

在不同气候条件下提高多层建筑围护结构能源效率的相变材料（水泥-石灰砂浆）

贡萨洛·帕洛玛, 辛西娅·巴伦, 艾琳·瓜迪亚

所属单位: 西班牙建筑系

摘要: 相变材料由于其储能能力, 是提高建筑围护结构能源效率的有效材料。在加热和冷却循环下, 本研究评估了使用五种不同成分的相变材料水泥-石灰砂浆的多层建筑围护结构的热能行为。在 $15^{\circ}\text{C}-82\%\text{RH}$ (冷却) 和 $30^{\circ}\text{C}-33\%\text{RH}$ (加热) 的气候条件下, 作者研究了含有20%的微胶囊相变材料和其他添加物 (如纤维素纤维和珍珠岩, 一种轻质骨料 (LWA)) 的水泥-石灰砂浆的行为, 这些条件是通过气候室应用的。在实验室测试中, 多层围护结构两侧的温度和热通量是通过实验测量的。相变材料水泥-石灰砂浆层两侧的温度也进行了测量。据观察, 加入相变材料水泥-石灰砂浆层后, 通过围护结构的热通量有所延迟。在一个加热周期内, 相变材料的加入使热浪前沿的到来延迟了30分钟 (与没有相变材料的参考砂浆相比, 延迟了8.1%)。在加入相变材料后的冷却循环中, 与参考混合物相比, 热浪前沿的到来延迟了40.6% (延迟了130分钟)。此外, 在相变材料水泥-石灰砂浆中加入LWA还改善了热绝缘性, 进一步提高了建筑围护结构的能源效率, 不仅可用于新建建筑, 还可用于现有建筑围护结构的能源修复。

关键词: 相变材料; 能源效率; 水泥-石灰砂浆

PCM Cement-Lime Mortars for Enhanced Energy Efficiency of Multi-layered Building Enclosures under Different Climatic Conditions

Gonzalo Palomar, Cynthia Barluen, Irene Guardia

Affiliation: Department of Architecture, Spain

Abstract: Phase change materials (PCMs) are promising materials for the energy efficiency improvement of building enclosures, due to their energy storage capacity. The thermal behaviour of a multi-layered building enclosure with five different compositions of PCM cement-lime mortars was evaluated under heating and cooling cycles. The behaviour of cement-lime mortars with 20% of microencapsulated PCM mixed with other additions, such as cellulose fibres and perlite, a lightweight aggregate (LWA), were studied under climate conditions of $15^{\circ}\text{C}-82\%\text{RH}$ (cooling) and $30^{\circ}\text{C}-33\%\text{RH}$ (heating) that were applied with a climatic chamber. Temperature and heat flux on both sides of the multi-layered enclosure were experimentally measured in laboratory tests. Temperature was also measured on both sides of the PCM cement-lime mortar layer. It was observed that the addition of the PCM cement-lime mortar layer delayed the heat flux through the enclosure. During a heating cycle, the incorporation of PCM delayed the arrival of the heat wave front by 30 min (8.1% compared to the reference mortar without PCM). The delay of the arrival of the heat wave front during the cooling cycle after adding PCM, compared to the reference mixture, reached 40.6% (130 min of delay). Furthermore, the incorporation of LWA in PCM cement-lime mortars also improved thermal insulation, further increasing energy efficiency of the building enclosure, and can be used not only for new buildings but also for energy rehabilitation of existing building enclosures.

