

粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的性能分析

Performance Analysis of Fly Ash Composite Low Heat Portland Cement Concrete

何 蕾

(首都医科大学附属北京友谊医院, 北京 100050)

摘 要: 为提升低热硅酸盐水泥混凝土强度和抗裂性, 制备粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土, 测试抗压与抗折强度、热力学特性以及不同应用环境下的抗裂性。结果表明: 粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土抗压强度平均值达 53.33 MPa, 抗折强度平均值为 4.67 MPa, 优于低热硅酸盐水泥混凝土; 粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土放热速率、放热量及绝热温升均低于低热硅酸盐水泥混凝土, 且在 25℃ 恒温恒湿、35℃ 恒温恒湿、35℃ 恒温 + 持续风速 10 m/s 三种应用环境下抗裂性更优。粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土可显著改善水化热性能并抑制开裂, 适用于大体积混凝土等温控严格的工程领域。

关键词: 粉煤灰复合低热硅酸盐水泥; 热力学; 抗裂性

中图分类号: TV41

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0057-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.011

HE Lei

(Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China)

Abstract: To improve the strength and crack resistance of low heat Portland cement concrete, fly ash composite low heat Portland cement concrete was prepared, and the compressive and flexural strength, thermodynamic properties, and crack resistance under different application environments were tested. The results show that the average compressive strength of fly ash composite low heat Portland cement concrete is 53.33 MPa, and the average flexural strength is 4.67 MPa, which is better than low heat Portland cement concrete; The heat release rate, heat release, and adiabatic temperature rise of fly ash composite low heat Portland cement concrete are lower than those of low heat Portland cement concrete, and the crack resistance is better in three application environments: constant temperature and humidity at 25 °C, constant temperature and humidity at 35 °C, and constant temperature and continuous wind speed at 35 °C + 10 m/s. Therefore, fly ash composite low heat Portland cement concrete can significantly improve its hydration heat performance and suppress cracking, making it suitable for engineering fields with strict temperature control such as large volume concrete.

Key words: fly ash composite low heat portland cement; thermodynamics; crack resistance

0 引言

低热硅酸盐水泥凭借其水化热较低的特性, 在大体积混凝土工程领域得到了广泛的应用。然而, 随着工程实践的不断深入以及对工程质量要求的日益提高, 强度较低成为制约其在一些对力学性能要求较高工程应用的关键因素, 难以满足结构长期承载和抵抗外力的需求^[1]。同时, 尽管其水化热相对

材料科学

较低,但在复杂的施工环境和多变的气候条件下,温度应力仍可能导致混凝土内部产生裂缝^[2],进而影响结构的耐久性和安全性,给工程带来潜在的质量隐患。

众多学者通过不同方法优化低热水泥混凝土性能并拓展应用领域。WANG 等^[3]发现高海拔低气压变温会使低热水泥水化产物转化及 C-S-H 的 Ca/Si 比改变,影响其力学性能。Saito 等^[4]经阻抗谱分析揭示,水泥水化时电阻率先降后升,不同水灰比下介电常数变化规律相反且与水化反应和电离过程直接相关。李书明等^[5]对比球磨法与冲击粉磨法对水泥性能的影响,证实冲击粉磨能显著提高水泥材料抗裂性。郭寅川等^[6]掺入玻璃纤维,有效改善了水泥稳定碎石的收缩及抗裂性能。樊启祥等^[7]以白鹤滩水电站大坝混凝土为例,对比低热与中热硅酸盐水泥混凝土热、力学特性,得出低热水泥抗裂性能更优的结论。方周等^[8]用高分子减缩密实剂改性水泥提升混凝土抗裂与力学性能,相关研究多维度优化硅酸盐水泥性能,助力建材可持续发展及应用拓展。韩旭等^[9]利用热力学方法与软件揭示废树脂辐解气体对普通硅酸盐水泥矿物相演变及体积变化的影响机制,为水泥固化体安全评价提供依据。吴航通等^[10]通过有限元仿真对比白鹤滩大坝关键时段两种水泥混凝土热力学性能,发现低热水泥抗裂安全系数更高且温控防裂重点在二期冷却末。宁全纪等^[11]用等温量热仪测试分析低热和中热水泥水化过程,经模型模拟发现低热水泥前期水化速率慢、程度低,且水灰比越大最终放热量越高。汤昊源等^[12]通过浸泡试验与热力学模拟,阐明粉煤灰和粒化高炉矿渣粉对硅酸盐水泥氯离子结合能力及物相含量的调控机制,揭示二者协同增强吸附的效应。张涛等^[13]研究证实矿渣微粉通过化学结合、物理吸附及优化孔隙结构提升水泥基材料抗侵蚀力,30% 掺量时综合性能最佳。宫经纬等^[14]运用电阻率与 ζ -电位测试技术,发现低热硅酸盐水泥早期 Ca^{2+} 溶出快、AFt 形成早,且水化产物填充孔隙使减速期结构密实速率稍缓。Zemri 等^[15]通过高温加热冷却循环试验,证实矿渣水泥高温后耐久性优于波特兰水泥,并建立了孔隙率与扩散系数的经验关系。

