

低热水泥掺量对混凝土绝热温升的影响*

Influence of Low-heat Cement Content on Adiabatic Temperature Rise of Concrete

王文富^{1,2}, 周选^{1,2}, 彭涛^{1,2}, 李牧^{1,2}, 李春毅^{1,2}

(1. 中建铁路投资建设集团有限公司, 江西 南昌 330038;

2. 中国建筑第三工程局有限公司, 江西 南昌 330038)

摘要: 随着低热水泥在大体积混凝土中广泛应用, 需进一步优化低热混凝土绝热温升性能, 降低大体积混凝土的开裂风险。通过调整低热水泥掺量并结合混凝土力学性能和热学试验, 研究了 3 种水泥掺量对混凝土绝热温升及其他热学与力学性能的影响。结果表明: 低热水泥掺量对混凝土绝热温升的影响较为显著, 与使用水泥掺量为 450 kg/m^3 的混凝土相比, 水泥掺量为 500 kg/m^3 的混凝土 28 d 时最终温度增长 23.7%; 水泥掺量对低热水泥混凝土热学、力学性能的影响有限, 采用高水泥掺量时可获得相对优异的力学性能, 相较于水泥掺量为 450 kg/m^3 的混凝土, 500 kg/m^3 时导热系数和线膨胀系数方面有所提升, 分别提高 10.4%、1.9%, 但比热方面略有降低, 降幅约为 2.3%。

关键词: 胶凝材料掺量; 低热水泥; 混凝土; 绝热温升; 热学性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0006-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.002

WANG Wenfu^{1,2}, ZHOU Xuan^{1,2}, PENG Tao^{1,2}, LI Mu^{1,2}, LI Chunyi^{1,2}

(1. China State Construction Railway Investment & Engineering Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China;

2. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: As low-heat cement is widely used in mass concrete, it is necessary to further optimize the adiabatic temperature rise performance of low-heat concrete to reduce the risk of cracking in mass concrete. By adjusting the content of low-heat cement and combining concrete mechanical and thermal tests, the study investigated the impact of three cement contents on the adiabatic temperature rise and other thermal and mechanical properties of concrete. The results indicate that the content of low-heat cement has a significant effect on the adiabatic temperature rise of concrete. Compared with concrete with a cement content of 450 kg/m^3 , the final temperature increase of concrete with a cement content of 500 kg/m^3 at 28 days is 23.7% higher. The impact of cement content on the thermal and mechanical properties of low-heat cement concrete is limited. Using a higher cement content can achieve relatively superior mechanical properties. Compared with concrete with a cement content of 450 kg/m^3 , the thermal conductivity and linear expansion coefficient are improved by 10.4% and 1.9%, respectively, when the cement content is 500 kg/m^3 , but the specific heat capacity is slightly reduced, with a decrease of about 2.3%.

Keywords: cementitious material content; low-heat cement; concrete; adiabatic temperature rise; thermal property

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51808351); 辽宁省应用基础研究计划 (2022JH2/101300130)。

作者简介: 王文富 (1973—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 建筑材料。

收稿日期: 2023-11-09

0 引言

近年来,随着国民经济快速发展,大体积混凝土结构得到广泛应用。而对于大体积混凝土而言,混凝土的热演化尤为重要^[1],随着水泥浆体的水化热在混凝土内部积累,温度很容易达到 50~70℃^[2],较低的导热系数使得混凝土内外产生较大温差,由此产生的温度应力极易造成大体积混凝土开裂^[3],影响结构耐久性与正常使用。因此,为保证大体积混凝土的可靠性以及安全性,如何控制温升已成为研究重点。

降低大体积混凝土温升的方法较多,一般而言,使用低热水泥^[4]和辅助胶凝材料^[5],或者通过某些冷却方法(如管道预冷方法或材料预冷方法)^[6],可以减少大体积混凝土发热。其中,采用低热水泥被认为是最简单有效的方法。低热水泥因水化热低、抗裂性好等特点,近年来备受学者青睐,Wang 等^[7]研究发现,相较于普通混凝土,低热水泥混凝土的水化热降低约 15.3%~18.1%,绝热温升降低约 4~6℃;陈改新等^[8]发现低热水泥的早期温降作用明显,可有效削弱 3~5 d 左右出现的最大温升值;Wang 等^[9]发现硅粉可有效缩短诱导期并加速低热水泥水化,同时低热水泥累计水化热随着硅粉掺量的增加而增加;康雪彤等^[4]通过试验发现,同等胶凝材料掺量下,随着粉煤灰掺量的增加,低热水泥混凝土放热速率下降,绝热温升降低。然而,目前对低热水泥混凝土温升性能的研究依然相对较少,其中关于水泥掺量方面的研究更是有限,数据较少。由于水泥掺量是影响混凝土绝热温升的重要因素^[10],通过调整水泥掺量可优化混凝土性能。在过去几十年中,Ng、Zhu 和 De Matos 等^[11-13]较为系统地探究了水泥掺量对普通水泥混凝土绝热温升的影响,发现水泥掺量与绝热温升的最大值呈线性关系。

