

相变材料在建筑施工期温度调控中的应用研究

方宣崇

赣州市第一建筑工程集团有限公司 江西赣州 341001

摘要: 相变材料 (PCM) 凭借其在相变过程中吸收或释放大潜热而温度保持不变的特性, 为解决建筑施工期的温度调控难题提供了创新途径。建筑施工中, 大体积混凝土的水化热、季节性温差及昼夜温度波动均会引发温度裂缝、影响施工质量与进度。传统温控措施存在工序繁琐、效果不稳定等局限。相变材料的应用, 通过其储热与放热机理, 能够有效缓冲温度波动, 将混凝土内外温差控制在安全范围内。其应用关键在于根据不同施工场景选取适宜相变温度、潜热容量及稳定性的材料, 并通过微胶囊、宏胶囊或定型封装技术解决泄漏问题, 确保与混凝土、砂浆等基材的良好相容性。在实际应用中, 相变材料可掺入大体积混凝土内部抑制水化热峰值, 集成于临时围护结构调节施工环境温度, 或制成养护制品用于冬季混凝土保温。这些应用方式显著提升了温控效果, 保障了工程质量, 并优化了施工效率与能耗。

关键词: 相变材料; 建筑施工; 温度调控; 水化热

引言

建筑施工是一个对环境温度极为敏感的过程, 温度的异常波动是导致工程质量缺陷、引发安全隐患和延误工期的重要因素。特别是在大体积混凝土浇筑中, 水泥水化释放的巨大热量易造成结构内外温差过大而产生温度裂缝; 而在季节性施工中, 夏季高温与冬季低温则会严重影响混凝土的正常凝结与强度发展。传统的温控手段, 如预埋冷却水管、覆盖保温材料等, 往往存在施工复杂、能耗高、控制精度不足等问题。相变材料作为一种能够以潜热形式储存和释放能量的功能性材料, 为精准、高效地调控施工期温度提供了全新的技术思路。因此, 深入研究相变材料在建筑施工温度调控中的应用机理、材料选取与封装技术, 并探索其具体应用方式, 对于革新传统施工工艺、提升建筑工程质量与耐久性具有重大的理论价值与广阔的应用前景。

一、建筑施工期的温度问题与相变材料的调控机理

(一) 大体积混凝土水化热引起的温度裂缝问题

大体积混凝土在浇筑完成后, 水泥与水之间发生剧烈的水化反应, 这一过程会释放出大量的热量。由于混凝土本身导热性能较差, 这些热量在构件内部不断积聚, 难以快速向外部环境散发, 从而形成了显著的“内高外低”的温度分布梯度。当混凝土内部最高温度与表面温度之间的差值超过 25°C 时, 由于热胀冷缩效应, 内部混凝土膨胀受到外部约束形成压应力, 而表面混凝土则承

受拉应力。一旦表面拉应力超过混凝土的抗拉强度 (其典型值为 $2\text{--}3\text{MPa}$), 混凝土表面即会产生温度裂缝。这类裂缝通常呈纵向或横向分布, 严重时甚至贯穿整个构件, 对结构的整体承载能力、安全性和长期耐久性造成显著不利影响。

为控制温度裂缝, 传统上常采用分层浇筑工艺 (每层浇筑厚度一般不超过 30cm) 或在混凝土中预埋冷却水管。分层浇筑虽可降低单次水化热总量, 但也增加了施工缝的数量, 提高了界面渗漏的风险; 冷却水管需在浇筑前铺设、浇筑后通水冷却, 并在适当时间拆除, 工序复杂、成本较高, 且水管易被水泥浆体堵塞, 导致降温效果不稳定甚至完全失效。另外, 水泥水化放热的高峰期多出现在浇筑后的 3 至 7 天, 传统温控方法往往难以动态适配水化热的释放节奏, 控温精度不足, 效果波动较大^[1]。

(二) 季节性温差对施工质量的影响

季节性温度变化对混凝土施工质量具有直接而深远的影响。在夏季高温条件下, 混凝土拌合物的出机温度易超过 30°C , 导致初凝时间缩短至 $2\text{--}3$ 小时, 工人操作时间紧张, 难以实施充分振捣, 因此混凝土易出现蜂窝、麻面等缺陷; 同时, 高温加速表面水分蒸发, 混凝土塑性收缩加剧, 引发表面干缩裂缝, 降低其密实性与整体性。

而在冬季低温环境 (日平均气温低于 5°C) 中, 水泥水化速率急剧下降, 混凝土强度发展迟缓, 7 天抗压强度往往只能达到设计强度的 $40\%\text{--}50\%$ 。如果未采取有效

的保温防冻措施，混凝土中的游离水分会结冰膨胀，产生冰晶压力，破坏水泥石结构，导致内部孔隙率增加、后期强度无法满足设计要求。

即便在春秋季节，昼夜温差也可达15–20℃，混凝土构件白天受热膨胀、夜间冷却收缩，每日经历温度应力循环，长期反复作用下易发生疲劳裂缝。例如某住宅项目楼板施工时，正逢春季昼夜温差较大，由于未及时采取覆盖保温措施，混凝土表面出现多条宽度在0.2–0.3mm的收缩裂缝，最终不得不进行注浆修复，导致工期延误达10天，增加了修复成本并影响整体进度。