Keywords: Phase change materials (PCMs); Energy efficiency; Cement-lime mortar

引言:

根据当今的热学和声学标准, 传统建筑的特点是能源消耗大, 噪音控制低。因此, 改善居住条件已成为修复技术和材料的主要关注点。建筑物的修复往往需要修复或替换涂层砂浆, 因为它们的性能已经丧失。涂料砂浆可以被设计成满足现在的热和声要求。然而, 当传统的水泥砂浆被用作修复材料时, 由于可溶性盐的含量和与传统石灰砂浆相比的高强度, 会出现一些病症。除了热学和声学性能, 新砂浆的设计还应考虑其他方面: 功能要求(保护、美学、结构、使用寿命和施工问题); 基于外部或内部应用的技术要求; 以及性能要求(对砂浆和抹灰的一般和具体技术要求)。

如今, 为提高现有建筑的能源效率而设计新的建筑材料是一个热门研究课题。相变材料(相变材料)由于其在一定温度下的相变能力所提供的热性能, 已经成为建筑和建筑修复方面具有巨大潜力的材料。在相变过程中, 材料在温度保持不变的情况下吸收或释放热量(潜热), 起到储热的作用。根据其性质, 主要有两类相变材料, 即有机和无机。有机相变材料通常是石蜡、脂肪酸, 以及两者的混合物。有机相变材料的特点是它们的化学和热稳定性, 熔化和凝固时不会发生分解或改变其特性, 并且没有腐蚀性。它们的主要缺点是热导率低和相变焓低。

因此, 在建筑材料中使用相变材料被视为改善新建筑和现有建筑热性能的一个有希望的解决方案。许多住宅单元的围护结构隔热性能差, 导致了高能源成本。提高能源效率的最常见的解决方案是通风的外墙和外部热绝缘复合系统(ETICS)。然而, 这些解决方案没有考虑到外墙的热惯性, 在夏季条件下显示出较差的性能。此外, 由于外墙厚度的增加, 这些解决方案对现有建筑的适应性很低。相变材料被提出来作为克服这些限制的解决方案。

在不同类型的相变材料中, 最常用于建筑和建材的是微胶囊石蜡, 其特点是热和化学稳定性, 在本研究使用的温度范围内其性能没有明显变化。它们也可以以有竞争力的价格在市场上买到。然而, 石蜡具有低热导率和低相变焓。

不同的作者在建筑材料中加入了这种微胶囊相变材料, 如水泥、石膏或水泥-石灰砂浆。此外, 还可以加入其他添加物, 如纤维(纤维素)和轻质骨料(LWA), 以提高砂浆的保温能力。一些作者研究了在砂浆中结合使用相变材料和这些添加物, 同时利用相变材料的储能

能力和热绝缘能力。研究发现, 相变材料的效率不仅取决于相变材料的数量, 而且还取决于砂浆的其他成分。加入的相变材料数量改变了灰泥的一些热、物理和机械性能。温度范围和变化也影响了相变材料改性砂浆的效率。

材料性能的实验特征是评估其应用于建筑目的可能性的第一步。然而, 新设计的材料对改善建筑围护结构的实际效果只能通过考虑真实围护结构的多层组成来进行全面评估。因此, 一些作者通过评估在不同气候条件下具有增强性能的新砂浆来研究多层试样的行为。气候室可以用来测试特定的热条件, 模拟真实的环境条件。结论是, 相变材料对多层围护行为的影响取决于气候条件(夏季/冬季)。

本文对多层砖墙围护结构在不同气候条件下的行为进行了研究, 该围护结构包括不同的水泥-石灰砂浆, 并添加了20%的相变材料微胶囊石蜡、LWA(膨胀珍珠岩)和纤维素纤维。该研究的目的是评估砂浆层和整个围墙在不同气候条件下的热行为。为此, 使用了一个气候室, 对加热(从15°C到30°C)和冷却(从30°C到15°C)循环进行编程, 并评估了通过试样的温度和热通量。

材料和方法

本文对五种相变材料改性的水泥-石灰砂浆进行了分析。实验程序评估了相变材料在液态和固态下的物理和机械性能以及导热性。另外, 本研究分析了围墙内层和围墙外侧的温度, 还测量了围墙内外的热通量。

材料和砂浆的组成

使用的水泥是西班牙马德里Cementos Portland Valderrivas公司生产的名为BL II/B-L 32.5 N的白色类型水泥:

