
EPM5.0	100	89	800
EPM10.0	130	59	800
EMM5.0	100	79	810
EMM10.0	130	49	810

其中, EPM (earth polyme mortar) 为土聚物水泥抹面砂浆, EMM (earth polymer masonry mortar) 土聚物水泥砌筑砂浆。

1.5 普通预拌砂浆的配制

表 8 是普通水泥砂浆的配合比, 加水量为干粉砂浆的 17%, 振捣成型, 标准养护。其中, DPM (dry plastering mortar) 为抹面砂浆, DMM (dry mix masonry mortar) 为砌筑砂浆。

表 8 普通预拌砂浆配比

强度等级	水泥/kg	粉煤灰/kg	砂/kg	稠化剂/kg
DPM5.0	100	89	800	11
DPM10.0	130	59	800	11
DMM5.0	100	79	810	11
DMM10.0	130	49	810	11

1.6 纤维改性土聚物水泥砂浆的配制

纤维土聚物砂浆的配合比如下。土聚物水泥 (E7): 标准砂: 水 = 1 : 3 : 0.5, 烯采用聚丙烯纤维, 纤维长度分别为 6、9、12、15、18 mm。

2 结果与讨论

2.1 两种砂浆性能对比

两种砂浆的基本性能对比如表 9 所示。从表 9 数据可以得出, 在 28 d 抗压强度上, 土聚物水泥砂浆和普通水泥砂浆相近, 但普通水泥砂浆的抗压强度略低。普通水泥砂浆在 7 d 的早期抗压强度明显低于土聚物水泥砂浆。此外, 从表中同时也可以得出土聚物水泥砂浆在 28 d 的收缩率、黏结强度和保水率方面也明显优于普通水泥砂浆。

2.2 两种砂浆高温后的强度对比

选取两种土聚物水泥抹面砂浆 (即 EPM5.0、EPM10.0) 和两种普通水泥抹面砂浆 (即 DPM5.0、DPM10.0) 分别在 100、300、500、700、800 ℃ 后恒温 60 min, 然后自然冷却至室温后进行抗压强度试验。

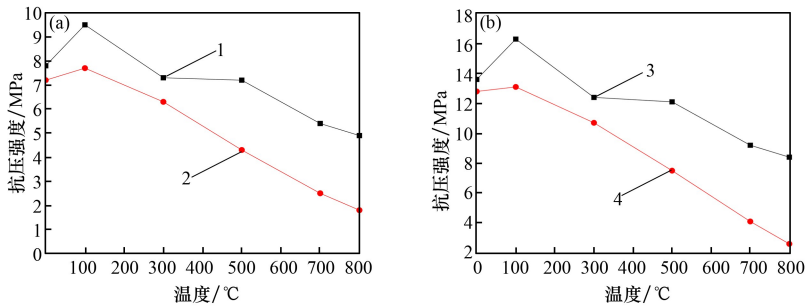
图 1 给出了土聚物水泥抹面砂浆 (EPM5.0、EPM10.0) 及普通水泥抹面砂浆 (DPM5.0、DPM10.0) 的抗压强度随温度变化的关系。在经历不同高温后, 土聚物水泥砂浆的抗压强度普遍高于普通水泥砂浆, 具体分析如下。

(1) 在 100 ℃ 后: 土聚物水泥砂浆和普通水泥砂浆的抗压强度相较于室温下均有所提高。

(2) 在 100 ~ 300 ℃ 后: 两种材料的抗压强度下降较多。

表 9 两种砂浆的基本性能

强度等级	抗压强度/MPa		收缩率/%	黏结强度/MPa	保水率/%
	7 d	28 d	28 d		
EPM5.0	7.2	7.8	0.09	0.29	93
EPM10.0	12.4	13.6	0.10	0.35	94
EMM5.0	6.8	7.1	—	—	91
EMM10.0	11.8	12.5	—	—	90
DPM5.0	5.1	7.2	0.12	0.21	93
DPM10.0	9.2	12.8	0.11	0.26	94
DMM5.0	4.8	6.8	—	—	90
DMM10.0	8.5	12.1	—	—	90



(a) EPM5.0 和 DPM5.0 抗压强度随温度的变化; (b) EPM10.0 和 DPM10.0 抗压强度随温度的变化
强度等级: 1—EPM5.0; 2—DPM5.0; 3—EPM10.0; 4—DPM10.0。

图 1 土聚物水泥砂浆和普通水泥砂浆高温抗压强度对比

(3) 在 300 ~ 500 ℃ 后: 土聚物水泥砂浆的抗压强度基本没有太大变化, 显示出其稳定性。

(4) 在 800 ℃ 高温后: 土聚物水泥砂浆的抗压强度为室温时的 61.6%, 而普通水泥砂浆的抗压强度保留值仅为室温时的 25.5%。

总体来说, 土聚物水泥砂浆在高温环境下表现出更好的性能和稳定性, 尤其在极端高温(如 800 ℃)时, 其抗压强度保持率远高于普通水泥砂浆。这一差异主要源于两者的材料组成和结构特性的不同。土聚物水泥砂浆中的聚合物成分提供了更好的温度稳定性和耐高温性能。在高温条件下, 聚合物能够形成保护膜, 减少水泥砂浆内部的损伤, 从而维持较高的抗压强度。相比之下, 普通水泥砂浆中的水泥浆体在高温下容易发生脱

