

综述与专论

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180878

相变控温调湿建筑复合材料的研究进展

崔艳琦

(华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: 相变控温调湿复合材料是近来开发的新型建筑材料, 由于这种材料具有发生相变时, 自动吸收或者释放热量和湿气, 调节室内环境空气的温度和相对湿度的特殊性能, 因此, 控温调湿材料的开发和在建筑中的应用研究, 已经成为国内外建筑和材料领域的研究热点。相变控温调湿复合材料应用在建筑中, 可以保持室内舒适的温度和湿度, 不仅有利于提高人们的工作效率和身体健康, 而且节约能源、减少二氧化碳排放, 保护环境。综述了各种控温调湿材料的制备技术以及主要的热湿性能, 总结了控温调湿材料的热湿理论模型, 概述了控温调湿材料在建筑中的应用成效, 提出了未来发展中需要解决的主要问题。对国内外控温调湿相变材料的全面综述和分析将为我国的建筑和材料领域的设计和研究提出新的思考。

关键词: 相变材料; 控温调湿材料; 建筑节能

中图分类号: TU 599

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) S1—0001—07

Research on development of composite phase change humidity-control material in buildings

CUI Yanqi

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: Composite phase change humidity-control material is a new type of building material developed in the recent years. Because of its unique property which could adjust the temperature and humidity of the indoor environment by absorbing or releasing the heat and moisture automatically during the phase change process, it has become a research spot in the field of building materials. The applications of composite phase change humidity-control material in buildings could maintain the comfortable indoor temperature and humidity. It not only helps to improve people's work efficiency and health, but also saves energy and reduces carbon dioxide emissions. This paper reviewed the preparative techniques, main hydrothermal properties, the theoretical model and the application effects in buildings of the composite phase change humidity-control material. Then it points out the main issues needed to be addressed in the future development. It is believed that this paper could propose new ideas for the researchers working in the field of building materials in China.

Key words: phase change materials; composite phase change humidity-control material; energy efficiency in buildings

引言

人一生中大部分的时间是在建筑里度过, 因此, 建筑室内的热湿环境对人的健康和工作效率有着十分密切的关系。据有关研究表明, 当室内的温

度为 20~26℃时, 人的身体感觉最舒服, 思维最活跃, 学习和工作的效率最高, 当温度高于或者低于此温度范围时, 学习和工作效率明显下降^[1]。同时, 当室内的相对湿度较高时, 会影响人体皮肤水分的蒸发, 促进各种酶菌的增长, 导致各种皮肤病; 但

2018-08-01 收到初稿, 2018-08-08 收到修改稿。

联系人: 崔艳琦 (1979—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2018-08-01.

Corresponding author: CUI Yanqi, 1328313514@qq.com

当室内的湿度较小时,会造成人体皮肤干燥,产生眼睛发炎等疾病^[2]。空气相对湿度大于 80%时,会导致人的风湿关节炎或者类风湿关节炎的发作^[3]。室内湿度较大时,还会增加空气中污染物对空气质量的影响^[4]。人体内大部分的水分是通过皮肤的汗腺蒸发的,这与环境的相对湿度有关^[5]。为了改善室内的热湿环境,目前,人们主要是采取主动式的控温和调湿,例如采用空调机降温或者采暖,采用除湿机进行湿度的调节,这些主动式的机器控温和调湿,不仅要消耗大量的能源,而且由于室内的长期封闭,严重影响室内的自然通风,往往容易造成人的室内综合征疾病^[6]。国内外许多学者为了降低建筑空调的能耗,减少二氧化碳的排放,改善建筑室内居民的温度舒服程度,广泛开展了相变材料被动式的储能控温的研究和应用工作,并且已经取得了显著的研究成果^[7-8]。他们利用相变材料(PCM)发生相变时可以吸收或者释出大量的潜热,并保持自身温度恒定的特殊性能,把相变材料应用于建筑,制备成相变墙体、相变门窗、相变天花板、相变空调等^[9-12]。当建筑环境内空气的温度超过相变材料的相变温度时,相变材料便发生融化并且吸收环境的热量,降低环境的温度,当环境空气的温度低于相变材料的相变温度时,相变材料便发生固化,向环境释出热量,提高环境的温度,这样周而复始的循环过程,控制室内的温度在较适宜的范围,既满足了人的舒服温度,同时又可节约能源,这已成为国内外低碳建筑研究和应用的热点课题^[13-14]。随着经济社会的发展,人们生活水平的不断提高,人们对生活质量的要求也越来越高,不仅要求适宜的室内温度,而且还要求有适宜的湿度环境^[15]。此外,近三十年来,世界石油危机,石化能源产生的二氧化碳污染环境,造成全球气候变暖,威胁着人类的生存和发展,人们对社会可持续发展的重要性认识不断地加深^[16]。据有关研究表明,造成全球气候变暖的主要原因是石化能源产生的二氧化碳,其中建筑领域消耗的能源占人类消耗能源总量的 30%~40%,产生的二氧化碳占总量的 33%^[17-18]。在建筑耗能中,空调降温和取暖占建筑总能耗的 47%^[19]。因此,为了节约能源的消耗,减少二氧化碳的排放,保护生态环境,科研人员围绕着能源和人类社会的可持续发展课题开展了各方面的研究,并在建筑节能以及新能源、新材料、新技术和新工艺等方面都已取得卓越的研究成果,产生了明显的环境效益。在这些众多新能源技术中,相变储能技术是一种既