基于此,调整水泥掺量,通过热学、力学性能试验和绝热温升试验,研究混凝土在绝热状态下的温升及其他热学与力学性能。

1 原材料与配合比

1.1 原材料

水泥采用 P·SLH 32.5 低热矿渣硅酸盐水泥,

物理性质见表 1;采用 F 类 I 级粉煤灰;骨料:母岩为花岗岩,细骨料细度模数为 2.64,粗骨料为 5~20 mm 和 20~40 mm 两种粒级;外加剂为 PCA-I 缓凝型高效减水剂和 GYQ-1 引气剂。

1.2 混凝土配合比

混凝土配合比见表 2,选取水泥掺量分别为 450、475 和 500 kg/m³,混凝土水胶比和砂率恒定为 0.45 和 40%,胶凝材料由 70% 的水泥、25% 的粉煤灰和 5% 的硅粉组成,粗骨料中小石 5~20 mm 粒径与大石 20~40 mm 粒径的比例采用 45:55。

表 1 水泥的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

比表面积 /(m ² /kg)	标准稠 度/%	体积 安定性	抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa		水化热 /(kJ/kg)	
			7 d	28 d	7 d	28 d	3 d	7 d
344	27.0	合格	16.3	39.1	4.1	7.4	179	204

表 2 混凝土的配合比

Table 2 Mix proportion of concrete / (kg/m³)

样本号	水	水泥	粉煤灰	硅粉	细骨料	粗骨料		减水剂	引气剂
						小石	大石		
LC-450	203	315	113	22.50	709	479	585	4.73	0.034
LC-475	214	333	119	23.75	695	469	574	4.98	0.055
LC-500	225	350	125	25.00	671	453	554	5.25	0.047

1.3 试验内容

根据 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》^[14]进行坍落度试验、表观密度试验、含气量试验、抗压强度试验、弹性模量试验、导热系数试验、比热试验、线膨胀系数试验和绝热温升试验。抗压强度试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 立方体;弹性模量试件尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体;导热系数和比热试件尺寸均为 φ200 mm×400 mm 圆柱体(中心贯穿 φ40 mm×400 mm);线膨胀系数试件尺寸为 φ200 mm×500 mm 圆柱体;绝热温升试件尺寸为 φ400 mm×400 mm 圆柱体。

2 试验结果与分析

2.1 拌合物性能

混凝土的基本参数见表 3。所有混凝土的表观密度约为 2 370 kg/m³,含气量为 (4.0±0.5)%。不同配合比的混凝土和易性差异不大,坍落度处于 150~160 mm 内,为流动性混凝土。

材料科学

表3 混凝土参数

Table 3 Performance of concrete

混合名称	密度/(kg/m ³)	坍落度/mm	含气量/%
LC-450	2 380	155	4.2
LC-475	2 360	155	3.5
LC-500	2 380	160	3.6

2.2 抗压强度

胶凝材料掺量对混凝土抗压强度的影响如图1所示。胶凝材料掺量增加显著提高了混凝土抗压强度。以胶凝材料掺量为450 kg/m³的混凝土抗压强度为基准,胶凝材料掺量为475 kg/m³的混凝土,7、28、90、180 d时抗压强度分别提高9.5%、13.3%、6.9%、4.5%,胶凝材料掺量为500 kg/m³时混凝土抗压强度分别提高23.7%、23.9%、12.1%、9.7%。这可能是由于随着胶凝材料掺量的增加,可产生更多的C-S-H凝胶,改善水泥浆与骨料界面过渡区的粘结,并通过填充基体和骨料之间的空隙,优化孔隙结构,来进一步提高混凝土强度。该结果表明,胶凝材料掺量是影响抗压强度的重要因素,且随着胶凝材料掺量的增加,强度提升效果显著。

