

# 大体积混凝土温度效应及控制措施综述与展望

罗光财<sup>1</sup>, 张学兵<sup>2\*</sup>, 欧万吉<sup>2</sup>, 哈吉章<sup>1</sup>, 刘文<sup>1</sup>, 胡亚路<sup>1</sup>, 黄继承<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙

<sup>2</sup>湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>3</sup>上海建工建材科技集团股份有限公司, 上海

收稿日期: 2022年10月29日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

## 摘要

温度效应对大体积混凝土有着重要的影响, 关系到混凝土结构的质量和安。本文介绍了大体积混凝土水化反应机理以及水化热对混凝土力学性能的影响, 综述了配合比、掺料、外加剂和保温混凝土对大体积混凝土水化反应的影响, 总结了大体积混凝土的温控措施, 并对保温混凝土的研究进展进行了概述。研究表明: 选用合适掺料可以有效降低水化反应速率, 减少水化热的产生, 优化混凝土掺料和水灰比能够减少混凝土冻融损伤和表面裂缝, 采取适当的温控措施能够提高混凝土浇筑质量。未来随着技术进步和材料性能提升, 大体积混凝土将实现精细、高效、智能化温度控制。

## 关键词

大体积混凝土, 水化热, 温度效应, 温度控制

# Review and Prospect of Temperature Effect and Control Measures for Mass Concrete

Guangcai Luo<sup>1</sup>, Xuebing Zhang<sup>2\*</sup>, Wanji Ou<sup>2</sup>, Jizhang Ha<sup>1</sup>, Wen Liu<sup>1</sup>, Yalu Hu<sup>1</sup>, Jicheng Huang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>China Construction Fifth Engineering Division Corp., LTD., Changsha Hunan

<sup>2</sup>College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

<sup>3</sup>Shanghai Construction Building Materials Technology Group Co. LTD., Shanghai

Received: Oct. 29<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The temperature effect has an important influence on mass concrete, which is related to the

\*通讯作者。

文章引用: 罗光财, 张学兵, 欧万吉, 哈吉章, 刘文, 胡亚路, 黄继承. 大体积混凝土温度效应及控制措施综述与展望[J]. 土木工程, 2022, 11(11): 1268-1281. DOI: 10.12677/hjce.2022.1111142

quality and safety of concrete structures. That was introduced the mechanism of hydration reaction of mass concrete and the effect of heat of hydration on the mechanical performance of concrete, and that was reviewed the effect of mix proportion, mineral admixture, chemical admixture and thermal insulation concrete on hydration reaction of mass concrete. The effective temperature control measures were summarized for mass concrete, and the research progress was overviewed of thermal insulation concrete. The research shows that: the appropriate admixtures can effectively reduce the rate of hydration reaction, reduce the generation of heat of hydration, optimization concrete admixtures and water-cement ratio can reduce concrete freeze-thaw damage and surface cracks, and adoption appropriate temperature control measures can improve the quality of concrete. In the future, as technology progresses and material performance improvement, the temperature control of mass concrete will be fine, efficient and intelligent.

## Keywords

Mass Concrete, Heat of Hydration, Temperature Effect, Temperature Control

Copyright © 2022 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

混凝土是助力城镇化建设、推动建筑业可持续发展的关键材料，其浇筑成型的质量关系到建筑物的安全和使用寿命。混凝土浇筑的规模严重影响其最终的质量，其中大体积混凝土的施工与养护技术吸引了研究人员的广泛关注。大体积混凝土受外界环境、水化作用等因素影响，其温度控制是工程建设的一大难题[1]。混凝土内部温度影响水化作用的速率，而水灰比决定产生热量的大小[2]。内部积累的水化热过多会导致温度裂缝，危害混凝土结构的安全，此外混凝土固化过程中的温度效应影响着结构变形以及体积安定性等方面[3]。因此研究大体积混凝土温度效应以及温控措施对于提高混凝土结构使用性能和耐久性能有着重要的意义。

大体积混凝土温度效应的研究主要聚焦于原材料[4] [5]、掺和料[6] [7]、配合比[8] [9] [10]等方面。天然粗、细骨料，再生骨料[11]以及骨料级配[12]影响着混凝土的强度等级。掺和料研究主要以粉煤灰[4]、硅微粉[13]、抗渗防水剂[14]等为主，混凝土在不同掺和料下的材料性能和水化放热量的变化是研究较多的方向之一。混凝土配合比侧重于研究掺料替换水泥的量[15]、水灰比[16]等因素，这些因素是影响混凝土抗压强度、抗渗能力的关键指标。

温度控制是保证大体积混凝土浇筑质量的核心技术之一，引起了研究者的兴趣。温度控制的研究主要围绕施工工艺[17]、温度监测[18]、新型传感器[1]、养护方式[17] [19] [20]等角度展开。施工工艺的改进能加快混凝土内部水化热的释放速率，减少温度裂缝的产生。温度监控是保证大体积混凝土浇筑质量的关键环节，监测方法的改进和精度的提升，有利于准确评估大体积混凝土的养护质量。混凝土的养护主要研究方向有养护方法[21]、养护剂[22]等对混凝土的性能、表面裂缝和施工成本的影响。

本文介绍大体积混凝土的基本概念、水化热原理和最近研究进展，从材料层次综述影响大体积混凝土水化热的几种方法，总结温度效应对大体积混凝土可能产生的危害，最后总结大体积混凝土的四种温控措施，为后续大体积混凝土温度效应研究及温度控制提出合理建议。

## 2. 基本概念及研究进展

### 2.1. 大体积混凝土定义

《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018 中规定[23]，“混凝土结构物实体最小尺寸不小于 1 m 的大体量混凝土，或预计会因混凝土中胶凝材料水化引起的温度变化和收缩而导致有害裂缝产生的混凝土”被称为大体积混凝土。日本建筑协会标准(JASS5)中规定大体积混凝土需满足的条件为，结构断面最小尺寸需超过 80 cm，混凝土内部水化作用产生的最高温度与外界环境的温差需超过 25℃[24]。美国混凝土协会标准(ACI207)中定义的大体积混凝土的特征为，混凝土结构实体尺寸较大，必须采取控制措施来减缓温度应力的影响，进而限制混凝土内部裂缝的发展[25]。