节约能源又可以使环境保持良好热舒适度的新节能技术^[20-22]。这种储能技术是利用相变材料(PCM)相变过程可以吸收或者释放能量,而相变过程中保持温度恒定在一定范围的特殊性能,制备成空气温度调控设备,在温度控制过程中,不用或者少用动力能源,达到节约能源的目的^[23-24]。本文综述了国内外相变被动式的控温调湿复合材料以及其在建筑领域的研究和应用的最新研究成果,以供有关科研人员参考。

1 相变控温调湿材料热湿传递理论研究

建筑热湿传递模型是通过数学的方法,建立起在建筑结构里传热传湿过程的相互关联性,从而可以计算出结构内部温度和湿度的分布状况,为建筑设计提供依据。该理论模型首先是由 Künzle^[25]提出,起初只是用于求解建筑墙体内部温度和湿度的分布情况。在此基础上,国内外许多学者经过长期的应用研究和补充,建立了各种相变控温调湿建筑材料在建筑里的热湿传递模型。在建筑材料的热湿耦合传递理论方面,Vries^[26]提出了以温度梯度和湿度梯度为推动势的双场耦合理论模型。之后,Luikov 提出将不可逆热力学方法引入多孔介质热湿迁移的研究,建立了关于温度、湿分、压力的三场梯度驱动模型^[27-28]。郭兴国等^[29]以 Fourier 定律和 Fick 定律为理论基础,用墙体的空气含湿率和温度作为驱动势,将空气含湿率看作是材料含湿量和温度的函数,建立起多层墙体热湿传递模型。在相变复合材料的热湿耦合传递理论方面,Darkwa 等^[30]建立了含有相变材料的石膏板三维能量方程,研究了相变储湿复合材料的热湿耦合传递模型。张浩^[31]研究了石膏基相变储湿复合材料热湿耦合传递机理,建立了以温度和相对湿度为热湿迁移驱动势的石膏基相变储湿墙体热湿耦合传递模型,提出热传递和湿传递的控制方程。陈智^[32]研究了相变复合材料的热湿耦合传递模型,并通过分析相变材料的特性,建立了热湿耦合相变焓的计算方法,公式如下

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k^w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D^w \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{\text{dry}} \frac{\partial H_{\text{dry}}}{\partial \tau} + \omega c_{\text{vapor}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\omega} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial P_{\text{sat}}}{\partial x} \right) \quad (3)$$

黄子硕等^[33]研究了四种复合建筑材料的调湿

规律,建立了以下方程

$$Y(t) = u_{12} \left(a + \int_1^t a x^b dx \right) \quad (4)$$

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^t y_i - Y(t)}{\sum_{i=1}^t y_i} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)表明实验测量值与式(4)计算值的相对误差。

张明杰等^[34]研究了以火山石、海泡石、沸石等制备的复合调湿材料应用于建筑中,房间的热湿传递模型为

$$V_{\text{zone}} \frac{d\omega_{\text{air}}}{dt} = M_v + G_l - B_l \quad (6)$$

$$\rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} V_{\text{zone}} \frac{dT}{dt} = Q_v + G_s - B_s \quad (7)$$