水、分解和晶体结构变化, 导致抗压强度大幅下降。此外, 土聚物水泥砂浆在 300 ~ 500 ℃ 的温度区间内抗压强度基本保持稳定, 这表明其在一定范围内能够承受温度变化而不影响材料性能, 这对于实际工程应用中的耐火性和安全性极为重要, 也使其在需要耐高温或防火性能的工程应用领域具有明显优势。

2.3 两种砂浆抗冻性试验

选取 EPM10.0 和 DPM10.0 两种砂浆进行砂浆抗冻性试验, 这两种试件冻结及融化终了后中心温度分别为 - 18、5 ℃。每次冻融循环完成时间为 4 h, 冻融循环次数采用 5 次进行控制。两种砂浆的抗冻性对比如表 10 所示。

其中, 质量损失率 w_n 及相对动弹性模量 P_n (%)

表 10 两种砂浆的抗冻性对比

强度等级	冻融试验前的 试件质量/g	循环后试件质 量测值/g	质量变化 率/%	试验前的试件 横向基频/Hz	循环后横向基 频测值/Hz	相对动弹 性模量/%	循环后试 件外观
EPM10.0	8 728	8 688	0.46	1 896	1 878	98.1	完好
DPM10.0	8 610	8 523	1.01	1 829	1 781	94.8	完好

采用以下公式进行计算。

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\%$$
 (2)

式中： W_n 为 n 次冻融循环后的试件质量变化率，%； m_0 为试件冻融试验前的试件质量，g； m_n 为 n 次冻融循环后的试件质量，g。

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\%$$
 (3)

式中： P_n 为经 n 次冻融循环后试件的相对动弹性模量，%； f_n 为冻融 n 次循环后试件的横向基频，Hz； f_0 为试验前的横向基频，Hz。

从上表中可以看出，经 5 次冻融循环后，土聚物水泥砂浆试件质量变化率及相对动弹性模量的检测结果均好于普通水泥砂浆。土聚物水泥砂浆包含可以分散在水中的聚合物，这些聚合物能够在水泥基体中形成网状结构，增强材料的整体力学性能。这种网状结构能够有效抵抗冻融循环中产生的应力，从而减少材料的损伤。土聚物水泥砂浆具有出色的抗渗性，这也有助于阻止水分进入砂浆内部，从而减少冻融对材料的破坏。在冻融循环中，良好的抗渗性是提高材料耐久性的重要因素。土聚物水泥砂浆由于其独特的化学成分和结构特性，在抗冻性能上优于普通水泥砂浆。其优异的表现主要得益于聚合物的加入和改进的防水性能，以及其良好的结构补强能力和自我修复机制。这些因素共同作用，使得土聚物水泥砂浆在冻融循环中表现出更高的稳定性和耐久性。

2.4 纤维改性土聚物水泥砂浆性能对比

添加不同长度纤维对土聚物水泥砂浆 7 d/28 d 抗折强度的影响如表 11 所示。添加不同长度纤维对土聚物水泥砂浆 7 d/28 d 抗折强度增长率的影响如图 2 所示。

表 11 纤维土聚物水泥砂浆抗折强度

纤维长度/ mm	7 d 抗折强 度/MPa	28 d 抗折 强度/MPa
—	3.5	6.0
6	3.8	6.3
9	3.9	6.5
12	4.1	6.8
15	4.3	7.0
18	4.0	6.6

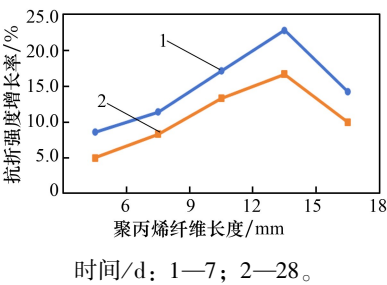


图 2 不同时间下纤维长度对土聚物水泥砂浆抗折强度增长率的影响

试验数据表明，当纤维长度从 6 mm 增至 18 mm 时，材料抗弯性能的强化效应呈现非线性响应特征，在 15 mm 长度下达到峰值强化效果，7、28 d 抗折强度增幅分别达 22.9%、16.7%。从断裂力学测试证实，纤维单元通过桥联效应和界面摩擦协同作用耗散能量，从而显著提升材料的弯曲变形抗力。

添加不同长度纤维对土聚物水泥砂浆 7 d/28 d 抗压强度的影响如表 12 所示。添加不同长度纤维对土聚物水泥砂浆 7 d/28 d 抗压强度增长率的影响如图 3 所示。

表 12 纤维土聚物水泥砂浆抗压强度

纤维长度/mm	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
—	35.5	45.2
6	36.3	45.9
9	38.3	46.3
12	39.8	49.5
15	38.8	47.2
18	38.1	47.1