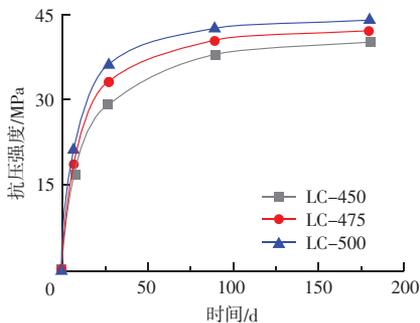


图1 胶凝材料掺量对抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of cementitious material content on compressive strength

2.3 弹性模量

弹性模量是衡量混凝土性能的一个重要参数,它决定了混凝土结构的弯曲和抗压刚度大小,影响了结构抵御变形的能力。胶凝材料掺量对混凝土弹性模量的影响如图2所示。可以看出,胶凝材料掺量对混凝土的弹性模量影响较小,与基准混凝土相比,胶凝材料掺量为475 kg/m³的混凝土,28、90 d时弹性模量分别提高1.7%、0.8%,胶凝材料掺量为500 kg/m³时分别提高3.5%、2.6%。该结果表明,胶凝材料对弹性模量的增益效果并不明显,并不会显著增加混凝土的刚度。

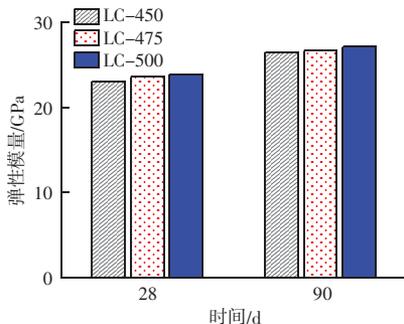


图2 胶凝材料掺量对弹性模量的影响

Fig. 2 Effect of cementitious material content on elastic modulus

2.4 导热系数

导热系数是反映混凝土热量传递能力的一项指标,导热系数较大时有利于混凝土的散热^[15]。图3为胶凝材料掺量对低热水泥混凝土导热系数的影响。胶凝材料掺量对混凝土的导热系数有一定影响,导热系数随着胶凝材料掺量的增加而降低。与基准混凝土相比,28 d时胶凝材料掺量为475 kg/m³的混凝土导热系数提高7.0%,胶凝材料掺量为500 kg/m³时混凝土导热系数提高10.4%。这主要是由于空气的导热系数远小于骨料浆体,而随着胶凝材料掺量的增加,通过填充浆体和骨料之间的空隙,优化了孔隙结构,使得孔隙中的空气含量减少,从而导致混凝土的导热系数增加。该结果表明,胶凝材料掺量是影响导热系数的重要因素,并且随着胶凝材料掺量的增加,热扩散速度提高。

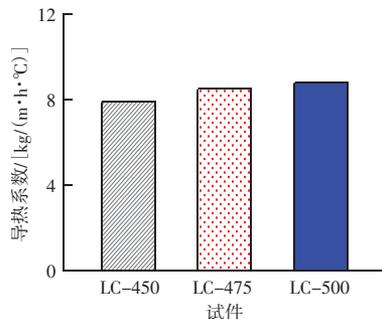


图3 胶凝材料掺量对导热系数的影响(28 d)

Fig. 3 Effect of cementitious material content on thermal conductivity (28 d)

2.5 比热

图4为胶凝材料掺量对混凝土比热的影响。胶凝材料掺量对低热水泥混凝土比热的影响有限。与基准混凝土相比,胶凝材料掺量为475 kg/m³的混凝土,28 d时比热降低1.2%,胶凝材料掺量为500 kg/m³时混凝土比热降低2.3%。这主要是由于

混凝土的比热与密度成反比,而随着胶凝材料掺量的增加,混凝土的密实度提高,使得内部孔隙数量减少,从而导致混凝土的比热略有降低。该结果表明,胶凝材料掺量对比热的影响效果并不明显,并不会显著降低混凝土热容量。

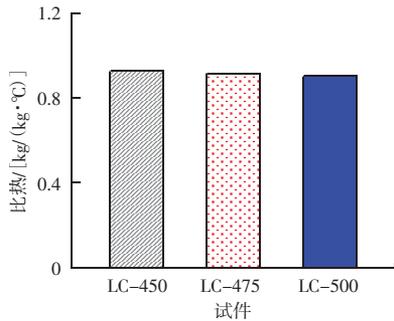


图4 胶凝材料掺量对比热的影响(28 d)