- (1) CL 90-S是添加到该组合中的空气石灰。
- (2) 细骨料是一种硅质砂, 尺寸在0-4毫米之间。
- (3) 使用的轻质骨料(LWA)是一种膨胀珍珠岩。
- (4) 本研究中使用的纤维(F)是长度为1毫米的短纤维素纤维-Fibracel® BC-1000(直径20微米)。
- (5) 本研究选择的相变材料(相变材料)是一种微胶囊石蜡, 熔点约为 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 这种相变材料的体积密度约为 $300-400 \text{ kg/m}^3$, 颗粒大小在 $50-300 \mu\text{m}$ 之间。

首先, 作者生产了一种参考水泥-石灰砂浆(C)。该砂浆的水泥: 石灰: 骨料比例为1: 0.5: 4.5(体积)。之后, 按体积加入20%的相变材料(C20)。为了提高砂浆的保温能力, 加入了1.5%的干纤维素纤维, 考虑到新鲜砂浆的总体积(关于参考砂浆)(CF20)。

此外, 50% 的沙子被轻质骨料取代 (CL20)。最后, 加入纤维和珍珠岩 (CLF20) 来设计两种添加物的混合物。水和粘合剂的比例 (w/b) 不同, 以使所有的混合物具有相似的新鲜工作性。最小的抗压强度目标是 3.5 兆帕, 相当于 CS-III 级渲染砂浆。实验室里的混合过程开始混合所有的干燥成分, 然后加入液态水, 混合过程最多需要 5 分钟。

实验方法

硬化性能和热参数

根据 UNE-EN 1015-3: 2000 的规定, 本研究使用流动台试验来测量新鲜砂浆的稠度。为了达到塑性稠度, 水和粘合剂的比例被调整了。硬化状态的特性是在 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的试样上进行的。24 小时后, 样品脱模, 水固化 28 天 ($21 \pm 3^\circ\text{C}$ 和 $95 \pm 5\% \text{RH}$)。体积密度 (D) 和开放孔隙率 (OP) (可接触到的水) 是用静水表 (UNE-EN 1015-10) 计算的。根据 UNE-EN 1015-19, 水蒸气扩散阻力系数 (VD) 被测量。VD 是通过湿杯法测量的。本研究使用了直径为 35 毫米、厚度为 40 ± 2 毫米的圆柱形试样, 并进行了饱和盐水溶解。28 天后, 根据 UNE-EN 1015-11: 2000 对标准试样进行了抗压和抗折强度 (CStr, FStr) 测试。

热导率 (λ) 是用一个热绝缘箱 (热箱法) 测量的。本研究使用了尺寸为 210 毫米 \times 210 毫米, 厚度为 24 ± 2 毫米的平板样品。测试期间的实验室条件是 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 和 $50 \pm 5\% \text{RH}$ 。热源被连接到一个热调节器上, 并位于绝缘箱内。放置在样品内外表面和盒子内外的传感器监测温度 (T) 和相对湿度 (RH)。箱内设置了两个不同的温度。25 $^\circ\text{C}$ 和 40 $^\circ\text{C}$ 。在箱内 25 $^\circ\text{C}$ 时, 测试样本保持在相变材料熔点以下, 而在箱内 40 $^\circ\text{C}$ 时, 所有板块都是 30 $^\circ\text{C}$ 。热导率 λ_S (相变材料处于固体状态时砂浆的导电性) 和 λ_L (相变材料处于液体状态时砂浆的导电性) 是在达到热稳定状态后用傅里叶定律计算出来的。

气候室测试设置

气候室被用来评估在不同气候条件下使用相变材料水泥-石灰砂浆的砖墙围墙的热行为。本研究选择了一个多层空心砖围护结构, 包括一个空心砖墙, 一个石膏基内饰和一个由 5 厘米 XPS 保温层覆盖的外部相变材料改性涂层砂浆。样品被放置在气候室的门内, 气候室的条件被修改以产生通过试样的热传递。

在气候室中测试了两种气候条件, 模拟了室外环境条件 (OUT): 一个加热循环和一个冷却循环。加热循环包括 15 $^\circ\text{C}$ 和 82% 相对湿度 (RH) 的初始稳定条