对比上述国内外标准中对大体积混凝土的规定可知，目前大体积混凝土的定义尚未完全明确统一，可以从混凝土尺寸以及水化热对混凝土结构造成的影响来判断。文献[23]和[24]中提到的裂缝定义较模糊，裂缝的宽度是多大？对混凝土耐久性或其他性能造成多大的影响可以被称为有害？而且裂缝宽度的准确测量比较难实现，制备试块测试水化热又无法反映大体积混凝土的实际情况。因此，相关标准的精确定义和可操作的判别方法亟待补充。

### 2.2. 水泥水化反应原理

水泥熟料在煅烧和冷却后，其中熟料矿物主要为硅酸三钙(C<sub>3</sub>S)、硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)、铝酸三钙(C<sub>3</sub>A)、铁相固溶体(C<sub>4</sub>AF)和其他少量相。而这些矿物中硅相(C<sub>3</sub>S 和 C<sub>2</sub>S)约占水泥含量的 75%以上，其水化反应被认为是水泥基材料产生强度的原因[26]。相应的反应过程为：



C<sub>4</sub>AF 的水化速率较慢，受水化环境的影响较大，有和 C<sub>3</sub>S 及 C<sub>2</sub>S 发生反应的可能性。水化反应过程中会释放热量，其放热过程可以分为 5 个时期，诱导前期(I)、诱导期(II)、加速期(III)、衰退期(IV)和稳定期(V)。期间水泥在 1 d 水化反应程度能达到 50%，通常 28 d 后被认为水化完全(水化程度超过 80%)，其抗压强度持续提高[27]。各阶段的水化放热速率如图 1 所示，图中加速期的水化速率由水化硅酸钙凝胶(CSH)生成的速率决定，大量的 CSH 覆盖水泥颗粒后隔绝了水的进入，此时水化速率减弱，开始进入衰退期。由图 1 可知诱导前期、加速期的反应速率较大，可能引起混凝土内部升温过快，导致混凝土在温度应力下发生受拉变形，应该采取相应措施减缓水化反应的速度。

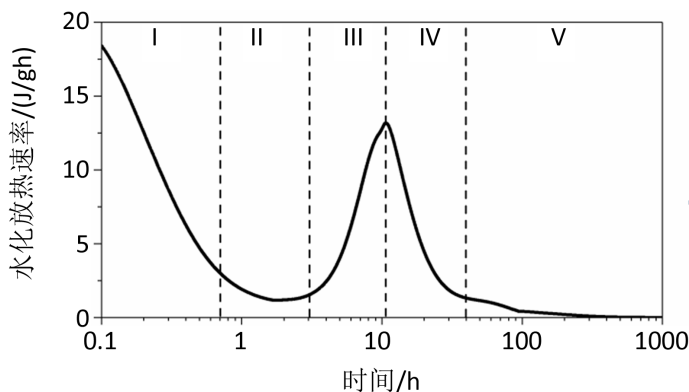


Figure 1. Heat release rate of cement hydration [26]

图 1. 水泥水化放热速率示意图[26]

按照 Rahimi-Aghdam 等[28]的研究, 水泥的水化过程可分为: (a) 开始溶解阶段、(b) CSH 颗粒形成阶段、(c) CSH 颗粒各向发展阶段、(d) CSH 颗粒覆盖阶段、(e) 形成致密凝胶层阶段, 如图 2 所示。因此, 针对(a)和(c)阶段的反应机理, 可以采取减缓水化反应的速率, 使产生的多余热量及时散去。

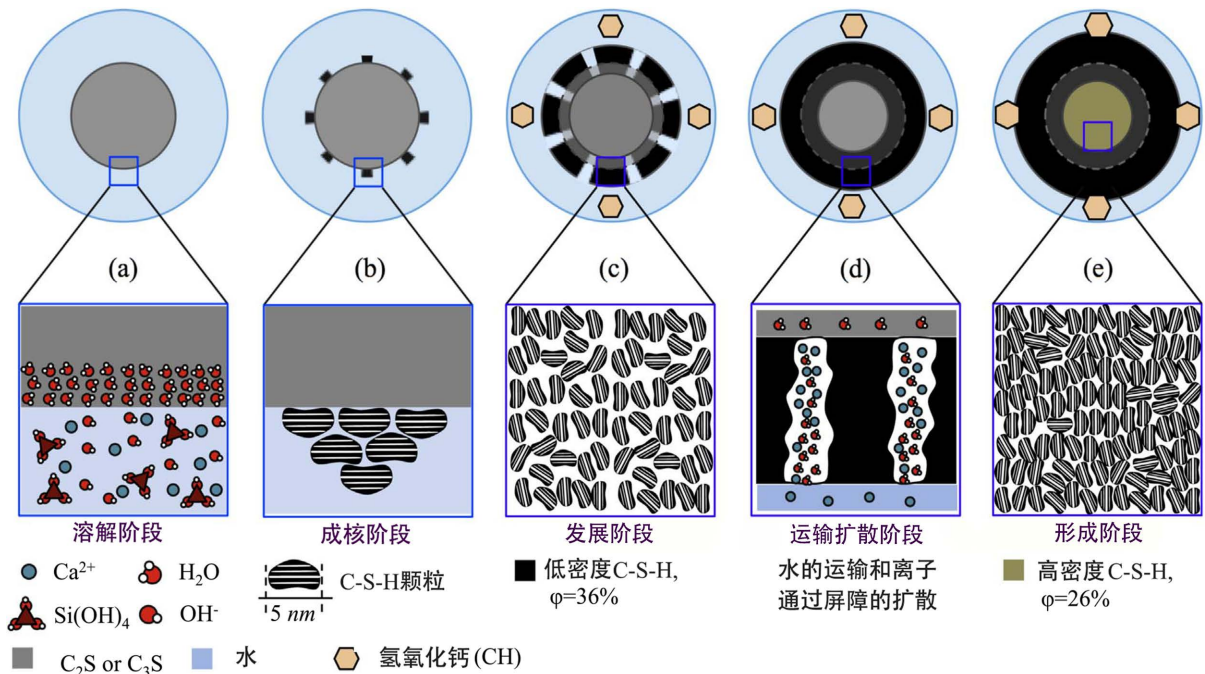


Figure 2. Schematic diagram of cement hydration mechanism [28]

图 2. 水泥水化作用机理示意图[28]