Fig. 4 Effect of binder content on specific heat (28 d)

2.6 线膨胀系数

图5为胶凝材料掺量对混凝土线膨胀系数的影响。胶凝材料掺量对低热水泥混凝土线膨胀系数的影响非常有限。与基准混凝土相比,胶凝材料掺量为475 kg/m³的混凝土,90 d时线膨胀系数提高1.1%,胶凝材料掺量为500 kg/m³时混凝土线膨胀系数提高1.9%。该结果表明,胶凝材料掺量对线膨胀系数的影响效果并不明显,不会显著降低混凝土的热稳定性。

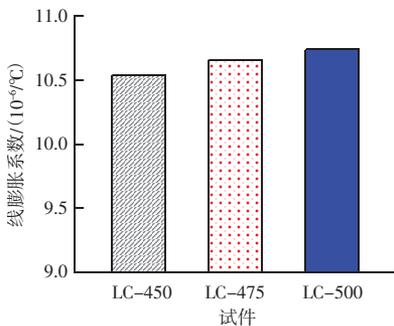


图5 胶凝材料掺量对线膨胀系数的影响(90 d)

Fig. 5 Effect of cementitious material content on linear expansion coefficient (90 d)

2.7 绝热温升

图6为胶凝材料掺量对低热水泥混凝土绝热温升的影响。在试验前期,混凝土的升温速度较快;在3 d之后,温度变化减缓;当7 d时,试件温度增长达最终绝热温升值的80%;14 d后其绝热温升值基本不变,直至稳定状态。这是因为前期混凝土发生剧烈的水化反应,并释放大量的水化热,从而导致前

期温度升高,曲线上升迅速,而随着时间推移,水化速率逐渐降低,最终达到稳定状态。胶凝材料掺量对混凝土的绝热温升有一定影响,且随着胶凝材料掺量的增加而增加。与基准混凝土相比,胶凝材料掺量为475 kg/m³的混凝土,28 d时绝热温升提高11.9%;胶凝材料掺量为500 kg/m³时混凝土绝热温升提高23.7%。这主要是由于随着混凝土中胶凝材料掺量的增加,水泥水化形成更多的水化产物,导致混凝土的累计水化热总量增加,从而使得混凝土温度上升。该结果表明,较低的胶凝材料掺量有助于降低温升,减少温度裂缝的产生。

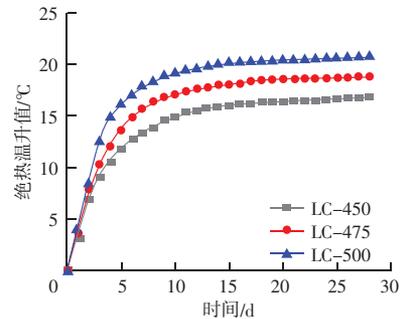


图6 胶凝材料掺量对绝热温升的影响

Fig. 6 Effect of cementitious material content on adiabatic temperature rise

3 结论

通过对低热水泥混凝土进行热学、力学性能试验研究,揭示了胶凝材料掺量对混凝土绝热温升及其他热学、力学性能的影响,得到以下结论:

(1) 胶凝材料掺量对混凝土力学性能影响较为显著。随着胶凝材料掺量增加,抗压强度增幅最为显著,提高约4.5%~23.9%;而弹性模量增幅较小,最大仅为3.5%。

(2) 胶凝材料掺量对混凝土热学性能有一定影响。随着胶凝材料掺量的增加,在导热系数方面增益效果较为明显,28 d时提高约10.4%;在线膨胀系数方面增幅较小,90 d时最大增幅仅为1.9%;同时,在比热方面略有降低,最大降幅为2.3%。

(3) 胶凝材料掺量对混凝土绝热温升的影响较为显著,且随着胶凝材料掺量的增加而增加,与使用胶凝材料掺量为450 kg/m³的混凝土相比,胶凝材料掺量为475、500 kg/m³的混凝土绝热温升分别增长11.9%和23.7%。