上述研究深化了对水泥混凝土性能优化与功能

拓展的认知。为进一步优化低热硅酸盐水泥混凝土的性能,在低热硅酸盐水泥中增加粉煤灰制备粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土,测试粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的力学性能、热力学特性以及在不同应用环境下的抗裂性能,为其推广应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 材料

试验原材料化学组成见表 1。

表 1 原材料化学组成							
Table 1 Chemical composition of raw materials							
材料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	其他
低热硅酸盐水泥	21.5	5.2	3.1	62.3	2.8	1.2	3.9
粉煤灰	52.0	28.5	6.0	3.0	1.5	0.5	8.5
硅灰	85.0	1.0	0.5	2.0	0.5	0.1	10.9
石灰石	0.5	0.2	0.1	54.0	0.8	0.1	44.3
花岗岩	72.0	14.0	5.0	3.0	2.0	0.5	3.5
河砂	75.0	10.0	5.0	5.0	1.0	0.1	3.9

1.2 试件制备

制备试验所用的粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土和低热硅酸盐水泥混凝土,具体配合比见表 2。制备时,先将低热硅酸盐水泥、粉煤灰、硅灰及按比例称好的石灰石、花岗岩、河砂倒入搅拌机,干拌 8 min;再将减水剂、引气剂与水混合均匀后加入,继续搅拌 10 min,期间监测和易性,控制坍落度 ≤ 45 mm。搅拌结束后,将混凝土浆料倒入涂刷丙酮的 150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm 模具中,抹平多余浆料后振捣排气,随后室温静置 2 d 拆模并标记试件,最后置于 (20 $\pm$ 2) $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护箱中养护 28 d。

表 2 配合比								
Table 2 Mix proportion								
编号	水泥	粉煤灰	硅灰	石灰石	花岗岩	河砂	水	减水剂
1	350			400	600	750	180	7.5
2	210	125	15	400	600	750	180	7.5

1.3 试验方法

围绕粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土开展一系列试验,以探究其性能,具体试验内容及方法如下:

(1) 抗压与抗折强度试验 抗压强度试验以 0.5~1.0 MPa/s 加荷至破坏并记录荷载。抗折强度试验以 0.05~0.08 MPa/s 加荷至破坏并记录荷载。

(2) 不同混凝土的热力学特性试验 将2种混凝土试块置于绝热环境,监测内部温度变化并分析其放热速率、放热量和绝热温升。

(3) 应用环境对抗裂性的影响试验 设置25℃恒温恒湿(环境1)、35℃恒温恒湿(环境2)、35℃恒温+10 m/s风速(环境3)3组条件,通过万能试验机施加荷载,观察不同环境下试件开裂行为。

2 结果与分析

2.1 抗压与抗折强度试验结果

试件抗压强度和抗折强度试验结果见表3。在抗压强度测试中,粉煤灰复合水泥混凝土3个试件的破坏荷载均高于低热硅酸盐水泥混凝土,其抗压强度算术平均值达53.33 MPa,较低热硅酸盐水泥混凝土的48.45 MPa提升约10.1%。尽管低热硅酸盐水泥混凝土的最大值与中间值、最小值与中间值的差值百分比更小,为1.82%~4.54%,表明其数据离散性略低,但整体强度水平仍显著低于粉煤灰复合体系,且粉煤灰复合水泥混凝土的差值百分比控制在4.16%~4.18%,满足规范要求。抗折强度方面,粉煤灰复合水泥混凝土同样表现优异,其平均抗折强度为4.67 MPa,较低热硅酸盐水泥混凝土的3.95 MPa提高18.2%,尽管粉煤灰复合水泥混凝土的强度离散性略大,差值百分比为8.56%~8.57%,而低热硅酸盐水泥混凝土为3.25%~6.75%,但二者均符合规范要求,且粉煤灰复合水泥混凝土仍保持更高强度水平,进一步验证了粉煤灰的掺入对混凝土抗裂性和韧性的显著增强作用。这是因为粉煤灰的加入通过火山灰效应和微集料效应显著提升了混凝土性能:火山