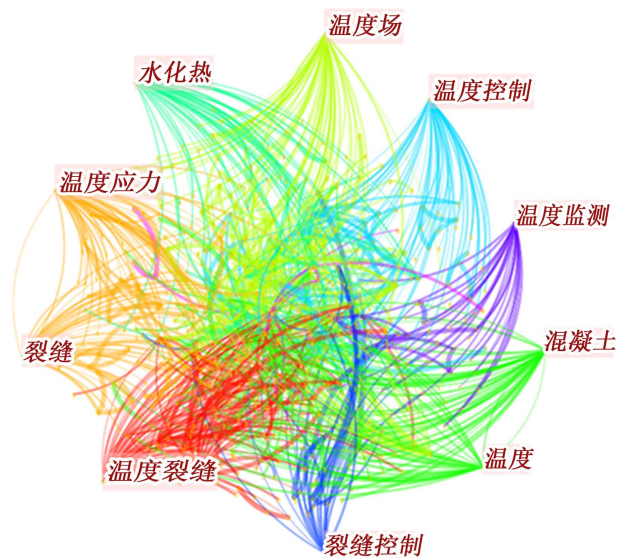


Figure 3. Keyword clustering diagram

图 3. 关键词聚类图

### 2.3. 研究进展

以中国知网数据库为例, 选取时间段为“2000年1月1日~2022年6月1日, 搜索的关键词为‘大

体积混凝土 \* 温度’ ”，总计 2500 篇文献(包括期刊杂志和学位论文)。通过 CitessSpace 软件导入分析得到文献关键词聚类，如图 3 所示。关键词出现频次较多的为温度裂缝、温度应力、水化热、温度控制等。研究方向主要集中在大体积混凝土水化热反应、温度作用下混凝土结构的损伤与响应以及施工过程中的裂缝控制和温度控制。

从关键词聚类中可以具体看到各类关键词内容分布，研究的角度可以是施工养护、方案优化、材料性能、寒冷地区、热学参数等。进一步的可以从关键词引用方向了解各时间段学者主要研究的大致方向，如图 4 所示。引用频次前三位为施工技术、控制措施和建筑工程。其主要研究时间段分别为 2019~2022、2007~2012 以及 2016~2022 年。

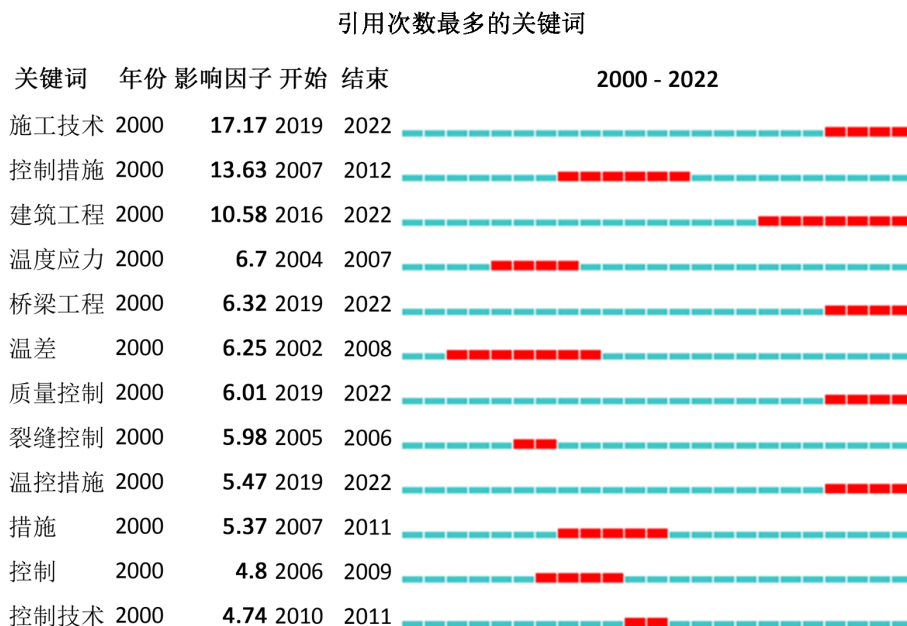


Figure 4. Keyword reference times

图 4. 关键词引用次数

通过宏观分析大体积混凝土近些年研究进展，能够揭示该研究领域主要从混凝土水化反应原理、温度以及施工控制角度展开。下面笔者主要从大体积混凝土温度效应和温度控制两个方面总结该领域所取得的研究成果。

### 3. 大体积混凝土温度效应影响因素

#### 3.1. 混凝土配合比

配合比中水泥的含量是决定大体积混凝土温升值的关键因素[29]，而最终确定混凝土的配合比却不能仅考虑温升。目前国内在混凝土配合比设计时，通常将耐久性能、工作性能和混凝土强度综合考虑[30]。江昔平[25]提出不同因素对混凝土的影响程度可以按水灰比 > 粉煤灰掺量 > 水泥掺量 > 骨料类型 > 外加剂 > 水泥种类。同时指出配合比中水灰比不宜超过 0.5。李占印等[31]探究了水灰比在 0.3~0.6 范围内的水化反应，得出水灰比小于 0.4 时，水化反应显著减慢，水化放热量为 368.5 kJ/kg，如图 5 所示。

大体积混凝土配合比设计思路有两种，第一种是采用正交试验方法选取合适参数进行组合，也可以用控制变量法比选出最合适的参数及掺量，再进行组合。第二种是先选定规范允许的水灰比，在满足最

大水灰比和最小水泥用量的前提下,可以保证混凝土的耐久性能[32]。然后选定合适的砂率再反推配合比中水及粗骨料的用量,最后比选掺料或者外加剂最优含量,最终确定大体积混凝土的配合比。

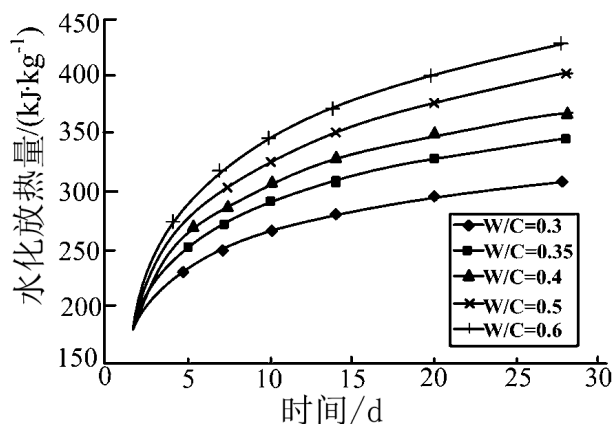


Figure 5. Hydration heat release of concrete of different water-cement ratios [31]

图 5. 不同水灰比条件下混凝土水化放热量[31]