材料科学

参 考 文 献

- [1] WANG L, YANG H Q, ZHOU S H, et al. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat Portland (LHP) cement and fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 1073–1091.
- [2] 赵聪明, 孙军, 夏京亮, 等. 养护方式对白色高强混凝土强度影响研究 [J]. *混凝土*, 2022 (5): 183–186, 191.
- [3] OUYANG J S, CHEN X M, HUANGFU Z H, et al. Application of distributed temperature sensing for cracking control of mass concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 197: 778–791.
- [4] 康雪彤, 周健, 徐名凤, 等. 矿渣硫铝酸盐水泥混凝土热学与力学性能研究 [J]. *工业建筑*, 2022, 52 (4): 158–162, 185.
- [5] NG S, JUSTNES H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65: 41–54.
- [6] GUO C, ZENG M, LU F, et al. Correlation analysis of transient heat transfer characteristics for air precooling aggregate [J]. *Journal of Thermal Science*, 2017, 26 (2): 144–152.
- [7] WANG L, YANG H Q, DONG Y, et al. Environmental evaluation, hydration, pore structure, volume deformation and abrasion resistance of low heat Portland (LHP) cement-based materials [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 540–558.

- [8] 陈改新, 刘艳霞, 纪国晋, 等. 低热硅酸盐水泥在水工混凝土中的应用研究 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52 (12): 191–200.
- [9] WANG L, JIN M M, WU Y H, et al. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 272: 121952.
- [10] LI L G, KWAN A K H. Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 60: 17–24.
- [11] NG P L, NG I Y T, KWAN A K H. Heat loss compensation in semi-adiabatic curing test of concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2008, 105 (1): 52–61.
- [12] ZHU W, CHEN Y, LI F, et al. Design and preparation of high elastic modulus self-compacting concrete for pre-stressed mass concrete structures [J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2016, 31 (3): 563–573.
- [13] DE MATOS P R, JUNCKES R, GRAEFF E, et al. Effectiveness of fly ash in reducing the hydration heat release of mass concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 28: 101063.
- [14] 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 吴辉琴, 封冠英培, 陈宇良, 等. 外掺硅粉混凝土早龄期强度及弹性模量试验研究 [J]. *混凝土*, 2021 (2): 86–88, 92.

(上接第 5 页)

参 考 文 献

- [1] 苗贺朝, 王海, 王晓东, 等. 粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50 (9): 230–239.
- [2] 崔家新, 王连勇, 何艳, 等. 粉煤灰的危害及其利用现状 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40 (3): 118–121.
- [3] 刘志刚, 雷开友, 薛跃宇. 采用循环经济模式, 实现粉煤灰资源综合利用 [J]. *建材发展导向*, 2007 (3): 60–61.
- [4] 何富安. 用循环经济理念不断推进粉煤灰综合利用发展 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2005 (6): 48–49.
- [5] 王璐, 尹延辉, 王斌, 等. 我国粉煤灰综合利用现状、存在问题及其对策 [J]. *粉煤灰*, 2004 (4): 28–31.
- [6] 张金山, 李彦鑫, 曹永丹. 粉煤灰的综合利用现状及存在问题浅析 [J]. *矿产综合利用*, 2017 (5): 22–26.
- [7] 李浩, 文杰. 注浆理论研究现状及展望 [J]. *科技资讯*, 2014, 12 (9): 105–106.

- [8] 童立元, 邱钰, 杜广印, 等. 高速公路下伏多层采空区注浆充填法治理试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2002 (5): 19–22, 27.
- [9] 夏静萍. CFB 灰渣注浆充填材料的设计与关键性能研究 [J]. *公路*, 2021, 66 (8): 99–104.
- [10] 王波, 文华. 矿渣—粉煤灰地聚物注浆材料的制备及性能优化研究 [J]. *金属矿山*, 2023 (3): 274–278.
- [11] 王银安. 粉煤灰与矿渣粉减水性应用研究 [J]. *混凝土*, 2013 (6): 73–78.
- [12] 辛亚军, 王宇, 吴春浩, 等. 粉煤灰基 UEA 改性注浆材料力学特性与失稳模式 [J]. *煤炭工程*, 2023, 55 (2): 123–127.
- [13] 连会青, 杨俊文, 雷玉娟. 水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料强度影响因素试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2018, 50 (12): 107–112.
- [14] 王亮, 郭莲, 李文财, 等. 粉煤灰对混凝土性能的影响 [J]. *混凝土*, 2013 (9): 80–82.