表3 抗压强度和抗折强度试验结果

Table 3 Results of compressive strength and flexural strength tests					
混凝土类型		抗压强度试验		抗折强度试验	
		破坏荷载 /kN	抗压强度 /MPa	破坏荷载 /kN	抗折强度 /MPa
粉煤灰复合低 热硅酸盐水泥 混凝土	试件1	1200	53.33	3.5	4.67
	试件2	1150	51.11	3.2	4.27
	试件3	1250	55.56	3.8	5.07
低热硅酸盐水 泥混凝土	试件1	1100	48.89	3.0	4.0
	试件2	1050	46.67	2.8	3.73
	试件3	1120	49.78	3.1	4.13

灰效应使粉煤灰中的活性成分与水泥水化产物发生二次反应,生成更多胶凝性物质填充孔隙;微集料效应则优化了颗粒级配,减少空隙率,从而共同增强了混凝土的密实性和力学性能。

2.2 热力学特性分析

将试件置于绝热环境,监测内部温度变化并计算绝热温升值,分析水化热差异。试验结果如图1所示。

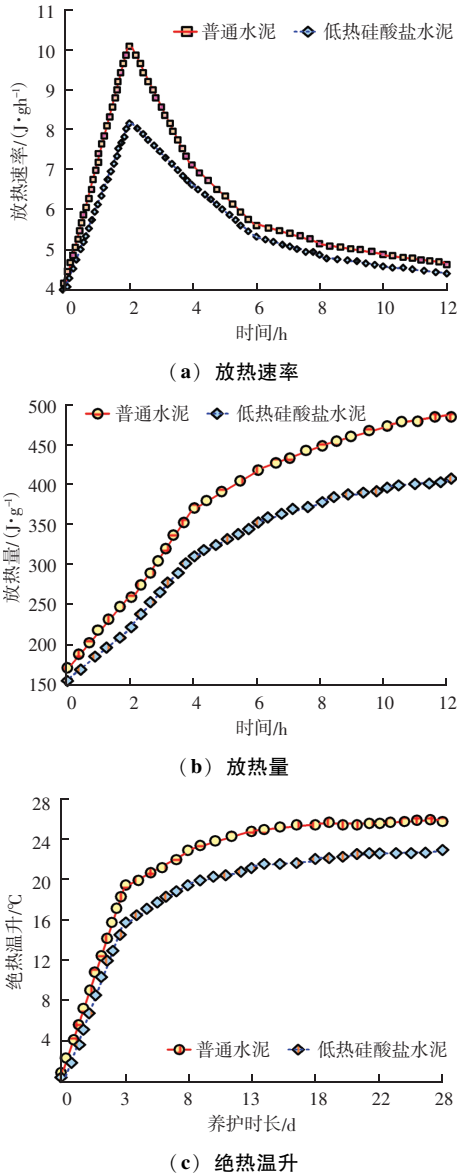


图1 不同水泥热力学特性分析结果
Fig.1 Analysis results of different cement thermodynamic characteristics

由图1(a)可知,粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的放热速率明显低于低热硅酸盐水泥混凝土,且随着时间增加,两种混凝土的放热速率均呈现出

材料科学

先升高后降低的变化趋势。在水化初期,低热硅酸盐水泥混凝土因水泥颗粒表面与水充分接触,水化反应迅速启动,大量水化产物快速生成并释放热量,放热速率快速升高;而粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土中,粉煤灰的火山灰效应和微集料效应延缓了水泥的水化进程,使得其放热速率上升较为平缓。随着水化反应的深入,可反应的水泥熟料逐渐减少,水化产物逐渐增多并填充孔隙,阻碍了水与水泥颗粒的进一步接触,两种混凝土的反应速率均逐渐降低,放热速率也随之逐渐降低,这是水泥水化反应内在的动力学特性所决定的,但粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土在整个水化过程中放热速率始终保持较低水平,有利于减少因温度应力导致的混凝土开裂风险,提高混凝土的耐久性。综上可知,粉煤灰的掺入显著优化了混凝土的水化放热行为。