大体积混凝土的较优配合比见表 1, 主要研究成果有水灰比的范围、粉煤灰和矿粉掺量、外加剂含量等对大体积混凝土水化热的影响, 但具体掺料含量、外加剂种类对水化作用影响程度如何, 不同掺料对混凝土影响程度如何, 相关研究成果比较少。此外, 混凝土配合比设计虽能够减少水化热的产生, 但需要兼顾混凝土耐久性等其他工作性能, 操作难度较高, 其中寻找最优配合比需要进行大量试验研究, 而最终可能起到降低水化热的效果并不明显。为了进一步寻求降低水化热的方法, 相关研究人员开始从掺和料角度入手研究。

Table 1. Mix ratio of mass concrete of different strength grades

表 1. 不同强度等级的大体积混凝土配合比

| 文献       | 混凝土强度 | 水胶比   | 水泥标号       | 配合比例/(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |      |     |           |
|----------|-------|-------|------------|---------------------------|-----|------|-----|------|-----|-----------|
|          |       |       |            | 水泥                        | 砂   | 石子   | 水   | 外加剂  | 粉煤灰 | 特殊掺料      |
| 贾要清[32]  | C30   | 0.44  | P.O 32.5   | 286                       | 670 | 1068 | 180 | 6.14 | 123 | /         |
| 刘方华[33]  | C30   | 0.45  | P.O 42.5   | 209                       | 852 | 1042 | 157 | 3.49 | 140 | 抑制剂(1.33) |
| 苗春等[34]  | C40   | 0.47  | P.O 42.5   | 225                       | 786 | 1055 | 175 | 5.44 | 75  | 矿粉(70)    |
| 隋雪萍等[35] | C40   | 0.376 | P.S.A 42.5 | 328                       | 659 | 1076 | 165 | 24.3 | 122 | 膨胀剂(36)   |
| 夏开飞等[36] | C40   | 0.48  | P.O 42.5   | 168                       | 815 | 1059 | 164 | 6.8  | 68  | 矿粉(101)   |
| 龚兴耀等[37] | C45   | 0.4   | P.O 42.5   | 295                       | 749 | 1035 | 173 | 8.19 | 137 | 防锈剂(22.8) |

### 3.2. 掺合料

水泥是水化反应的重要原材料, 其含量的多少决定水化热的总量。为减少水化热的产生, 采用矿物掺合料替换部分水泥含量成为一种新的研究思路, 相关科研工作也取得一定的进展。常见的矿物掺料主要包括粉煤灰、矿渣粉、石灰石粉、偏高岭土和纳米二氧化硅等。研究的角度可分为: 不同掺料对混凝土水化热的影响、多掺料组合共同对混凝土性能的影响。

汪冬冬等[38]研究发现在大体积混凝土中高温促进粉煤灰二次水化反应, 粉煤灰掺量可以推迟放热峰

值出现。李虹燕等[39]探究了粉煤灰和矿渣对水泥水化热的影响,研究表明掺粉煤灰后降低水化热的效果较好,而掺矿渣粉更能延缓放热峰值出现。张国栋等[40]对比了粉煤灰和矿渣粉在单掺和双掺替换水泥对水化放热性能的影响,得出掺粉煤灰能减小水化速率,双掺料比例对水化热大小和反应速率影响不明显。进一步研究可以发现,粉煤灰主要在24 h前影响水化反应的进行,矿渣的引入能促进水化作用[41],两者火山灰反应发生的时间存在差异,粉煤灰主要在水化后24 h开始,而矿渣的火山灰反应一直持续进行(如图6和图7所示)。

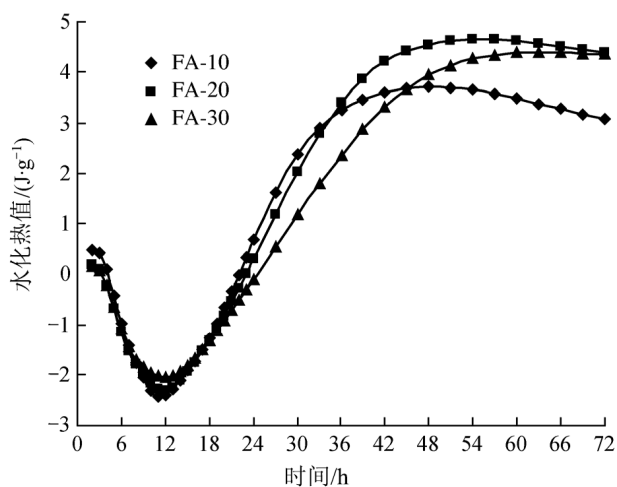


Figure 6. Ash heat release curve of fly ash [41]

图6. 粉煤灰的火山灰放热曲线[41]

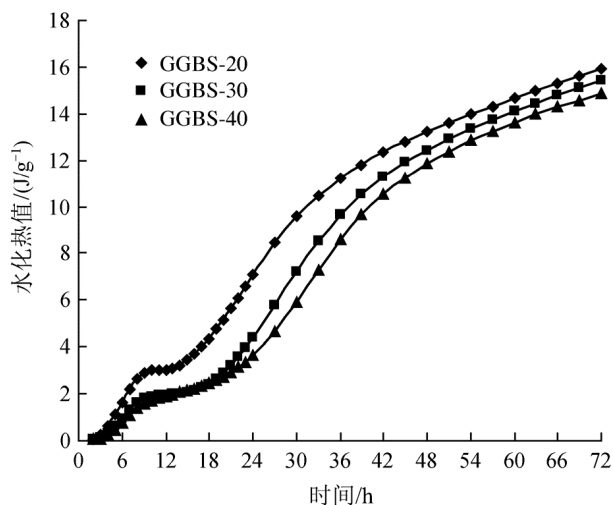


Figure 7. Volcanic ash heat release curve of slag [41]

图7. 矿渣的火山灰放热曲线[41]

石灰石是较容易获取的低成本的矿物原料,可以取代部分细骨料或者作为掺料,起到节约建筑材料、降低能耗的作用。刘数华[42]提出,石灰石粉降低水化热效果比粉煤灰更明显,并且能够改善试件的孔隙结构。进一步的研究表明,石灰石粉可促进水泥早期水化反应,能够保证水泥基材料的早期强度[43]。偏高岭土因其制造过程耗能低、污染小被认为是理想的水泥替代材料,获得研究人员的广泛关注[44]。乔春雨等[45]认为较大偏高岭土掺量时,水化放热量降幅明显,早期抗压强度与放热量呈线性关系。陈登等[46]