以上相变控温调湿材料的热湿传递理论为进一步开展这些新材料的研究和应用提供了基础理论和设计计算的依据。

2 相变控温调湿复合材料的制备研究

要实现相变被动式的控温和调湿,既满足人的舒适温度和湿度的环境条件,又节约能源,降低二氧化碳的排放,实现建筑的可持续发展,相变建筑材料的合成是关键。相变材料自在建筑节能中应用以来,得到广大学者的认同和关注^[35-39]。但是由于建筑用相变材料一般要求的相变温度范围较小,传热系数也不大,影响了相变材料在建筑节能中的应用推广效果,因此,提高相变材料的传热效果是目前该领域的研究热点。目前,有关学者使用添加金属粉或金属氧化物等方法,提高相变材料的导热性能,但是,在实际的应用中,由于金属与相变材料的相容性差等问题,造成在实际应用中受到限制。近年,有学者研究报道在制冷剂中添加一种由纳米材料制成的添加剂等,可改善相变材料的热力学性质、传热性能和流动性能等。同时还可以提高制冷剂的比热容和热导率^[40]。Nguyen 等^[41]研究了纳米流体的性质和传热性能的变化,结果表明添加 6.8% 的纳米粒子,热导率可提高 40%。因此,添加纳米粒子改善相变材料的热性能,已成为相变材料空调研究的发展重点之一。同时,由于建筑用调湿材料往往吸收空气水分的效果较好,而被动释放空气水分的能力较差,影响了调湿材料在建筑中的实际应用^[42]。调湿材料是依靠自身的吸放湿性能,被动式调节空气相对湿度的材料^[43]。这一概念最早是由日

本的西藤等提出将调湿材料应用于建筑领域,调节室内环境湿度,日本已应用于多项大型工程建筑^[44]。而我国对于调湿材料研究仅处于起步阶段。自 20 世纪 80 年代调湿材料的概念被提出之后,各类调湿材料的调湿性能及相应调湿机理得到了广泛的研究,并不断开发出新的调湿材料^[45]。寒河江昭夫等以天然沸石为原料,将其研磨成细小颗粒,与灰浆混合调制,开发出一种称为“沸石灰浆护墙板”的新型调湿材料。该复合材料在相对湿度为 30%~50% 的范围内调湿性能良好^[46]。尚建丽等^[47]以石膏为基材,掺入植物纤维、高岭土和活性炭等吸附材料,研制出一种性能良好的调湿材料。马明明等^[48]以硅藻土、钾长石、黏土等为原料,制备出调湿性能优良的控温调湿材料。洪苑秀等^[49]以海泡石为原料合成出增强调湿能力的调湿建筑材料。Lin 等^[50]利用动物毛提取的蛋白质为原料合成的吸水剂具有很好的吸水性能,他们还研究了这种吸收剂的吸水能力与氯化钠浓度和 pH 的关系。田野^[51]利用配位插层聚合法,以蒙脱土为原料,以十六烷基三甲基溴化铵为改性剂制备出复合调湿材料,研究表明,复合材料具有较好的吸湿量和放湿速度。Zhang 等^[52]利用农业废弃的棉花籽蛋白质所制备的超强吸水剂不仅具有较好的吸收空气水分和生物降解性能,且有很好的环境效益。

上述相变材料和调湿材料都是从单方面改善室内环境热舒适度或改善室内环境湿舒适度,都不能从根本上实现对室内环境舒适度的改善以及建筑节能。近几年许多学者将相变材料与调湿材料进行复合,形成具有相变调温功能与调湿功能的复合型建筑节能材料,这既是材料制备方面发展趋势要求,也是多功能复合材料机理研究的动态发展要求。尚建丽等^[53]尝试以正十八烷为核、聚苯乙烯为内壳、亲水性壳聚糖为外壳,采用细乳液聚合法制备出既有良好相变调温性能,又有较好储湿调湿性能的双壳微纳米相变胶囊,并且对其相变调温机理和调湿机理进行了研究。张浩^[31]利用脂肪酸和二氧化硅合成相变调湿材料,具有较好的调湿效果。陈智^[32]利用正桂酸乙酯,通过溶胶凝胶法,制备出微胶囊封装相变材料,并与硅藻土复合制备出复合调湿材料,并实现在建筑领域的应用。Shi 等^[54]研究出相变复合控温调湿材料可以被动调湿 10%~12%。Chen 等^[55]研究出 PCM-SiO₂ 复合调湿材料具有明显的控温调湿效果。

