

The Effects of Phase-Change Materials on Building in Different Climatic Regions: Energy Saving and Indoor Thermal Comfort

Fan Li*, Hongxia Chen, Fade Wu, Qingwei Zhu, Tingting Qi, Xiaofei Zhang

Beijing New Building Materials Public Limited Company, Beijing

Email: *lifan@bnbm.com.cn

Received: Apr. 21st, 2019; accepted: May 6th, 2019; published: May 13th, 2019

Abstract

Phase change materials (PCMs) have great potential to stabilize indoor temperature fluctuation and improve thermal comfort when be applied in modern building. This type of material can also increase the energy saving by absorbing clean solar energy to achieve peak clipping. The influence of PCMs on building indoor temperature and energy consumption at different climate conditions were discussed in this paper. In various climate conditions, different types of PCMs with distinct melting points should be selected. PCMs are suitable to be applied in locations with high altitude or places with large temperature difference between daytime and night, but not applicable to constantly hot or cold zone. Two types of PCMs with different melting temperatures should be considered in the areas with distinct climate between seasons. In the case of constant climate, PCM with the melting temperature of 20°C - 26°C should be considered.

Keywords

Phase Change Materials, Climate, Temperature, Energy Saving

相变材料在不同气候区域的建筑节能率及舒适度研究

李帆*, 陈红霞, 武发德, 朱清玮, 戚婷婷, 张晓菲

北新集团建材股份有限公司, 北京

Email: *lifan@bnbm.com.cn

收稿日期: 2019年4月21日; 录用日期: 2019年5月6日; 发布日期: 2019年5月13日

*通讯作者。

文章引用: 李帆, 陈红霞, 武发德, 朱清玮, 戚婷婷, 张晓菲. 相变材料在不同气候区域的建筑节能率及舒适度研究[J]. 材料科学, 2019, 9(5): 437-446. DOI: 10.12677/ms.2019.95056

摘要

相变材料(Phase change materials, PCMs)在现代建筑材料中应用, 具有稳定室内温度波动、提高热舒适性的巨大潜力; 利用清洁能源太阳能, 存储/释放热量, 可降低建筑能耗, 或达到削峰填谷的作用。本文重点讨论了不同气候条件下, PCMs对建筑室内温度和建筑能耗的影响; 不同气候区域需选用不同相变温度的PCMs。PCMs适合应用在高海拔或早晚温差较大的地区, 而不适宜应用在常年炎热或寒冷地带; 四季气候分明的地区可采用两种相变温度的PCMs, 而四季温和地区可采用相变温度为 $20^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$ 的PCMs。

关键词

相变材料, 气候, 室内温度, 节能效率

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 化石能源消耗和二氧化碳排放已导致全球环境问题[1]。调查表明, 2015年, 包括住宅和商业建筑在内的建筑行业占全球能耗的近21%。随着人们生活水平的提高, 对家电、个人设备和商业服务的需求增加, 建筑用电量每年增长2%; 2015年至2040年建筑能耗预计将增长32% [2]。这种增长推动了可再生能源利用的研究, 尤其是太阳能。然而太阳能具有间歇性、不稳定的特点, 解决的办法之一是利用热能存储技术。利用储存介质以热能的形式吸收和释放, 达到削峰填谷的作用, 最大限度地降低建筑的空间采暖/制冷能耗[3] [4]。潜热蓄能被认为是在热能储存中最有前景的技术, 因为它具有稳定的工作温度, 较高的能量密度[5]。

近年来PCMs的研究备受关注, 将PCMs应用到储能系统中是目前最先进的提升能源使用效益的技术。当温度高于相变温度时, PCMs吸收热量, 形成了热能的储备; 当温度低于相变温度时, 相变储能材料可以释放热量; 将PCMs应用在建筑中, 不仅可以缓解室内温度波动, 提升室内舒适度, 减少负荷, 降低建筑能耗, 还能降低化石能源使用, 降低二氧化碳排放[6]。但PCMs在建筑的热性能受材料本身特性、建筑结构、地理位置、气候差异等因素的影响, 限制了其在建筑中的应用。因此, 本文综合考虑PCMs本身特性和全球气候的分布, 分析总结不同气候下PCMs对室内温度调控的情况[7] [8] [9] [10], 并对其建筑节能效率[11] [12] [13] [14] [15]进行评价, 最终给出不同气候条件区域下, 相变材料选用方面的建议。

2. PCMs的选择

在建筑中应用PCMs, 能够强化建筑的隔热功能, 降低建筑物室内的热流波动, 保证室内环境的舒适性, 降低建筑物空调和供暖系统运载负荷, 减少能源消耗[16]。有研究者以相变温度和相变潜热为变量建立了一个PCMs的数据库[17] [18], 数据库中有300多种可应用的PCMs, 部分或全部满足应用的基本要求, 如相变焓值高、相变过程体积变化小、导热系数高、耐老化、化学性质稳定、无毒、不易燃等。如图1体现了这些物质的相变温度与相变潜热的关系图, 图1(a)中不同颜色意味着不同应用领域的相变材料。黑色代表可在商业中应用的PCMs, 相变温度有高有低, 可根据商业需求选择适宜的相变材料;