对比单掺石灰石粉和复掺石灰石、偏高岭土两种方法对水化作用的影响,发现偏高岭土能促进水化作用,提升复合水泥的后期强度。此外纳米材料、珊瑚粉等新型材料的研究也推动着新型复合水泥的研发工作,为降低水化热提供了新的思路。

由此可见,不同类型掺料替换水泥、多种掺料共同作用可以实现降低水化热、减缓水化反应速率的目的。当然不同掺料对于混凝土的影响不一而同,粉煤灰能够推迟放热峰值的出现,矿渣、石灰石粉、偏高岭土可以促进水化作用,而石灰石粉还能够形成致密的水化结构层,减少混凝土内部裂缝的产生。因此,在混凝土中加入掺料是降低水化热的有效途径,新型掺料的研究有利于更好控制大体积混凝土的水化热,减少传统高能耗建筑材料的使用。

### 3.3. 外加剂

外加剂种类包括减水剂、缓凝剂、膨胀剂等,不同外加剂可以改变混凝土的工作性能。减水剂能够改变混凝土的和易性、降低混凝土中水的使用量;缓凝剂适合用于大体积混凝土,能够延长混凝土的凝结时间、有利于水化热的充分释放;膨胀剂可以补偿混凝土的收缩、减少水化作用减缓温度降低导致的收缩裂缝、有利于提高混凝土的抗渗性能。

外加剂在混凝土配合比中含量较少,主要作用在于改变混凝土的工作性能。选用适当掺量的外加剂能够减缓水化作用速率,相关研究已经取得了初步成效。邓国颂等[47]对比了不同减水剂掺量对混凝土水化作用的影响,指出减水剂可以改变水化热快速上升阶段出现的时间而不能减少水化热总量,高掺量减水剂对水化升温及放热速率有较大的影响。刘吉兰[48]提出聚羧酸减水剂对前期水化作用抑制能力较强,还会降低混凝土 3 d 和 7 d 的抗压强度。王子龙等[49]采用等温量热法探究了不同缓凝剂对混凝土水化放热的影响,发现缓凝剂能够降低 24 h 内累积水化热,使 72 h 总水化热量降幅达到 5%。另有研究表明,缓凝剂可以降低水化温度峰值,有利于大体积混凝土裂缝控制[50]。大体积混凝土中膨胀剂需谨慎使用,膨胀剂会加快水化速率,提高温升值,增大水化放热量[51]。

不同外加剂对混凝土水化作用影响效果不同,研究主要围绕不同组分外加剂对混凝土性能的影响、不同种类外加剂对混凝土水化作用的影响。从上述研究结果来看,外加剂对水化作用影响程度不明显,从降低水化热角度分析属于次要影响因素,但对于混凝土工作性能影响较大。

### 3.4. 保温混凝土

随着新材料研发不断取得进展,保温混凝土逐渐进入人们的视野,改变混凝土内在组分含量,可以制备具有更好保温性能的新型混凝土。目前保温混凝土的研发已经取得一定的进展,相关科研成果引起了许多学者的重视。

张泽平等[52]在混凝土中掺入轻质保温材料制备出玻化微珠混凝土,验证了其具有较低的导热性能,并且混凝土强度能够满足使用要求,在未来有望成为一种新型保温材料。黄开林等[53]着重探究了不同类型再生骨料对玻化微珠保温混凝土的影响,强调当混凝土再生骨料取代率为 25%,粘土砖再生骨料取代率为 75%时,能够充分发挥材料的力学性能;指出粘土砖中的火山灰是提高再生保温混凝土力学性能的关键材料之一。

Shang 等[54]利用粉煤灰包裹海藻酸钠制备出新型泡沫混凝土,与传统泡沫混凝土相比,新型混凝土具有更高的抗压强度和弹性模量,进一步研究发现,新型泡沫混凝土有更低的导热系数和更好的耐火、隔声性能。Asim 等[55]将天然纤维加入混凝土中,得到纤维增强混凝土。研究表明纤维对混凝土的保温性能有促进作用,能够提升混凝土热稳定性,但削弱了混凝土的强度。

制备新型保温混凝土常用方式是在混凝土中掺入特殊材料来改善混凝土的性能,值得注意的是,新



型掺料的引入,对混凝土原有抗压强度等力学性能有一定的影响,因此在保证结构安全的前提下,最大化提升混凝土的保温性能具有较好的综合效益。

#### 4. 温度效应导致的问题

水化热是水化作用过程中释放热量,热量积累到一定程度会使混凝土内部温度升高,进而影响混凝土内部性能。当混凝土内部和表面温差过大时会产生温度应力,容易造成混凝土温度裂缝[24]。田野[56]认为混凝土结构开裂是温度变形、收缩变形和徐变作用共同影响的结果,通过提升混凝土强度或掺加纤维能改善混凝土的抗拉强度。黄兰可[57]分析数值模拟结果,得出混凝土入仓温度在 12.5℃可以有效减少温度裂缝的产生。

温度效应影响混凝土强度体现在:影响水化反应速率、影响混凝土内部结构组成、影响水分蒸发和干燥速率[58]。陈丽红[59]、余志武等[60]研究得出混凝土强度受温度和受热时间共同影响,温度升高对混凝土早期强度有利,但严重影响后期强度的提高。王峥[61]通过试验研究发现,100℃时混凝土强度有上升趋势,超过 200℃后强度下降明显,600℃后因内部结晶水丧失,强度下降为常温抗压强度的 55%左右,如图 8 所示。

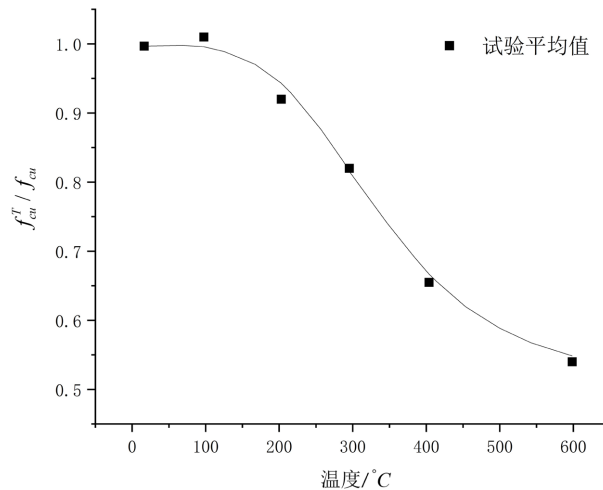


Figure 8. Fitting curve of concrete strength and temperature [61]