件, 之后变为 30 $^\circ\text{C}$ 和 33%RH。冷却循环遵循相反的顺序, 最初的稳定气候条件是 30 $^\circ\text{C}$ 和 33%RH, 然后变为 15 $^\circ\text{C}$ 和 82%RH。在室外, 实验室条件 (IN) 保持恒定在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 和 60%RH。试验室内的相对湿度被设定为限制水通过试样的运输。每个周期 (包括加热和冷却) 持续了 1400 分钟。在这两个循环中, 加热和冷却, 监测砂浆层两侧的温度, 以及围墙的外部 and 内部的温度。热通量也是用围墙每一侧的热通量板测量的, 用数据记录器记录两侧的瓦/平方米。

相变材料水泥-石灰砂浆的物理和机械性能

关于硬化砂浆的物理性能, 参考砂浆 (C) 显示了最高的体积密度 (D) 值, 正如预期的那样, 为 1900 公斤/立方米, 而含有 LWA 和纤维的相变材料砂浆 (CLF20) 显示了最低的密度, 为 1160 公斤/立方米。开放孔隙率 (OP) 值在 23.33% (CL20) 和 16.77% (CF20) 之间变化。至于研究中的混合物的水蒸气扩散阻力系数 (VD), C20 显示出最高的数值 (4.29), 而 CLF20 显示出最低的数值 (3.26)。

抗压强度 (CStr) 的结果指出, C 显示了最高值 (14.33MPa), 而 CLF20 显示了最低值 (5.33MPa), 这与密度值一致。尽管在混合物中加入 20% 的相变材料降低了 CStr, 但所有的砂浆都达到了 3.5MPa 的最低抗压强度目标值, 根据 UNE-EN 998-1, 这相当于 CS-III 级的渲染砂浆。

另一方面, 抗折强度 (FStr) 值在 3.36 MPa (C) 和 1.79 MPa (CL20) 之间。本文研究了相变材料砂浆在固态 (λ_S , $T < 22^\circ\text{C}$) 和液态 (λ_L , $T > 22^\circ\text{C}$) 下的导热性结果。可以看出, λ_S 在 0.30 W/mK (CF20) 和 0.20 W/mK (C20) 之间变化。此外, C20 的 λ_L 值最高, 为 0.28 W/mK, CLF20 最低, 为 0.18 W/mK。正如预期的那样, 添加 20% 的相变材料不仅改变了热性能, 而且还改变了其他硬化性能。机械性能, 如抗压和抗折强度随着相变材料的加入而下降。另一方面, 与没有相变材料的相同混合物相比, 加入相变材料后, λ_S 下降, 而 λ_L 增加。

使用相变材料砂浆的砖墙围护结构的实验测试结果和热分析

加热周期

砂浆层外侧 (XPS) 的初始温度在 20.80 $^\circ\text{C}$ (CF20) 和 19.00 $^\circ\text{C}$ (C20 和 CL20) 之间变化, 而在内侧 (B 侧), 温度在 C 的 21.40 $^\circ\text{C}$ 和 C20 和 CL20 的 20.60 $^\circ\text{C}$ 之间。关于最终温度 (气候室条件为 30 $^\circ\text{C}$ 和 33%RH), CF20 是 XPS 侧温度最高的混合物 (25.50 $^\circ\text{C}$), CL20 最低 (23.40 $^\circ\text{C}$)。

在砖墙一侧, 温度在 25.00 °C (CF20) 和 21.30 °C (CL20) 之间变化。

该层的平均温度可以对相变材料的固体或液体状态进行估计。正如在以前的研究中所验证的, 所使用的相变材料的相变温度为 22 °C。在所有情况下, 初始平均温度 (室内 15 °C) 都保持在 22 °C 以下。因此, 可以假设相变材料处于固体状态。另一方面, 由于加热周期结束时的平均温度高于 22 °C, 可以说在每个加热周期中, 所有情况下相变材料都从固态变为液态。关于砂浆板 (XPS 和砖墙) 两侧的温差, 可以看出, 最初的数值在 1.80 °C (C) 和 0.30 °C (CLF20) 之间, 而在最后, 它们在 2.10 °C (CL20) 和 0.40 °C (CLF20) 之间变化。