由图1(b)可知,粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土放热总量明显低于低热硅酸盐水泥混凝土,且随着反应时间的增加,放热总量先迅速上升后逐渐稳定。低热硅酸盐水泥混凝土在混合初期,水泥颗粒表面活性成分迅速与水反应,放热量快速增加并达到较高水平;而粉煤灰复合体系中,由于粉煤灰的掺入,其矿物成分水化速度相对较慢,且粉煤灰中的活性成分需一定时间才能逐渐参与水化反应,这使得其初始放热速率和总量均低于低热硅酸盐水泥混凝土。随着水化反应推进,低热硅酸盐水泥混凝土反应速度再次加快,放热量增加并在较短时间内达到最大值;粉煤灰复合体系则因反应速率相对平稳,放热量增加较为缓慢。最终,两种混凝土水化反应均趋于稳定,放热量减少到很低水平。整体来看,粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的水化放热过程更为平缓,放热量更低,这有利于减少混凝土因温度变化产生的应力,降低开裂风险,提高混凝土的体积稳定性和耐久性。

由图1(c)可知,粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的绝热温升也显著低于低热硅酸盐水泥混凝土,随着养护时间的增加,绝热温升先升高后稳定。在水化反应初期,低热硅酸盐水泥混凝土因易水化矿物快速反应,释放大量热量,且内部热量散失少,绝热温升迅速增加;而粉煤灰复合体系中,由于粉煤灰的掺入,整体水化反应速度减缓,单位时间内

释放热量减少,这是其绝热温升较低的关键因素。同时,粉煤灰的掺入改善了低热硅酸盐水泥混凝土的孔隙结构,增强了热量传导和散失能力,进一步抑制了温度快速上升。随着时间推移,两种混凝土的水化反应逐渐趋于稳定,绝热温升也趋于稳定,但粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土始终保持着较低的绝热温升水平,这对于减少混凝土因温度应力引起的开裂、提高结构的耐久性和稳定性具有重要意义。

2.3 抗裂性分析

抗裂性测试结果如图2所示。

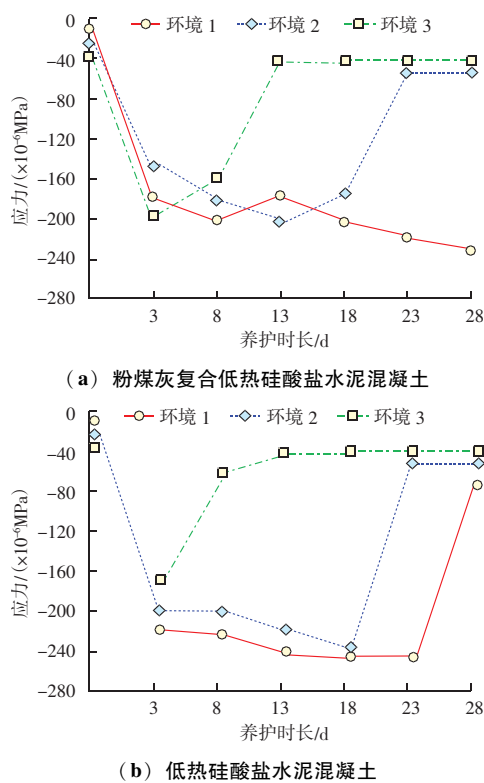


图2 抗裂性测试结果

Fig. 2 Crack resistance test results

试块应力骤升表明出现裂缝。试验中,环境3试块因长期处于高温干燥环境,高温加速水泥水化,干燥使水分快速蒸发,而水分对水泥水化和结构形成至关重要,其快速散失阻碍了内部结构形成,加剧自干燥效应,导致严重早期自收缩,仅加载2 h就开裂。环境2试块处于高温高湿环境,内部水分蒸发快,虽外部高湿能补充表面水分,但内部湿度仍降低,孔隙结构异常、压力增大,长期加载后内部结构破坏开裂。环境1试块在恒温恒湿环境,温度和湿