图 8. 混凝土强度与温度拟合曲线[61]

水化热给混凝土带来的其他危害包括耐久性能、抗渗性能和抗冻性能的下降。高温条件下混凝土的孔隙率和渗透性提高,不利于混凝土的耐久性能[62]。进一步研究发现,300℃后混凝土吸水性得到较大增强,混凝土内部孔隙率增长较快[63]。王树和等[64]测定混合材料热变形性能以探究各组分变形差异,得出较大的温差和风速等不利条件下,混凝土表面更容易发生破坏,降低了结构的耐久性能。为提升混凝土抗渗性能,加入纤维是较为有效的方法之一,加入纤维后,混凝土渗透系数开始下降,而温度达到 400℃时,渗透系数大幅度提升[65]。不同纤维对混凝土抗渗性影响程度不一,当采用 0.3%聚丙烯和 0.5%钢纤维混掺时,混凝土抗渗性能最佳[66]。

综上可知,温度效应对混凝土的危害是多方面的,不仅增加混凝土开裂风险、降低混凝土强度,而且危害混凝土的耐久性、抗渗性和抗冻性。内部水分的形态和环境的温度较大程度影响混凝土结构的耐久性能。冻融作用和温差作用影响混凝土冻胀力和温差应力的作用,导致结构发生收缩开裂和变形。混凝土掺入纤维可以减缓冻融作用的危害,采取保温、保湿措施能够应对温差作用带来的结构损伤,提高结构的耐久性能。

## 5. 大体积混凝土温控措施

混凝土内部水化热以及外界温度制约着材料受力性能和耐久性能,大体积混凝土温度效应更加明显。在大体积混凝土施工中,控制混凝土内外温差,环境温度等,对于混凝土的浇筑质量和结构性能起到关键性作用。下面从施工工艺、降温方式,相变材料、养护方式总结现阶段大体积混凝土温度控制措施方面的研究进展,探究不同温度控制措施所取得的成效,为混凝土温度控制提供参考。

### 5.1. 施工工艺的改进

工艺层次指混凝土浇筑期间选取适当施工工艺或加强浇筑流程控制等措施,达到降低水化热产生速率、均匀释放热量和减小里表温差的目的。靳炳强[67]结合具体工程实例,从骨料加热、保温、水泥强度等级、减水剂选取、混凝土运输、浇筑、养护等方面总结出冬季大体积混凝土施工各个环节应该控制的技术要点,为混凝土现场施工提供参考建议。李东等[68]针对混凝土跳仓法施工方案展开分析,探究跳仓间隔距离对混凝土接缝处应力的影响,总结出不同水泥间水化热引起的应力规律,强调混凝土浇筑后3~7天内应力释放最快。刘亚朋等[69]研究不同入模温度和保温措施下大体积混凝土温度场的分布情况,计算得出降低混凝土入模温度能够减小混凝土内部温度,降低里表温差;混凝土表面采取保温措施能够降低混凝土内外温度梯度,减缓热量耗散速率,保障混凝土的体积安定性。目前从施工工艺方面进行温度控制是比较常用的温控措施,成本较低,操作性强。但能否取得较好的效果,还取决于施工项目的现场管理水平和各工序、环节的配合程度。

### 5.2. 降温方法的改进

除了从浇筑工艺角度降低混凝土的热量外,通过在混凝土内部布设冷凝管也是一种有效的降温措施,该方法广泛应用于现场施工,围绕该措施的研究已初见成效。王潘绣等[70]提出冷凝管能够有效降低混凝土内部温度峰值,确保混凝土里表温差符合要求,建议水温不超过25℃,冷凝管通水时间应超过14天。Chen等[71]在考虑非金属冷凝管的边界条件基础上,利用分离变量法计算得出冷却温度场偏微分方程的理论解,通过计算和拟合得出合理的指数解,为混凝土温度场问题的解答拓宽了方向。Tasri等[72]对比钢材、聚乙烯(PE)和聚氯乙烯(PVC)三种冷凝管材料在大体积混凝土中的温度和应力差异,发现钢管能够有效降低混凝土内部温度,但降温速率过快会带来混凝土内部开裂风险,而PE和PVC管在混凝土内部高温区域易膨胀变形,使混凝土内部热应力增大。内部埋设冷凝管方法比较成熟,但对浇筑工序的质量把控和温度监测环节要求较高,此外,施工成本也是值得管理者综合考虑的重要因素。

### 5.3. 相变材料的使用

相变材料(phase change material, PCM)能够在相变过程中吸收或者释放热量,并且保持自身温度稳定[73]。常见的相变材料包括石蜡、石墨、硅酸、硬脂酸、硫代硫酸钠等,其良好的储能特性可以保证混凝土其他性能,减少温度裂缝的产生[24]。杨永康等[74]验证了利用相变材料控制水化热过大的可行性,提出相变材料掺量过大会损害混凝土的强度。史巍等[75]的研究表明,相变材料可以降低大体积混凝土升温速率和最大温升值,能够减小混凝土内温度裂缝产生的风险。目前,该方法尚处于技术探索阶段,实际工程运用案例较少,相应配套技术还不够成熟,相信随着更多轻质、高强、环保新材料的不断研发,该方法能够成为大体积混凝土有效的温控措施之一。

### 5.4. 养护方式的改进

混凝土养护是混凝土施工的最后一个环节,养护的质量也较大程度决定混凝土的性能。养护的核心同

样是围绕混凝土温度、湿度以及降温速率等方面展开。常见冬季施工方法为原材料加热法、蓄热法和外加剂法等[76]，下面简述针对混凝土养护所取得的科研成果。金书成等[77]建立冬季施工环境模型，计算出温度和应力分布情况，研究表明采取蓄热法和保湿措施能够减小温度应力的产生，同时提高混凝土抗冻和抗裂性能。陈广峰等[78]提出了一种新的绿色养护方法——涡轮感应加热法，并针对涡轮线圈设计和具体施工方法提出合理的建议。Yu 等[79]探讨了蒸汽养护下混凝土的受力性能，提出掺入胶凝材料能够有效减少混凝土冷却收缩时产生的微裂缝，对于掺和料较大的混凝土需要充分进行蒸汽养护，保证其抗拉强度。大体积混凝土养护方法可以降低里表温差，减少混凝土表面裂缝产生，是工程运用中最常用的温控方法。