3 相变控温调湿复合材料在建筑中的应用研究

自 1975 年文献报道了 Telks 等成功把相变材料应用于建筑室内的加热和降温以及建筑结构的储能以来^[56], 相变材料应用于建筑储能得到了迅速的发展。Zhang 等^[57]把相变材料与建筑材料混合一起用于民用建筑的控温, 为相变材料应用于民用建筑提供了一定的基础。1997 年人们开始研究相变材料应用于建筑的围护结构, 采用相变材料制备成砖, 然后再制成相变墙体, 这种墙体建成房屋可降低能耗 17%。2004 年 Farid 等^[58]为了解决相变材料在建筑应用过程中的封装等技术问题, 把微胶囊技术应用用于相变材料的封装, 以便提高相变材料的应用效果。经过几十年科学家对相变材料的研究和实践探索, 人们对相变材料在节能降耗, 实现人类社会的可持续发展的意义有了深刻的认识, 因此, 世界各国政府和科研机构都投入大量的资金进行攻关研究, 对相变材料在建筑墙体等围护结构以及室内空调降温 and 取暖等方面的应用已经取得了明显的成果^[59-62]。近年来学者们已把对相变材料的应用领域从室外转向室内的空调控温, 从原来的单纯的储能取暖, 转变到冷却降温, 并且可根据房间的大小, 制备各式各样的空调系统^[63-65]。Cui^[66]利用相变材料制备成工业和民用的箱体冷却机, 可供工业厂房和民用建筑制冷。Arkar 等^[67]以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 为原料, 制备制冷空调, 其相变温度为 $8 \sim 9^\circ\text{C}$ 。Parame 等研究了相变材料空调降温系统, 结果表明该系统可以节能 28%~47%^[68]。谢全安等^[69]采用 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NaOH} \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ 为原料, 以硼砂、硅藻土为成核剂和悬浮剂, 研究出性能良好的相变材料。张浩等^[70]以棕榈醇、棕榈酸、月桂酸和 SiO_2 为原料制备复合相变控温调湿建筑材料, 并且对制备过程进行优化研究, 合成的相变调湿材料不仅有很好的控温性能, 而且具有很好的调湿性能。Arkar 等^[67]开发了一种自由冷却相变材料控温系统, 该系统可以把夜间吸收的冷量输送到房间达到降温的效果。Kodo 等利用微胶囊相变材料, 其相变温度为 25°C , 安装在办公室里, 调节室内的气温^[71]。Souayfane 等^[72]利用微胶囊相变材料制备空调机, 减少白天用电高峰的电能消耗。调湿材料是依靠自身的吸放湿性能, 被动式调节空气相对湿度的材料。将调湿材料应用于建筑领域, 调节室内环境湿度, 国外已应用于多项大型工程建筑并且取得较好的调

湿效果, 而我国对于调湿材料研究仅处于起步阶段。自 20 世纪 80 年代调湿材料的概念被提出之后, 各类调湿材料的调湿性能及相应调湿机理得到了广泛的研究。

相变控温调湿材料是把相变蓄热材料与调湿材料复合制备的新型建筑材料, 把它应用于建筑物里, 不仅可以自身发生相变时, 吸收或者释出潜热, 控制建筑环境空气的温度, 而且还可以通过自身吸收或者释放水蒸气, 自动调节空气的相对湿度, 满足建筑室内的舒服温度和舒服湿度的要求。杜雅琴^[73]应用轻质多孔地聚物基相变调湿材料作为墙体材料, 研究结果表明, 该材料具有较好的控温和调湿效果, 其相变温度为 28.8°C , 吸湿和释湿过程中的平衡体积湿含量分别为 0.046 g/cm^3 和 0.057 g/cm^3 。张浩^[31]研究了石膏基相变纤维控温调湿材料在建筑墙体的应用, 其相变温度范围为 $22 \sim 29^\circ\text{C}$, 吸湿过程的湿含量为 $0.041 \sim 0.199 \text{ g/g}$, 释湿过程的湿含量为 $0.049 \sim 0.224 \text{ g/g}$ 。陈智^[32]研究了控温调湿材料在中国兰州地区的应用情况, 从 4 月到 9 月的气候条件下, 建筑墙体采用控温调湿材料比没用控温调湿材料节能 28.8%, 而只用调湿材料节能 13.5%, 只用相变控温材料节能 21.2%。