冷却循环

本研究在冷却周期中对砂浆层两侧的温度进行了监测, 这是在加热周期后进行的测试。由于围护结构试样的热惯性, 两侧的初始温度、砂浆层的平均温度和温度差与前几个加热循环结束时相比略有不同。所有混合物的初始平均温度都超过 22 °C, 所以相变材料处于液体状态。

关于最终温度, 在 XPS 侧, C 型混合物呈现最高值 (21.50 °C), CL20 呈现最低值 (19.70 °C), 而在 B 侧, 温度在 20.90 °C (C20 和 CL20) 和 21.70 °C (CF20) 之间。由于所有情况下的最终平均温度都低于 22 °C, 因此相变材料在冷却循环后处于固体状态。与加热循环期间发生的情况一样, 可以说在每种混合物的冷却循环期间, 相变材料的相位从固态变为液态。

CL20 是呈现最高值的混合物, 为 2.40 °C, 而 CF20 呈现最低值, 为 0.40 °C。最终值在 1.20 °C (CL20) 和 0 °C (C) 之间。此外, 当相变材料被纳入砂浆中时, 没有明显的差异。然而, 当纤维素纤维或 LWA 被加入时, 出现了一些差异。仅有 LWA 的砂浆在 C20 中没有显示出明显的差异, 尽管使用纤维素纤维 (有或没有 LWA) 增加了温度曲线的斜率, 特别是在围墙的内侧。

相变材料水泥-石灰砂浆层对砖墙围护结构在加热和冷却循环下的整体热性能的影响

加热循环

在试验过程中, 围墙外侧的温度不断上升, 直到 200 分钟时达到 30 °C, 直到试验结束时保持不变。墙体内侧的温度 (在实验室条件下) 在 200 分钟之前几乎是恒定的, 之后由于热波前的到来而略有增加。可以看出, 与没有添加相变材料的相同砂浆相比, 在水泥-石灰砂浆层中添加相变材料使内部温度降低了 1 °C。

外部温度没有差异。然而, 确定了两组内部温度

曲线, 与它们是否有纤维素纤维 (CF20 和 CLF20) 有关 (C20 和 CL20)。带有纤维的相变材料砂浆层的围栏比没有纤维的围栏的内部温度高 3 °C, 后者几乎没有达到 21 °C。对于在一个加热周期中在外壳两侧测量的热通量, 可以观察到外部高频的一般趋势, 最初急剧增加直到一个峰值, 随后快速减少, 然后缓慢减少, 直到最后稳定在一个稳定的热通量。

冷却周期

在试验过程中, 围墙外侧的温度下降, 直到 200 分钟时达到 15 °C, 直到试验结束时保持不变。墙体内侧的温度 (在实验室条件下) 在 200 分钟之前几乎是恒定的, 之后由于热波前的到来, 温度慢慢地略有下降。在水泥-石灰砂浆层中添加相变材料, 与不添加相变材料的相同砂浆相比, 内侧温度降低了 1 °C。对于使用不同成分 (C20、CF20、CL20 和 CLF20) 的相变材料砂浆的围墙温度的比较, 在所有情况下, 外侧测量的温度都遵循相同的曲线, 正如预期的那样。在内侧, 正如加热循环所发生的那样, 可以看到两组温度曲线, 对应于纤维素纤维的加入 (CF20 和 CLF20), 它们仍然比其他混合物高出大约 2 °C。