## 6 结论

本文总结了大体积混凝土的水化作用机理，从材料方面综述了配合比、掺料、外加剂和保温混凝土对水化作用的影响，归纳了大体积混凝土温度控制常见的几种措施，得出以下结论：(1) 混凝土掺料是影响水化反应速率和水化热的关键因素，配合比设计中水灰比对水化热影响较大，优化混凝土水灰比能够降低水化热的产生，外加剂可以改变混凝土工作性能，减少混凝土出现损坏。(2) 温度效应导致混凝土内部温度裂缝产生，降低混凝土强度、不利于混凝土耐久性能、抗渗性能、抗冻性能的发挥。(3) 大体积混凝土的温度控制有利于水化热释放以及热量传递，采取合适温控措施能够节省工程建设成本，提高工程经济效益。未来大体积混凝土的研究可以聚焦多种混合掺料、新型养护方式、新型添加剂、新型保温混凝土、保温材料和再生混凝土等方面，随着技术进步、新型材料的出现，材料性能将会提升，更多轻质、高强、绿色、环保的材料将运用于混凝土领域，大体积混凝土温度控制将朝着更加精细化、高效化和智能化方向发展。

## 基金项目

湖南省教育厅重点项目资助，20K126。

## 参考文献

- [1] 周双喜, 邓芳明, 魏永起, 等. 基于无源 RFID 的混凝土温度监测技术研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(3): 65-73, 82.
- [2] 董继红, 李占印. 水泥水化放热行为的温度效应[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(5): 675-677.
- [3] 魏亚, 梁思明, 张倩倩. 水泥混凝土路面固化温差对翘曲和应力的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(1): 81-87.
- [4] 崔正龙, 张雪虹, 唐博. 不同养护环境对粉煤灰混凝土强度及碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 65-69, 76.
- [5] Hasim, A.M., Shahid, K.A., Ariffin, N.F., et al. (2022) Study on Mechanical Properties of Concrete Inclusion of High-Volume Coal Bottom Ash with the Addition of Fly Ash. *Materials Today: Proceedings*, **51**, 1355-1361. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.400>
- [6] 史巍, 侯景鹏. 不同条件下相变控温大体积混凝土的温控性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1063-1066.
- [7] 唐明, 蒋宏伟, 宋东升. 超厚底板低水化热泵送混凝土研究[J]. 混凝土, 2011(3): 1-4, 45.
- [8] 郭子奇, 杨双锁, 李彦斌, 等. 地铁车站大体积混凝土侧墙浇筑时期温度与应力分布规律研究[J]. 混凝土, 2020(12): 94-97, 102.
- [9] 梁嘉彬. 高原环境下冬季大体积混凝土防裂技术研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [10] Nathe, D.N. and Patil, Y.D. (2022) Performance of Coal Bottom Ash Concrete at Elevated Temperatures. *Materials Today: Proceedings*, **65**, 883-888. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.519>
- [11] Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Wu, Y.-F., et al. (2021) Investigation of Thermal Performance of Concrete Incorporating Different Types of Recycled Coarse Aggregates. *Construction and Building Materials*, **270**, Article ID: 121433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121433>

- [12] Wang, W., Liu, Y., Jiang, L., *et al.* (2018) Effect of Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate on the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Thermal Insulation Concrete (RATIC). *Construction and Building Materials*, **180**, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.232>
- [13] 雷文晗, 彭小芹, 谢永江, 等. 硅微粉对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2011(6): 100-101, 107.
- [14] 王宁宁, 刘明, 何宏荣, 等. 掺抗裂硅质防水剂的大体积混凝土耐久性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2629-2634.
- [15] 黎鹏平, 范志宏, 熊建波, 等. 石粉对胶凝材料水化性能及路面混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2012(2): 69-71, 74.
- [16] 侯云芬, 司武保, 王玲, 等. 冻融循环过程中混凝土内部温度-相对湿度关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 971-975.
- [17] 李华. 节段拼装梁湿接缝混凝土冬季施工温度控制技术[J]. 铁道标准设计, 2011(8): 64-67.
- [18] 廖哲男, 魏巍, 赵亮, 等. 大体积混凝土 BIM 智能温控系统的研究与应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(4): 132-138.
- [19] 马永刚, 王起才, 张戎令, 等. 入模温度和引气剂掺量对负温下混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性影响[J]. 混凝土, 2022(2): 26-30.
- [20] Liu, Y., Fu, S., Gao, J., *et al.* (2020) Prediction for Temperature Evolution and Compressive Strength of Non-Mass Concrete with Thermal Insulation Curing in Cold Weather. *Journal of Building Engineering*, **32**, Article ID: 101737.
- [21] 夏京亮, 曹长伟, 孙军, 等. 养护方式对白色高强混凝土氯离子渗透的影响[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 176-180, 178.
- [22] 谢迁, 陈小平, 温丽媛. 混凝土养护剂的发展现状与展望[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6): 1761-1766, 1771.
- [23] GB 50496-2018. 大体积混凝土施工标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [24] 陈桂林, 姜玮, 刘文超, 等. 大体积混凝土施工温度裂缝控制研究及进展[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(3): 159-165.
- [25] 江昔平. 大体积混凝土温度裂缝控制机理与应用方法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [26] 张增起. 水泥-矿渣复合胶凝材料水化动力学模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2018.
- [27] 孔祥明, 卢子臣, 张朝阳. 水泥水化机理及聚合物外加剂对水泥水化影响的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(2): 274-281.
- [28] Rahimi-Aghdam, S., Bažant, Z.P. and Abdolhosseini Qomi, M.J. (2017) Cement Hydration from Hours to Centuries Controlled by Diffusion through Barrier Shells of C-S-H. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **99**, 211-224. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.10.010>
- [29] 姜峰. 基于裂缝控制技术及配合比优化设计的混凝土应用研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(1): 206-211.
- [30] 朱平华, 陈华建, 郭佳赤, 等. 大体积混凝土优化设计的四功能准则[J]. 混凝土, 2004(1): 41-45.
- [31] 李占印, 董继红. 水灰比对水泥水化放热模型的影响[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2011, 24(1): 71-73.
- [32] 贾要清. C30 大体积混凝土配合比设计[J]. 公路, 2005(10): 42-46.
- [33] 刘方华. 水化温升抑制剂在大体积混凝土中的应用[J]. 公路, 2022, 67(3): 143-147.
- [34] 苗春, 汤俊, 缪小星, 等. C40 大体积混凝土配合比设计及工程应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007(2): 249-253.
- [35] 隋雪萍, 朱中华, 丁新亭. 大体积混凝土配合比设计及工程中的应用[J]. 混凝土, 2012(12): 132-135, 139.
- [36] 夏开飞, 李长青, 杨青. 超大体积超厚筏板混凝土配合比设计及工程应用[J]. 江西建材, 2020(S1): 85-86, 79, 82.
- [37] 龚兴耀, 尹全勇. C45 大体积混凝土配合比设计及工程应用[J]. 混凝土, 2011(3): 93-95.
- [38] 汪冬冬, 金建昌, 田伟丽, 等. 粉煤灰在大体积混凝土中作用机理研究[J]. 中国港湾建设, 2014(3): 43-46.
- [39] 李虹燕, 丁铸, 邢锋, 等. 粉煤灰、矿渣对水泥水化热的影响[J]. 混凝土, 2008(10): 54-57.
- [40] 张国栋, 吕兴栋, 杨凤利, 等. 粉煤灰/矿粉-水泥胶凝体系的水化放热性能[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(5): 386-390.
- [41] 王冲, 杨长辉, 钱觉时, 等. 粉煤灰与矿渣的早期火山灰反应放热行为及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(7): 1050-1058.
- [42] 刘数华. 石灰石粉对复合胶凝材料水化特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2): 218-221, 242.