4 结 论

相变控温调湿建筑材料的开发和应用, 是材料领域和建筑领域科研人员最新的科研成果, 是建筑节能、改善居住环境、提高人们的工作效率和身体健康、实现建筑的可持续发展的重要技术之一, 也是今后绿色建筑的主要发展方向之一。该技术的实施, 对于缓解能源供需紧张, 降低二氧化碳的排放, 保护环境都具有较大的意义。迄今为止, 相关的工作主要在控温调湿复合材料的实验合成工艺以及其热湿传递机理模型的研究, 未来在如下几方面仍然需要进行研究。

(1) 在复合材料开发方面, 如何开发出性能稳定、热湿吸放能力较强的相变控温调湿复合材料。

(2) 在理论模型研究方面, 如何建立在建筑实际工况条件下, 在各种实际应用中, 如墙体、门窗、天花板、空调机等建筑构件和设备应用中的热湿传递耦合理论。

(3) 在效果评价研究方面, 如何评价在各种季节、各种地区气候环境条件下, 相变控温调湿材料的应用效果和使用性能。

符 号 说 明

- a, b ——参数, 与材料有关
- B_f ——墙体吸湿量, kg
- B_s ——墙体蓄热量, kJ
- $c_{p, \text{air}}$ ——室内空气比热容, kJ/(kg·K)
- c_{vapor} ——水蒸气的比定压热容, J/(kg·K)
- D^w ——液体水传递系数, m^2/s
- G_f ——室内湿源产湿量, kg
- G_s ——室内热源产热量, kJ
- H_{dry} ——干材料焓值, J/kg
- $\frac{\partial H}{\partial T}$ ——材料的热容, J/($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
- h_v ——水的蒸发焓, J/kg
- k^w ——材料的热导率, W/(m·K)
- M_v ——通风带入室内的湿分, kg
- Q_v ——通风带入室内的热量, kJ
- T ——湿空气温度, K
- t ——时间, h
- u_{12} ——12 h 后材料总含湿量, g
- V_{zone} ——房间容积, m^3
- $\frac{\partial w}{\partial \phi}$ ——材料的湿容, kg/m^3
- Y ——吸放湿总量, g
- δ ——材料的湿扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- μ ——水蒸气扩散阻力系数
- ρ_{air} ——室内空气密度, kg/m^3
- ρ_{dry} ——干材料密度, kg/m^3
- ϕ ——相对湿度, %
- ω_{air} ——室内空气含湿量, kg/m^3

References

- [1] 崔艳琦. 相变材料热性能及其在室内被动式储能系统的简易计算[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(2):302-306.
CUI Y Q. Thermal properties of phase change materials (PCM) and their concise calculations for passive storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(2):302-306.
- [2] 龚旒. 医院建筑热湿环境舒适与健康影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
GONG N. The impacts of indoor thermal parameters on human comfort and health in hospital buildings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [3] REINIKAINEN L M, JAAKKOLA J K. Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms[J]. Indoor Air, 2004, 13(4):344-352.
- [4] FANG L, CLAUSEN G, FANGER P O. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality [J]. Indoor Air, 2004, 8(2):80-90.
- [5] HUYNH C K. Building energy saving techniques and indoor air quality: a dilemma [J]. International Journal of Ventilation, 2010, 9(1):93-98.
- [6] ARUNDEL A V, STERLING E M, BIGGIN J H, *et al.* Indirect health effects of relative humidity in indoor environments[J]. Environmental Health Perspectives, 1986, 65:351-361.
- [7] DENG A Z, LI S B, ZHANG C L, *et al.* Research on lightweight PCM thermal-storing wall-material[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 541-544.