热通量 (HF) 曲线显示出与加热循环观察到的一般模式相似, 尽管在这种情况下热量向相反方向移动。外层 HF 的曲线从最初的急剧增加开始, 直到一个峰值, 随后快速减少, 最后缓慢减少, 直到稳定在一个稳定的热通量。对于外壳内侧的热通量, 曲线遵循一个总的趋势, 热通量显示出轻微的下降, 直到热波前线的到来, 之后适度增加, 直到达到稳定的稳态值。在冷却循环的情况下, 当砂浆从液态变为固态时, 相变材料的加入并没有引起砂浆热容量的明显变化。另一方面, 可以看到, 与没有纤维的混合物相比, 有纤维的混合物呈现出更高的初始温度。这种趋势随着时间的推移而持续。

结论

本文进行了一项实验研究, 以评估含有微胶囊相变材料的水泥-石灰砂浆的新围护方案在不同气候条件下的行为, 其中包括 LWA 和纤维。实验程序通过测量加热和冷却周期中的温度和热通量来评估砂浆层和整个围墙的热行为。这项研究的主要结论是:

(1) 在传统的水泥-石灰砂浆中加入相变材料改变了砂浆的物理、机械和热性能, 降低了密度和强度, 同时增加了蓄热能力。

(2) 加入轻质骨料和纤维也改变了砂浆的传热能力, 增加了一些已经被相变材料改善的性能。

(3) 相变材料水泥-石灰砂浆的热行为不仅取决于其成分, 而且还取决于它们所处的气候条件。

(4) 纤维素纤维的加入促进了通过砂浆层的热/冷传递, 增加或减少了砂浆的平均温度, 这可能不太有利, 特别是在加热条件下。

(5) 在加热周期中, 添加相变材料使热浪前沿的到来延迟了30分钟(8.1%)。在冷却循环中, 与不含相变材料的参考混合物相比, 添加相变材料使热波前线的到来延迟了130分钟(40.6%)。

(6) LWA降低了热传导率, 增加了热绝缘能力, 因此, 与相变材料储能能力产生了有利的耦合效应。因此, 与参考混合物相比, 在加热(19%)和冷却(68.7%)条件下, 相变材料和LWA的联合使用使围墙内侧的热波前明显延迟。

(7) 纤维素纤维和相变材料的组合显示出减少的协同效应, 但只是在加热条件下。

参考文献:

[1]Cabeza LF, Castell A, Cabeza LF, et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011; 15: 1675 - 1695.

[2]Ryms M, Klugmann-Radziemska E. Possibilities and benefits of a new method of modifying conventional building materials with phase-change materials (PCMs). *Constr. Build. Mater.* 2019; 211: 1013 - 1024.

[3]Rao VV, Parameshwaran R, Ram VV. PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A

review on research trends. *Energy Build.* 2018; 158: 95 - 122.

[4]Jayalath A, Nicolas RS, Sofi M, et al. Properties of cementitious mortar and concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Constr. Build. Mater.* 2016; 120: 408 - 417.

[5]Pavlik Z, Fort J, Pavlik M, et al. Modified lime-cement plasters with enhanced thermal and hygric storage capacity for moderation of interior climate. *Energy Build.* 2016; 126: 113 - 127.

[6]Lucas SS, Ferreira V, Aguiar B. Latent heat storage in PCM containing mortars—Study of microstructural modifications. *Energy Build.* 2013; 66: 724 - 731.

[7]Cunha S, Lima M, Aguiar B. Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars. *Constr. Build. Mater.* 2016; 127: 1 - 10.

[8]Mankel C, Caggiano A, Ukrainczyk N, et al. Thermal energy storage characterization of cement-based systems containing microencapsulated-PCMs. *Constr. Build. Mater.* 2019; 199: 307 - 320.

[9]Guardia C, Barluenga G, Palomar I, et al. Thermal enhanced cement-lime mortars with phase change materials (PCM), lightweight aggregate and cellulose fibers. *Constr. Build. Mater.* 2019; 221: 586 - 594.

[10]Palomar I, Barluenga G, Ball RJ, et al. Laboratory characterization of brick walls rendered with a pervious lime-cement mortar. *J. Build. Eng.* 2019; 23: 241 - 249.