- [43] 饶美娟, 刘数华, 方坤河. 石灰石粉对水泥早期性能的影响[J]. 粉煤灰, 2010, 22(1): 5-7.
- [44] 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.
- [45] 乔春雨, 倪文, 王长龙. 较大偏高岭土掺量下水泥基材料的水化和性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 757-762.
- [46] 陈登, 宋旭艳, 王爱国, 等. 偏高岭土对石灰石粉-水泥水化和强度的影响[J]. 非金属矿, 2020, 43(4): 37-40.
- [47] 邓国颂, 杨东杰, 庞玉霞, 等. 减水剂对水泥水化过程的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(3): 5-7, 14.
- [48] 刘吉兰. 聚羧酸减水剂对水泥水化历程的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2009, 23(2): 124-126.
- [49] 王子龙, 丁建彤, 蔡跃波, 等. 缓凝剂对补偿收缩胶凝体系水化放热的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 2144-2149.
- [50] 王宝民, 王立久. 超缓凝剂对硅酸盐水泥水化的影响[J]. 建筑材料学报, 2003(1): 90-94.
- [51] 苏忠纯, 韩立刚, 曹忠露, 等. 膨胀剂对大掺量矿物掺合料混凝土水化和收缩性能的影响[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(8): 28-32.
- [52] 张泽平, 樊丽军, 李珠, 等. 玻化微珠保温混凝土初探[J]. 混凝土, 2007(11): 46-48.
- [53] 黄开林, 李书进, 臧旭航. 不同类型再生细骨料对保温混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2341-2347, 2379.
- [54] Shang, X., Qu, N. and Li, J. (2022) Development and Functional Characteristics of Novel Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, **324**, Article ID: 126666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126666>
- [55] Asim, M., Uddin, G.M., Jamshaid, H., et al. (2020) Comparative Experimental Investigation of Natural Fibers Reinforced Light Weight Concrete as Thermally Efficient Building Materials. *Journal of Building Engineering*, **31**, Article ID: 101411. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101411>
- [56] 田野. 复掺矿物掺合料混凝土性能及抗裂机理、微观特性研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [57] 黄兰可. 芒稻河特大桥面板混凝土施工期裂缝与温度应力关系规律研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(2): 101-106.
- [58] 张子明, 周红军, 赵吉坤. 温度对混凝土强度的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004(6): 674-679.
- [59] 陈丽红. 不同温度作用后混凝土强度变化规律的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007(5): 118-121.
- [60] 余志武, 资伟, 匡亚川, 等. 受热温度和时间对混凝土抗压强度的影响[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(2): 111-114.
- [61] 王峥. 混凝土高温后力学性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [62] 陈晓婷, 赵人达. 高温对混凝土孔隙率及渗透性影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(2): 11-14.
- [63] 姜福香, 于奎峰, 赵铁军, 等. 高温后混凝土耐久性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(2): 32-34.
- [64] 王树和, 水中和, 玄东兴. 大温差环境条件下混凝土表面裂缝损伤[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006(S2): 122-125.
- [65] 韩丰. 高温后混杂纤维自密实混凝土力学性能和水渗性能研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [66] 黄杰. 混杂纤维混凝土力学性能及抗渗性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工业学院, 2012.
- [67] 靳炳强. 干旱寒冷地区铁路冬季施工混凝土质量控制技术[J]. 铁道建筑, 2014(10): 123-126.
- [68] 李东, 彭程. 混凝土结构跳仓作业方案设计难点与温度应力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 471-479.
- [69] 刘亚朋, 李盛, 王起才, 等. 筏板基础大体积混凝土温度裂缝控制措施分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2562-2568.
- [70] 王潘绣, 宣卫红, 王瑶, 等. 大体积混凝土基础动态养护控制因素分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(20): 124-130.
- [71] Chen, G., Ding, X., Cai, M., et al. (2019) Analytical Solution for Temperature Field of Nonmetal Cooling Pipe Embedded in Mass Concrete. *Applied Thermal Engineering*, **158**, Article ID: 113774. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113774>
- [72] Tasri, A. and Susilawati, A. (2019) Effect of Material of Post-Cooling Pipes on Temperature and Thermal Stress in Mass Concrete. *Structures*, **20**, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.015>
- [73] 程雨. 相变材料在水工混凝土温控中的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [74] 杨勇康, 张雄, 陆沈磊. 相变材料用于控制混凝土水化热的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(5): 9-11.
- [75] 史巍, 张雄, Dreyer J. 相变储能大体积混凝土的控温性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 564-568.

- 
- [76] 唐林, 李正超, 牟哲. 满拉水利枢纽工程冬季混凝土施工措施[J]. 水利水电技术, 2000(12): 32-33.
- [77] 金书成, 徐文远, 黄云涌. 冬季承台大体积混凝土分层浇筑温控措施研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11): 55-58.
- [78] 陈广峰, 陈建平, 乔宏霞, 等. 涡流效应在混凝土冬季施工中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2004(2): 113-115.
- [79] Yu, Y., Jin, Z., Shao, S., *et al.* (2021) Evolution of Temperature Stress and Tensile Properties of Concrete during Steam-Curing Process. *Construction and Building Materials*, **305**, Article ID: 124691.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124691>