- [8] SONG M J, NIU F X, MAO N, *et al.* Review on building energy performance improvement using phase change materials[J]. Energy and Buildings, 2017, 158: 776-793.
- [9] AKEIBER H J, NEJAT P, MAJID M Z A, *et al.* A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60:1470-1497.
- [10] MAO N, SONG M J, PAN D M, *et al.* Numerical investigations on the effects of envelope thermal loads on energy utilization potential and thermal non-uniformity in sleeping environments[J]. Building and Environment, 2017, 124:232-244.
- [11] XIANG Y T, ZHOU G B. Thermal performance of a window-based cooling unit using phase change materials combined with night ventilation [J]. Energy and Buildings, 2015, 108:267-278.
- [12] PARAMESHWARAN R, KALAISELVAM S. Energy conservative air conditioning system using silver nano-based PCM thermal storage for modern buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 69:202-212.
- [13] SHARIFI N P, SHAIKH A N, SAKULICH A R. Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals[J]. Energy and Buildings, 2017, 138:455-467.
- [14] MAO N, HAO J Y, PAN D M, *et al.* Investigations on thermal environment in residential buildings with PCM embedded in external wall [J]. Energy Procedia, 2017, 42:1888-1895.
- [15] MAO N, SONG M J, DENG S M, *et al.* Experimental and numerical study on air flow and moisture transport in sleeping environments with a task/ambient air conditioning (TAC) system [J]. Energy and Buildings, 2016, 133:596-604.
- [16] LIN W Y, M Z J, SOHEL M I, *et al.* Development and evaluation of a ceiling ventilation system enhanced by solar photovoltaic thermal collectors and phase change materials [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88:218-230.
- [17] SAFFARI M, PISELLI C, GRACIA A D, *et al.* Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM)[J]. Energy and Buildings, 2018, 158:1097-1105.
- [18] LEI J W, YANG J L, YANG E H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore [J]. Applied Energy, 2016, 162:207-217.
- [19] ELARGA H, FANTUCCI S, SERRA V, *et al.* Experimental and numerical analyses on thermal performance of different typologies of PCMs integrated in the roof space [J]. Energy and Buildings, 2017, 150:546-557.
- [20] LOTFI D, ERREBAI F B, AMARA M. Effect of PCM in improving the thermal comfort in buildings [J]. Energy Procedia, 2017, 107:157-161.
- [21] FIGUEIREDO A, VICENTE R, LAPA J, *et al.* Indoor thermal comfort assessment using different constructive solutions incorporating PCM[J]. Applied Energy, 2017, 208:1208-1221.