（三）相变材料的储热与放热机理

相变材料（Phase Change Materials, PCMs）在土木工程温度控制中的应用，主要依托其独特的相变潜热特性：在物态转变过程中，PCM能够吸收或释放大潜热，而材料自身温度几乎保持恒定，从而实现能量的储存与调节。其温控机理基于可逆的物相变化：当环境温度升高至PCM的相变点时，材料从固态转变为液态（或从一种结晶态转变为另一种），该过程吸收周围环境中的热量，抑制温度上升；当环境温度下降至相变点以下时，PCM则由液态恢复为固态，同时释放原先储存的潜热，减缓温度降低趋势。

举例来说，针对大体积混凝土温度控制所开发的相变材料，其相变温度通常设定在50–70℃之间，以匹配水泥水化放热的峰值区间。当混凝土内部因水化热温度上升至60℃左右时，PCM发生相变并吸收热量，从而抑制温升过快、避免温度峰值过高；待混凝土温度开始下降至55℃附近时，PCM反向相变释放热量，延缓混凝土冷却，有效减小内外温差。通过这种“吸热–放热”的动态循环，相变材料可显著平复温度波动，将大体积混凝土的内部与表面温差始终控制在25℃的安全范围之内，提升抗裂性能与长期耐久性^[2]。

二、适用于建筑施工的相变材料选取与封装技术

（一）相变材料的热物性选取原则

在建筑工程中，相变材料的热物理性能必须经过精确设计与选择，以确保其能够充分适应不同施工阶段的温度控制需求。具体选取原则主要包括以下三个方面：第一，相变温度需与实际施工工况严格匹配。例如，大体积混凝土结构在硬化过程中释放大量化热，此时应选用相变温度在50–70℃区间的材料，以吸收并储存热量，抑制内部温升；在冬季低温施工环境下，应选择相变温度介于10–20℃的材料，覆盖于混凝土表面，减缓热量散失，防止冻害发生；而在夏季高温条件下，围护

结构宜选用相变温度在30–40℃的材料，通过相变吸热降低室内外热传递，提升建筑的热舒适性。第二，材料需具备充足的潜热容量，这是实现高效储热与释热的基础。通常要求单位质量相变材料的潜热值不低于150kJ/kg，潜热越高，单位材料可储存或释放的热量越大。若潜热不足，将导致温控时间缩短，难以覆盖如混凝土早期强度发展的关键养护阶段（一般为7天左右），影响工程质量。第三，材料应具有良好的导热性能和稳定的化学特性。导热系数建议不低于0.2W/(m·K)，以保证热量能够及时在材料中传递，避免因热响应滞后而影响控温精度；同时，材料在施工周期内（通常为1至3个月）应保持物化性能稳定，不发生分解、挥发，也不与水泥、钢材等常见建材发生腐蚀性反应。

（二）相变材料的封装形式与稳定性

由于许多常用相变材料（特别是一些固–液相变类型，如石蜡和聚乙二醇）在发生物态变化时容易出现泄漏和流失问题，必须借助有效的封装技术来提升其工程适用性与长期稳定性。目前常见的封装形式主要分为三类：第一类是微胶囊封装，即将相变材料包裹于直径约1–100微米的高分子壳体中。这种封装形式分散性优良，可均匀拌入混凝土或砂浆中使用，有助于实现整体温控；但其制备工艺相对复杂、成本较高，且在搅拌与振捣过程中胶囊外壳易发生破损，实际工程中掺量一般需控制在2%–5%以内。第二类为宏胶囊封装，通常采用直径在5–50mm范围的塑料或金属容器封装相变材料。该形式单胶囊储热容量大、潜热利用效率高，尤其适用于填充建筑围护结构的空腔部分；然而，这类胶囊抗机械冲击性能较差，施工现场易因挤压、碰撞导致破裂，因此需配合保护构造使用。第三类为定型封装，通过多孔介质（如膨胀石墨、硅藻土、岩棉等）对相变材料进行吸附，形成具有一定形状的稳定复合体。这种形式根本性地避免了泄漏风险，同时多孔骨架还可增强整体导热能力；其常见应用场景包括混凝土养护毯、建筑保温板等；不足之处在于单位体积的潜热值通常较低，约在120–150kJ/L，因此用量需相应增加^[3]。

（三）相变材料与建筑基材的相容性

为保证相变材料在建筑施工中的有效应用，必须确保其与常用建筑基材（如混凝土、砂浆、金属围护板等）之间具备良好的相容性，避免因材料间相互作用导致性能下降或出现分离失效。在混凝土相容性方面，当采用微胶囊相变材料掺入时，需确保其外壳材料不与水泥水化产物（如氢氧化钙）发生化学反应，同时也不应