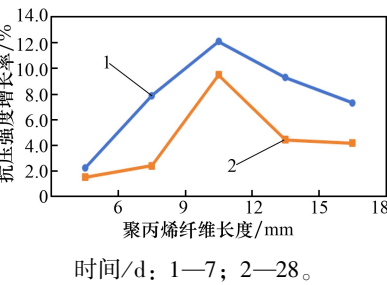


图 3 不同时间下纤维长度对土聚物水泥砂浆抗压强度增长率的影响

试验结果表明，聚丙烯纤维的添加可有效改善土聚物水泥的力学性能。通过对比添加不同纤维长度试样的抗压强度试验发现，土聚物砂浆的抗压强度增长率与纤维尺寸参数呈显著相关性。

当纤维长度由 6 mm 增至 18 mm 时, 试件破坏荷载呈现先升后降的非线性变化特征, 其中 12 mm 纤维试样表现出 7、28 d 抗压强度增幅分别达 12.1%、9.5%。

这一现象可通过复合材料界面力学理论进行解释, 当增强相尺寸过小时(如 6 mm 试样), 比表面积不足导致纤维-基体界面粘接性能下降, 同时单位体积内纤维根数增加引发的团聚效应, 会在基体内形成应力集中点, 反而降低结构致密性。当纤维长度超过临界值(12 mm)后, 搅拌工艺引发的纤维弯折缺陷会显著削弱其增强效果, 这解释了长纤维试样强度回落的现象。由此可知, 聚丙烯纤维的最佳长度为 12 mm。

3 结 论

(1) 土聚物水泥砂浆早期强度要明显高于普通水泥砂浆, 同时土聚物水泥砂浆的 28 d 收缩率、黏结强度和保水率也明显好于普通水泥砂浆。

(2) 在经历高温耐久性实验后, 土聚物水泥砂浆的抗压强度显著高于普通水泥砂浆。特别是在 800 ℃ 的高温处理后, 土聚物水泥砂浆能够保持高达室温时 61.6% 的抗压强度, 而普通水泥砂

浆则仅保留 25.5% 的抗压强度。

(3) 经 5 次冻融循环后, 土聚物水泥砂浆试件质量变化率及相对动弹性模量的检测结果均好于普通水泥砂浆。

(4) 添加长度为 15 mm 聚丙烯纤维时, 其抗折强度增长率最大, 7、28 d 抗折强度增长率分别为 22.9%、16.7%。添加长度为 12 mm 聚丙烯纤维时, 其抗压强度增长率最大, 7、28 d 抗压强度增长率分别为 12.1%、9.5%。

参考文献:

- [1] 闵永涛, 张勇, 王鹏, 等. 矿物外加剂-中热水泥组合胶凝材料的砂浆基本性能对比[J]. 工程建设, 2024, 56(2): 41-46.
- [2] 徐丽娜, TATENDA K. 地聚物固化软土的工程性能研究进展综述[J]. 四川水泥, 2023(11): 79-81; 166.
- [3] 易鹏, 刘成舟, 邹小平, 等. 阻凝剂在水泥净浆及砂浆中流变性能研究[J]. 江西建材, 2021(7): 40-41; 43.
- [4] 周吉. 偏高岭土基土聚水泥的制备及早期强度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [5] 龚建清, 郭丽, 杨倩, 等. 复掺纳米 SiO_2 和玻璃粉对水泥砂浆性能的影响研究[J]. 公路工程, 2023, 48(4): 121-126; 150.
- [6] 陈庆胜, 庞亚红, 孔龙, 等. 高强锥形中空夹层薄壁钢管混凝土轴压短柱试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(2): 306-316.
- [7] 张潇, 龚俊, 邵永波, 等. 多腔中空薄壁方钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(2): 86-101.
- [8] JIN K Y, ZHOU X H, JI W D, et al. Experimental study of large-scale stiffened thin-walled CFST columns under axial compression [J]. Engineering Structures, 2023, 291(18): 116418.
- [9] DING J N, WANG Q H, REN Q X, et al. Behavior of circular concrete-encased concrete-filled double-skin steel tube stub columns under eccentric compression [J]. Structures, 2024, 69(11): 107493.
- [10] LI B F, WANG X T, XIE C D, et al. Compressive behaviour and design of tapered lightweight concrete-filled double-skin stiffened steel tubular short columns with large hollow ratio [J]. Structures, 2024, 64(6): 106527.
- [11] ALQAWZAI S, YANG B, CHEN K, et al. Testing and strength prediction of polygonal UHPCFST short columns under concentric and eccentric compression [J]. Engineering Structures, 2025, 325(4): 119473.
- [12] 王轩, 杨文秀. T 形钢板仓组合剪力墙的抗震性能有限元分析[J]. 工程建设, 2020, 52(3): 5-12.
- [13] 谢志文, 汪小平, 吴宏睿, 等. 内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 工程建设, 2025, 57(3): 38-43.