- [22] 张睿航, 牛润萍. 相变蓄能材料在建筑节能方面的应用研究进展[J]. 材料导报, 2016, **30**(S1):383-386.
ZHANG R H, NIU R P. Application research progress of phase change storage materials in building energy conservation [J]. Materials Review, 2016, **30**(S1):383-386.
- [23] 黄雪, 崔英德, 尹国强, 等. 月桂酸-膨胀石墨复合相变材料的制备及性能[J]. 化工学报, 2015, **66**(S1):370-374.
HUANG X, CUI Y D, YIN G Q, *et al.* Preparation and performance of lauric acid-expanded graphite composite phase change materials [J]. CIESC Journal, 2015, **66**(S1):370-374.
- [24] SAFFARI M, GRACIA A D, USHAK S, *et al.* Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, **80**:1239-1255.
- [25] KÜNZEL H M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters [D]. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1995.
- [26] VRIES D A D. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, **30**(7):1343-1350.
- [27] 刘炳成. 土壤中的相变传热质研究及植物根系生长的仿真模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
LIU B C. Study on the heat and mass transfer in soil with phase change and simulation of growing of plant roots system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [28] 刘希臣. 地下水电站热湿环境形成机理及节能调控策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
LIU X C. Formation mechanism of heat and moisture environment in underground hydropower station and its energy-saving [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [29] 郭兴国, 陈友明. 热湿气候地区多层墙体的热湿性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, (8):1-4.
GUO X G, CHEN Y M. Analysis of the hygrothermal performance of multilayer wall exposed to hot and humid climate [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, (8):1-4.
- [30] DARKWA K, O'CALLAGHAN P W. Simulation of phase change drywalls in a passive solar building [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, **26**(8/9):853-858.
- [31] 张浩. 建筑相变储湿材料的制备、热湿性能及应用模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
ZHANG H. Preparation, thermal-humidity property and application simulation of phase change and humidity storage materials [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [32] 陈智. 复合调湿材料的理论、制备及性能研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
CHEN Z. Study of the theory, preparation and performance of composite phase change humidity control materials [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [33] 黄子硕, 于航, 张美玲. 建筑调湿材料吸放湿速度变化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, **42**(2):310-314.
HUANG Z S, YU H, ZHANG M L. Humidity-control materials and their humidity absorption and desorption rate variation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, **42**(2):310-314.
- [34] 张明杰, 秦孟昊, 陈智. 复合相变调湿材料对室内热湿环境影响的研究[J]. 建筑科学, 2016, **32**(12):72-79.
ZHANG M J, QIN M H, CHEN Z. Study on impact of composite phase change moisture-controlled materials on indoor thermal and humid [J]. Building Science, 2016, **32**(12):72-79.
- [35] HO C J, LIU K C, YAN W M. Melting processes of phase change materials in an enclosure with a free-moving ceiling: an experimental and numerical study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **86**:780-786.
- [36] WEINLÄDER H, KÖRNER W, STRIEDER B. A ventilated cooling ceiling with integrated latent heat storage—monitoring results [J]. Energy and Buildings, 2014, **82**:65-72.
- [37] TZIVANIDIS C, ANTONOPOULOS K A, KRAVVARITIS E D. Parametric analysis of space cooling systems based on night ceiling cooling with PCM - embedded piping [J]. International Journal of Energy Research, 2012, **36**(1):18-35.
- [38] BELMONTE J F, EGUÍA P, MOLINA A E, *et al.* Thermal simulation and system optimization of a chilled ceiling coupled with a floor containing a phase change material (PCM) [J]. Sustainable Cities and Society, 2015, **14**(1):154-170.
- [39] 崔艳琦, 龚方方, 张燕妮, 等. 相变材料(PCM)在建筑节能中的应用研究进展[J]. 新型建筑材料, 2016, **43**(8):26-29.
CUI Y Q, GONG F F, ZHANG Y N, *et al.* Development of study on the applications of phase change material (PCM) for energy saving in building [J]. New Building Materials, 2016, **43**(8):26-29.
- [40] 毕胜山, 史琳, 王磊. 纳米 TiO_2 颗粒在制冷工质中的分散[J]. 过程工程学报, 2007, (3):541-545.
BI S S, SHI L, WANG L. Dispersion behavior of TiO_2 nanoparticles in refrigerant [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, (3):541-545.
- [41] NGUYEN C T, ROY G, GAUTHIER C, *et al.* Heat transfer enhancement using Al_2O_3 -water nanofluid for an electronic liquid cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, **27**(8/9):1501-1506.
- [42] 尚建丽, 张浩, 董莉. 石膏基双壳微纳米相变胶囊复合材料制备及调湿调温性能研究[J]. 太阳能学报, 2016, **37**(6):1481-1487.
SHANG J L, ZHANG H, DONG L. Preparation of composite material of gypsum-based double-shell micro-nano phase change capsules and performance research of temperature-humidity control [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, **37**(6):1481-1487.
- [43] 邓妮. 多孔矿物基复合调湿材料的制备及性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
DENG N. Preparation and performance of composite humidity-control materials based on porous minerals [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [44] 邓妮, 武双磊, 陈胡星. 调湿材料的研究概述[J]. 材料导报, 2013, **27**(S2):368-371.
DENG N, WU S L, CHEN H X. Overview on research of humidity-controlling materials [J]. Materials Review, 2013, **27**(S2):368-371.
- [45] 邓妮, 武双磊, 陈胡星. 氯化钙改性硅藻土的调湿性能[J]. 材料科学与工程学报, 2014, **32**(4):493-498.
DENG N, WU S L, CHEN H X. Humidity-control performance of diatomite modified by calcium chloride [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, **32**(4):493-498.
- [46] 郑佳宜, 陈振乾. 硅藻土基调湿建筑材料的应用仿真模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, **43**(4):840-844.
ZHENG J Y, CHEN Z Q. Application analogue simulation of diatomite-based humidity control building material [J]. Journal of