显著影响新拌混凝土的工作性。工程中通常要求,在掺量不超过3%的条件下,混凝土坍落度经时损失应控制在10%以内,28天抗压强度损失不得超过10%,以满足结构设计强度需求。在与围护材料相容性方面,若将相变材料与聚苯乙烯泡沫板、彩钢板等复合使用,必须选用专用黏结剂保证界面结合牢固,避免出现分层或脱落;同时,应考虑相变材料在相变过程中发生的体积变化(通常有5%~10%的膨胀),其应力不应导致基材开裂或变形。在与养护材料的相容性方面,例如使用相变材料改性砂浆作为表面养护层时,要求该砂浆与混凝土基层黏结可靠,在温湿度变化条件下不发生起壳、脱落,以保证热量能够高效传递,维持适宜的养护温度。

三、相变材料在建筑施工期温度调控的应用方式

(一) 相变材料在大体积混凝土中的应用

在大体积混凝土浇筑前,将微胶囊相变材料按2%~4%的质量比掺入拌合料中,搅拌均匀后浇筑,可有效抑制水化热峰值、缩小温差。某商业综合体基础承台(体积800m³,混凝土强度等级C40)施工中,选用相变温度60℃、潜热180kJ/kg的石蜡基微胶囊,掺量3%。浇筑后监测显示:混凝土内部最高温度从传统方案的78℃降至73℃,内部与表面温差稳定控制在20℃以内,未出现温度裂缝;较预埋冷却水管方案,减少了水管采购、安装、拆除工序,施工效率提升15%,同时节省水资源消耗约200m³。此外,相变材料的放热作用延长了混凝土内部高温持续时间,7天强度达设计值的75%,较传统方案提升10%。

(二) 相变材料在临时围护结构中的应用

针对季节性温差,将相变材料集成到临时围护结构中,可维持施工环境温度稳定。夏季施工时,采用内覆定型相变材料(相变温度35℃、潜热160kJ/kg的聚乙二醇/膨胀石墨复合材料)的彩钢板围护:白天室外温度超38℃时,相变材料吸收热量,维持围护内温度不超35℃,避免混凝土初凝过快;某办公楼夏季楼板施工中,使用该围护后,混凝土初凝时间从2.5小时延长至4小时,振捣质量显著提升,表面蜂窝缺陷减少90%。冬季施工时,相同结构的围护可白天吸收太阳辐射热,夜间释放热量:某住宅小区冬季车库施工中,围护内平均温度较传统彩钢板高3~4℃,混凝土养护周期从14天缩短至12天,同时减少了电暖器使用,能耗降低30%^[4]。

(三) 相变材料在冬季施工养护中的应用

冬季混凝土施工完成后,采用相变材料养护制品覆盖表面,替代传统草帘、棉被,可保障强度发展。将相

变材料砂浆(水泥、砂、相变微胶囊按1:3:0.03比例混合)涂抹在混凝土表面,厚度8mm;砂浆中的相变材料(相变温度15℃、潜热140kJ/kg)在环境温度降至5℃时释放潜热,维持混凝土表面温度不低于8℃。某高速公路桥梁墩柱冬季施工中,采用该养护方式后,墩柱28天抗压强度达标率100%,未出现冻害;较传统草帘养护,减少了每日翻覆工序,养护人工成本降低40%。此外,也可使用相变养护毯(内层为相变材料层、外层为岩棉保温层):某厂房柱梁冬季施工中,养护毯覆盖后,柱梁表面温度波动幅度控制在2℃以内,强度发展均匀,避免了局部强度不足问题^[5]。

结语

相变材料在建筑施工期温度调控中的应用,体现了材料科学与工程实践深度融合的智慧。它不再是被动的温度隔绝,而是主动的能量调节,通过“吸热-放热”的循环,为脆弱的混凝土结构营造了一个相对稳定的“微气候”。从抑制内部水化热的剧烈释放,到抵御外部环境的温度侵扰,相变材料的应用贯穿了施工的关键环节,不仅有效解决了传统温控技术的痛点,更在提升施工效率、降低能耗方面展现出显著优势。展望未来,随着相变材料性能的持续优化和成本的逐步降低,以及与智能监测技术的结合,其在建筑施工领域的应用将更加广泛和精细化,为建造更安全、更耐久、更绿色的建筑提供坚实的技术支撑,推动建筑行业向着更加精细化、可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1] 樊冬姁, 刘丽霞, 陆亚清. 光热转换相变储能材料的研究进展[J]. *Hans Journal of Nanotechnology*, 2022, 12. DOI: 10.12677/NAT.2022.124035.
- [2] 陈若颖, 苏云, 王云仪. 相变材料在消防服中的应用研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2020.
- [3] 陈国强. 探析相变材料在建筑节能中的应用[J]. *科学大众*, 2021, 000(004): P.140-141.
- [4] 冯国军, 冯萃敏, 康建伟, 等. 相变储能材料在地源热泵建筑中应用效果的模拟研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(4): 6. DOI: CNKI: SUN: XXJZ.0.2020-04-030.
- [5] 蒋敏, 方万军. 相变材料在建筑节能中的应用研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(4): 3. DOI: CNKI: SUN: XXJZ.0.2020-04-035.