

偏高岭土对水泥混凝土短龄期力学强度影响研究

伍彦廷, 陶靖峰, 马文氩*

广东理工学院建设学院, 广东 肇庆

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年10月5日; 发布日期: 2025年10月20日

摘要

为解决普通硅酸盐水泥在大体积混凝土中因水化热高易导致温度裂缝的问题, 本研究探讨了超高活性矿物掺合料偏高岭土对其力学性能的影响。试验采用偏高岭土以0%、5%、10%、15%、20%的质量比例替代水泥, 制备混凝土试件并测试其7 d立方体抗压强度。结果表明, 掺入偏高岭土能提升混凝土的早期强度, 各试验组(MK05, MK10, MK15, MK20)强度较基准组(PC)分别提高了11.98%、20.22%、26.77%和14.50%。其中15%掺量时增强效果最优, 强度达44.14 MPa。强度提升主要归因于偏高岭土的成核效应、火山灰反应和微填充效应。本研究结论为利用偏高岭土配制高性能、低收缩混凝土提供了理论依据和数据支持。

关键词

偏高岭土, 普通硅酸盐水泥, 抗压强度, 矿物掺合料, 力学性能

Study on the Influence of Metakaolin on the Short-Age Mechanical Strength of Cement Concrete

Yanting Wu, Yufeng Tao, Wenyin Ma*

Construction Institute of Guangdong Technology College, Zhaoqing Guangdong

Received: September 15, 2025; accepted: October 5, 2025; published: October 20, 2025

Abstract

To solve the problem of thermal cracks in mass concrete caused by the high heat of hydration of

*通讯作者。

文章引用: 伍彦廷, 陶靖峰, 马文氩. 偏高岭土对水泥混凝土短龄期力学强度影响研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2412-2417. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410260

ordinary Portland cement, this study explores the influence of ultra-highly active mineral admixture metakaolin on its mechanical properties. In the experiment, metakaolin was used to replace cement at mass ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% to prepare concrete specimens, and their 7-day cubic compressive strength was tested. The results show that the incorporation of metakaolin can improve the early strength of concrete. The strength of each experimental group (MK05, MK10, MK15, MK20) increased by 11.98%, 20.22%, 26.77%, and 14.50%, respectively, compared to the reference group (PC). The optimal enhancement effect was achieved at a 15% dosage, with a strength of 44.14 MPa. The improvement in strength is mainly attributed to the nucleation effect, pozzolanic reaction, and micro-filling effect of metakaolin. The conclusions of this study provide a theoretical basis and data support for the preparation of high-performance, low-shrinkage concrete using metakaolin.

Keywords

Metakaolin, Ordinary Portland Cement, Compressive Strength, Mineral Admixture, Mechanical Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国工程建设的迅速发展,水泥基材料的应用领域日益多元化。其中,硅酸盐水泥基材料因其成本较低、强度高及抗冻性好等优点,在各类工程中得到了广泛使用。然而,普通硅酸盐水泥水化热较高,在浇筑大体积混凝土的情况下,会加剧水化温升,不利于控制温度裂缝[1]。大体积混凝土结构中的裂缝控制尤为关键,开裂行为会显著影响混凝土的耐久性能[2] [3]。为此,可采用高活性矿物掺合料以有效降低水化热的不利影响[4]。偏高岭土是一种新型超高活性矿物掺合料,可以通过工业生产获得,并具有与硅灰类似的火山灰活性,应用于混凝土时可以显著提高混凝土强度[5],改善混凝土抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀等耐久性[6]。偏高岭土促进水化反应、加速碳化产物生成以及致密微观结构[7]。偏高岭土在降低混凝土收缩,减少内层镁、硫、氯元素的含量和改善混凝土的氯离子固化能力方面更具优势,因此其在海洋工程混凝土中的应用前景良好[8]-[10]。从作用机理层面分析,若把偏高岭土当作矿物掺合料添加到普通硅酸盐水泥基材料当中,能够使这两种材料的性能优势得以发挥,进而达成混凝土性能全方位提升的效果。

目前,已有较多研究关注偏高岭土对硅酸盐水泥水化热特性的影响[11]-[13],部分研究也探讨了其对水泥砂浆力学性能的改良效果[5] [9]。然而,现有研究多集中于中长期性能或单一掺量效果,对不同掺量偏高岭土在普通硅酸盐水泥混凝土短龄期强度方面的系统性研究尚显不足,尤其在 7 d 龄期内强度发展规律与微观机理关联方面仍有待深入。基于此,本文重点考察不同偏高岭土掺量(0%~20%)对普通硅酸盐水泥混凝土 7 d 抗压强度的影响,旨在明确其增强效果及最优掺量范围,以期对低收缩、高性能混凝土的材料设计提供理论依据与实验支撑。

2. 试验

2.1. 试验材料

偏高岭土由山麟石语有限公司提供,其比表面积为 $1100 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,其偏高岭土成份含量参数,如表 1