- Southeast University (Natural Science Edition), 2013, **43**(4):840-844.
- [47] 尚建丽, 陈丹, 武斌. 生物质多孔相变材料的制备及调温调湿性能研究[J]. 化工新型材料, 2015, **43**(1):107-109, 113.
- SHANG J L, CHEN D, WU B. Preparation of the biomass porous phase change materials and its thermal and moisture properties [J]. New Chemical Materials, 2015, **43**(1):107-109, 113.
- [48] 马明明, 张伟. 硅藻土基调湿建筑材料的制备与表征[J]. 新型建筑材料, 2017, **44**(12):86-88, 93.
- MA M M, ZHANG W. Preparation and characterization of diatomite humidity-controlling building material [J]. New Building Materials, 2017, **44**(12): 86-88, 93.
- [49] 洪苑秀, 周斌强, 郭立, 等. 海泡石水热合成 C-S-H 增强调湿建筑材料[J]. 新型建筑材料, 2015, **42**(10):17-21, 28.
- HONG Y X, ZHOU B Q, GUO L, *et al.* Hydrothermal synthesis of sepiolite into strengthened and humidity-regulating building material [J]. New Building Materials, 2015, **42**(10):17-21, 28.
- [50] LIN H L, EAKASIT S, *et al.* Synthesis and characterization of pH- and salt-sensitive hydrogel based on chemically modified poultry feather protein isolate [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, **116**(1): 602-609.
- [51] 田野. 插层法制备相变调温调湿材料及性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- TIAN Y. Preparation of phase change temperature and humidity adjusting material and performance test research [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [52] ZHANG B N, CUI Y D, YIN G Q, *et al.* Synthesis and swelling properties of hydrolyzed cottonseed protein composite superabsorbent hydrogel [J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 2010, **59**(12): 1018-1032.
- [53] 尚建丽, 董莉. 双壳微纳胶囊的制备及热湿性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, **18**(3):428-432.
- SHANG J L, DONG L. Preparation of double-shell micronano-capsule and its thermal and moisture performance [J]. Journal of Building Materials, 2015, **18**(3):428-432.
- [54] SHI X, MEMON S A, TANG W C, *et al.* Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels[J]. Energy and Buildings, 2014, **71**:80-87.
- [55] CHEN Z, QIN M H. Preparation and hygrothermal properties of composite phase change humidity control materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **98**:1150-1157.
- [56] BELEN Z, JOSE M M, LUISA F C, *et al.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, **23**: 251-283.
- [57] ZHANG M, MEDINA M, KING J B. Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings [J]. International Journal of Energy Research, 2005, **29**: 795-809.
- [58] FARID M, KHUDHAIR A M, RAZACK S A K, *et al.* A review on phase change energy storage: materials and applications [J]. Energy Conversion and Management, 2004, **45**(9/10):1597-1615.
- [59] YAN Q Y, LIANG C, ZHANG L. Experimental study on the thermal storage performance and preparation of paraffin mixtures used in the phase change wall[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, **92**:1526-1532.
- [60] LI X L, ZHANG L, WANG S Q, *et al.* Inorganic phase change materials in building energy saving [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, **71-78**:2606-2609.
- [61] PASUPATHY A, VELRAJ R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management[J]. Energy and Buildings, 2008, **40**(3):193-203.
- [62] BUDDHI D, MISHRA H S, SHARMA A. Thermal performance studies of a test cell having a PCM-window in south direction[C]// IEA, ECESIA Annex. Indore, India, 2003:54-58.
- [63] PÉREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, POUT C. A review on buildings energy consumption information [J]. Energy and Buildings, 2008, **40**(3):394-398.
- [64] NAGANO K, TAKEDA S, MOCHIDA T, *et al.* Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—heat response in small scale experiments[J]. Energy and Buildings, 2006, **38**(5):436-446.
- [65] ZHOU G B, YANG Y P, XU H. Energy performance of a hybrid space-cooling system in an office building using SSPCM thermal storage and night ventilation[J]. Solar Energy, 2011, **85**(3):477-485.
- [66] CUI Y Q. Investigation of phase change material passive cooling system for buildings [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2014.
- [67] ARKAR C, VIDRIH B, MEDVED S. Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, **30**(1):134-143.
- [68] KASAEIAN A, BAHRAMI L, POURFAYAZ F, *et al.* Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: a critical review [J]. Energy and Buildings, 2017, **154**:96-112.
- [69] 谢全安, 郑丹星, 武向红. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 共晶盐的热化学研究[J]. 太阳能学报, 2002, (1):70-75.
- XIE Q A, ZHENG D X, WU X H. Thermochemical study on eutectic composed by $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2002, (1):70-75.
- [70] 张浩, 黄新杰, 刘秀玉. 棕榈醇-棕榈酸-月桂酸/ SiO_2 复合相变调湿材料的制备[J]. 材料研究学报, 2015, **29**(11):867-873.
- ZHANG H, HUANG X J, LIU X Y. Preparation of hexadecanol-palmitic acid-lauric acid/ SiO_2 composite as phase change material for humidity control [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, **29**(11):867-873.
- [71] SOLEYMAN R, BARDAJEE G, POURJAVADI A, *et al.* Hydrolyzed salep/gelatin-g-polyacrylamide as a novel micro/nano-porous superabsorbent hydrogel: synthesis, optimization and investigation on swelling behavior [J]. Scientia Iranica, 2015, **22**:903-910.
- [72] SOUAYFANE F, FARDOUN F, BIWOLE P. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review[J]. Energy and Buildings, 2016, **129**:396-431.
- [73] 杜雅琴. 轻质多孔地聚物基相变调湿材料性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- DU Y Q. Performance test research of lightweight porous geological polymer-based phase-wet material [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.