度适宜,水泥水化平稳,水分充足稳定,利于结构均匀密实发展,加载时未开裂。对比图 2 (a) 和图 2 (b) 可知,粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土在相同环境下更不易出现开裂裂缝,这是由于粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土具有低水化热特点,低水化热使得水泥在水化过程中释放的热量较少,试件在凝固过程中的温度升高幅度较小。温度变化是引起混凝土内部热应力的主要因素之一,较小的温度变化减少了因温度变化引起的内部应力。同时,粉煤灰的掺入优化了混凝土的颗粒级配,填充了部分孔隙,提高了混凝土的密实度和抗变形能力,进一步增强了其抗裂性能,所以更不易发生开裂变化。

3 结论

通过试验研究,对比粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土与低热硅酸盐水泥混凝土在力学性能、热力学特性以及抗裂性等方面的表现,得出了以下结论:

(1) 粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的抗压强度和抗折强度均高于低热硅酸盐水泥混凝土。粉煤灰的火山灰反应和微集料填充作用提升了材料的力学性能。

(2) 粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土表现出更低的水化放热速率和更平缓的绝热温升曲线,其总放热量显著减少。粉煤灰的缓凝作用延缓了水化进程,同时其自身低放热特性降低了体系总热输出,加之微观结构优化带来的热量扩散能力提升,共同实现了温控性能的优化。

(3) 在不同应用环境下,粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土展现出更好的抗裂性。在高温干燥、高温高湿以及恒温恒湿等不同环境中,相较于低热硅酸盐水泥混凝土,其在相同条件下更不易出现开裂裂缝。

参 考 文 献

- [1] 王文富,周选,彭涛,等. 低热水泥掺量对混凝土绝热温升的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 6-10.
- [2] GOYAL R, VERMA V K, SINGH N B. Hydration behavior of Portland pozzolana cement in the presence of nano-silica [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9 (7): 1-20.
- [3] WANG N, LIU Q, XIA Y, et al. Physical properties and hydration characteristics of low-heat portland cement at high-altitude [J]. Materials, 2023, 16 (8): 3110.
- [4] SAITO A, OKAMOTO T, ERIGUCHI A, et al. Fundamental study on the evaluation of the mortar curing process by impedance analysis [J]. Cement Science and Concrete Technology, 2023, 76 (1): 138-144.
- [5] 李书明,邓青山,谢永江,等. 硅酸盐水泥熟料研磨方式对水泥性能和混凝土抗裂性能的影响 [J]. 铁道建筑, 2024, 64 (1): 132-135.
- [6] 郭寅川,刘逸伟,申爱琴,等. 玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2023, 44 (5): 114-120.
- [7] 樊启祥,杨华全,李文伟,等. 两种低热与中热硅酸盐水泥混凝土热力学特性对比分析 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (12): 133-137.
- [8] 方周,余剑英. 高分子减缩密实剂对水泥基材料性能影响研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46 (2): 28-35.
- [9] 韩旭,闫晓俊,郭喜良,等. 废树脂辐解气体对普通硅酸盐水泥矿物成分影响的热力学分析 [J]. 原子能科学技术, 2023, 57 (7): 1321-1329.
- [10] 吴航通,郭传科,徐建荣,等. 拱坝低热水泥混凝土抗裂效果仿真 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (5): 76-80, 88.
- [11] 宁全纪,陈阳杰,曹园章,等. 低热硅酸盐水泥早期水化热动力学研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (8): 44-51, 69.
- [12] 汤昊源,左晓宝,邹欲晓,等. 矿物掺合料对硅酸盐水泥净浆氯离子结合能力的影响 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (6): 571-578.
- [13] 张涛,王腾,张琰,等. 矿渣微粉对水泥净浆性能及氯离子固化作用的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (9): 3240-3247.
- [14] 宫经纬,谢刚川,秦灿,等. 基于电阻率和 ζ -电位法的低热硅酸盐水泥早期水化特性 [J]. 材料导报, 2023, 37 (4): 102-110.
- [15] ZEMRI C, BOUIADJRA M B. Thermal impact on the physical and transfer properties of slag cement and portland cement concretes [J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2023, 47 (6): 371.