所示。本试验采用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5),其性能指标见表 2。粗骨料宜为质地坚硬的碎石,且具有良好的级配、外观粒形和较低的吸水率。依据规范要求和现实情况,本试验采用连续级配良好的碎石,其主要组分为石灰岩,连续粒级为 5 mm~20 mm,表观密度 2720 kg/m³,连续级配松散堆积孔隙率为 44.1%。细骨料应具有级配良好、质地坚硬和颗粒洁净的特质。本试验采用水洗天然河砂,颗粒级配良好的 3 区细砂,细度模数 2.2,表观密度为 2680 kg/m³,堆积密度为 1520 kg/m³,空隙率为 41%。依据《公路桥涵施工技术规范》(JTGT 3650-2020) [14],本试验采用实验室的普通自来水。

Table 1. Composition parameters of metakaolin
表 1. 偏高岭土成份含量参数

项目	IL (灼碱)	Al ₂ O ₃ (三氧化二铝)	SiO ₂ (二氧化硅)	Fe ₂ O ₃ (三氧化二铁)	CaO (氧化钙)	MgO (氧化镁)	K ₂ O (氧化钾)	Na ₂ O (氧化钠)	TiO ₂ (二氧化钛)
含量%	0.41	45.03	52.14	0.48	0.13	0.15	0.14	0.06	1.16

Table 2. Comparison of test results for cement physical performance indicators
表 2. 水泥物理性能指标试验结果对比

编号	水泥品种	强度等级	抗压强度(MPa)		抗折强度(MPa)		安定性(mm)	细度(%)
			3d	28d	3d	28d		
安徽宣城海螺有限公司	P·O	42.5	26.6	50.4	5.5	8.2	2.8	6.5
			≥17.0	≥26.6	≥3.5	≥6.5	≤5.0	≥5.0

2.2. 试验方案

为更客观有效地完成本次试验,并实现预期的试验目标,依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011) [15],确定本试验的水灰比为 0.49,砂率为 40%,并进行了基准混凝土配合比的计算,确定了基准混凝土设计配合比,以偏高岭土取代量(MK 等质量取代硅酸盐水泥的百分数)为 0、5%、10%、15%、20%,制作尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,混凝土配合比设计,以不同取代量分组,连同基准组(PC)共设计 5 组试件,如表 3 所示。24 h 后拆模。在标准养护条件下进行养护,分别测试 7 d 短龄期时的抗压强度。

Table 3. Design mix proportion of metakaolin concrete (kg/m³)
表 3. 偏高岭土混凝土设计配合比(kg/m³)

组别编号	偏高岭土代替量	硅酸盐水泥	水	碎石	砂
PC	0	455.1	233	1010.6	674
MK05	22.8	432.3	233	1010.6	674
MK10	45.5	410	233	1010.6	674
MK15	68.3	386.8	233	1010.6	674
MK20	91.2	365.1	233	1010.6	674

2.3. 试验方法

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2019) [16],采用 WHY-3000 型压力试验机,对边长为 100 mm 的非标准立方体试件进行抗压强度试验。每组工况制备 3 个 C40 混凝土试件,总计 30 个。加载速率控制为 5 kN/s,直至试件破坏,记录破坏荷载值。试验后,按公式 $f_{cu} = F/A$ 计算单块试件

抗压强度,再取同组 3 个试件平均值,并乘以尺寸换算系数 0.95,作为该组混凝土的立方体抗压强度值。

3. 试验分析

本文制作了 5 组不同类型的混凝土试件,其中 PC 为素混凝土,作为对照组。

MK05、MK10、MK15 和 MK20 代表偏高岭土混凝土。混凝土立方体抗压强度的试验结果如下表 4、图 1 所示。

Table 4. Cube compressive strength of metakaolin concrete

表 4. 偏高岭土混凝土的立方体抗压强度

试件编号	承压面积 A (mm ²)	破坏荷载(KN)	平均破坏荷载(KN)	立方体抗压强度值(MPa)	备注
PC	100*100	347.65	348.22	34.82	
PC	100*100	348.50			
PC	100*100	348.50			
MK05	100*100	387.51	389.87	38.99	
MK05	100*100	388.77			
MK05	100*100	393.33			
MK10	100*100	416.15	418.59	41.86	
MK10	100*100	418.36			
MK10	100*100	421.25			
MK15	100*100	429.58	441.35	44.14	
MK15	100*100	434.93			
MK15	100*100	459.55			
MK20	100*100	395.54	398.72	39.87	
MK20	100*100	400.31			
MK20	100*100	400.31			

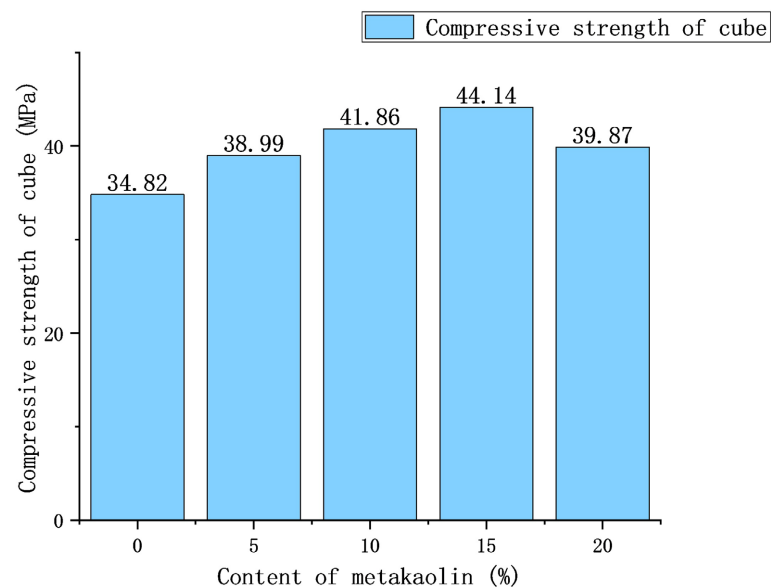


Figure 1. Compressive strength of cube

图 1. 立方体抗压强度

所示为试验测得的素混凝土和偏高岭土混凝土立方体抗压强度。结果表明,不同的偏高岭土掺量均会在一定程度上影响混凝土立方体抗压强度。通过每组三个试样取平均值,PC、MK05、MK10、MK15和MK20的立方体抗压强度分别34.82 MPa、38.99 MPa、41.86 MPa、44.14 MPa、和39.87 MPa。MK05、MK10、MK15和MK20相对于基准组分别提升11.98%、20.22%、26.77%和14.50%。偏高岭土能够提升普通硅酸盐水泥砂浆的强度,主要机制包括其成核效应、火山灰反应以及微集料填充作用[5]。其中,火山灰效应与颗粒成核作用可激发并加速水泥的水化过程,进而有利于强度增长。此外,由于偏高岭土颗粒远细于水泥颗粒,它能够有效填充水泥颗粒间的空隙,增强浆体结构的密实程度,从而提高砂浆强度。然而,当偏高岭土掺量过高时,会相应减少水泥的用量,同时因其比表面积较大致使需水量明显增加,这些因素均可能损害混凝土的密实性,最终导致强度性能下降。

4. 结论

偏高岭土掺入可显著提升普通硅酸盐水泥混凝土的早期抗压强度,研究取得结论如下:

1) 以5%、10%、15%、20%的偏高岭土等质量替代水泥后,混凝土7天立方体抗压强度较基准组(PC)分别提高了11.98%、20.22%、26.77%和14.50%。其中,15%掺量(MK15组)的提升效果最为显著,强度达到44.14 MPa。试验表明,适量偏高岭土的掺入可通过成核效应、火山灰反应和微集料填充效应促进水泥水化,提高混凝土密实性,从而增强其力学性能。

2) 偏高岭土掺量存在最优范围,过量掺入可能导致强度下降。当偏高岭土掺量达到20%时,混凝土抗压强度虽仍高于基准组,但较MK15组出现明显下降。过量掺量会减少水泥用量,削弱胶凝体系的主体水化反应;同时偏高岭土的高比表面积会增加需水量,影响混凝土的工作性和密实性,从而导致强度增长受限甚至回落。

因此,在实际应用中需控制偏高岭土的掺量在适宜范围内(如10%~15%),以兼顾强度提升与经济性。

基金项目

广东理工院校级科研基金一般项目(项目编号:2025YBZK014)。

参考文献

- [1] 王巍,周乐,赵同峰,等. 偏高岭土改性硅酸盐水泥基材料的性能[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2025, 37(3): 248-255.
- [2] 郑旭恒,胡昱,王亚军,等. 低热硅酸盐水泥设计的大体积海工混凝土的水化热、耐久性、抗裂性[J]. 混凝土, 2025(6): 219-223.
- [3] 杨新浩,张凌云,董军,等. 承台现浇大体积混凝土温度效应及影响参数分析[J]. 混凝土, 2025(3): 12-19, 23.
- [4] 卫煜,陈平,明阳,等. 超细高活性矿物掺合料对UHPC水化和收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 461-468.
- [5] 曾俊杰,王胜年,熊建波,等. 偏高岭土对低热硅酸盐水泥水化性能的影响[J]. 混凝土, 2020(5): 69-72.
- [6] 赵顺波,朱瑞丰,党钧陶,等. 再生砖细骨料混凝土抗氯离子渗透性能与孔结构的灰色关联分析[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(4): 323-329.
- [7] 温小栋,季启龙,冯蕾,等. 偏高岭土对再生水泥碳化反应活性的影响及其机理[J/OL]. 硅酸盐学报: 1-17. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20250380>, 2025-10-13.
- [8] 刘园圆,周琴,黄诗雨,等. 海水侵蚀对偏高岭土水泥基材料性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(7): 135-139.
- [9] 莫宗云,高小建. 偏高岭土混合水泥水化研究进展[J]. 混凝土, 2017(6): 80-84.
- [10] 盖珂瑜. 不同成因高岭土热活化特性比较研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [11] 张济林. 偏高岭土与阿嘎土对水泥基材料力学性能与水化影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.

-
- [12] 赵宇龙. 纳米偏高岭土——粉煤灰水泥砂浆电化学阻抗谱试验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2024.
- [13] 郝括. 偏高岭土对磷酸镁水泥耐高温性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. JTG T 3650-2020 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.