绿色代表适用于生活环境的相变材料，相变温度在 $18^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，相变焓值在 $90\text{ kJ/kg}\sim 250\text{ kJ/kg}$ ；蓝色代表应用于冷却系统的相变材料；红色代表可用于保温系统的相变材料。图 1(b)不同颜色代表了不同类型的相变材料，如包括石蜡、脂肪酸、无机水合盐等。如紫色代表石蜡类，C14 相变温度在 $4^{\circ}\text{C}\sim 5.5^{\circ}\text{C}$ ，焓值在 $150\text{ kJ/g}\sim 230\text{ kJ/g}$ ，C16 相变温度在 17°C 左右，焓值在 230 kJ/g 左右。根据建筑对 PCMs 的要求，选定适宜相变温度，在数据库中为给定相变温度选择相变点潜热较高的物质；同时综合权衡 PCMs 在化学、热力学、动力学和经济性等多方面因素[19]，最终在数据库选出最佳的相变材料。

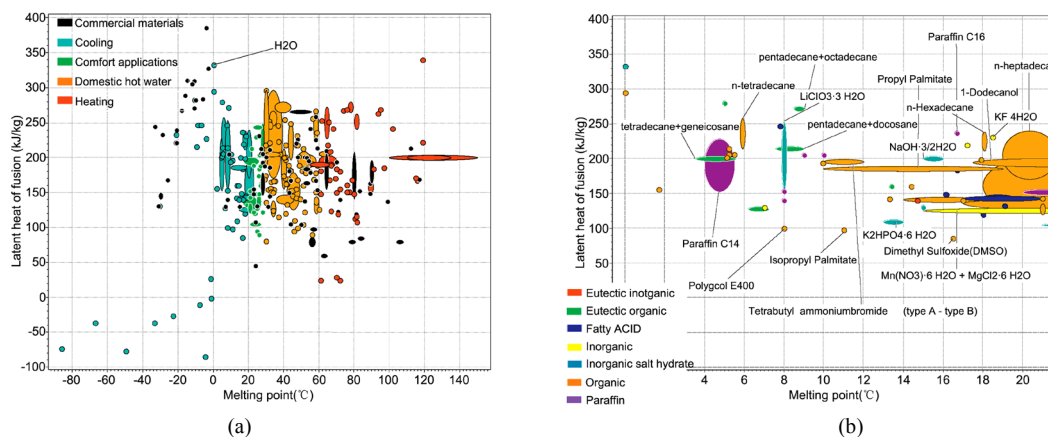


Figure 1. PCMs database [17]

图 1. PCMs 数据库[17]

3. 全球气候分布情况

相同的 PCMs 建筑条件，不同气候条件下，其 PCMs 对室内温度调控的情况及建筑节能效率不同。而气候是大气物理特征的长期平均状态。它具有稳定性，但受纬度位置、海陆分布、地形地势、大气环流、洋流等因素的影响。本文采用 Köppen-Geiger [20]气候分类方法在全球形成了 31 个不同的气候区域，如图 2，气候详细内容见表 1。

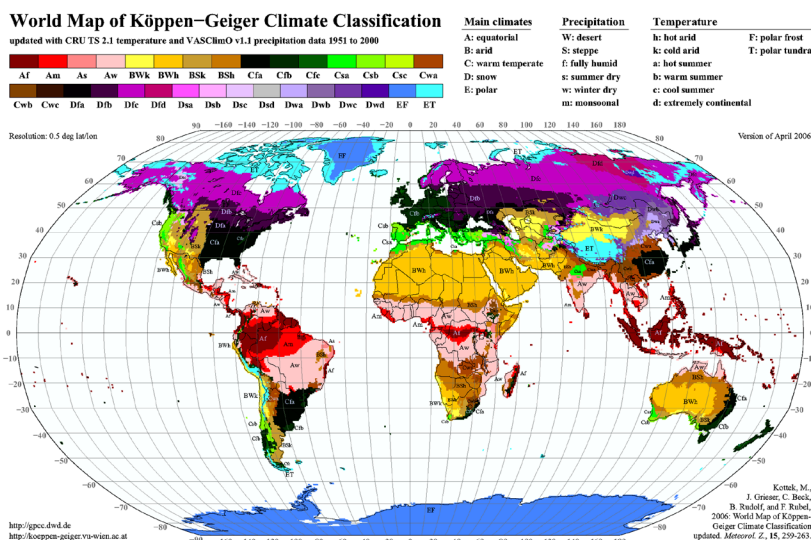



Figure 2. Köppen-Geiger climate map of world [20]

图 2. Köppen-Geiger 世界地图气候分布图[20]

Table 1. Color, code, climate table
表 1. 颜色、代码、气候对应表

代码	气候	代码	气候
 Af	热带雨林气候	 Cwc	冬干温暖气候(夏季凉爽型)
 Am	热带季风气候	 Dfa	常湿冷气候(夏季炎热型)
 As	热带草原气候	 Dfb	常湿冷气候(夏季温暖型)
 Aw	热带沙漠气候	 Dfc	常湿冷气候(夏季凉爽型)
 BWk	温带沙漠气候	 Dfd	常湿冷气候(显著大陆型)
 BWh	亚热带沙漠气候	 Dsa	夏干冷气候(夏季炎热型)
 BSk	温带草原气候	 Dsb	夏干冷气候(夏季温暖型)
 BSh	亚热带草原气候	 Dsc	夏干冷气候(夏季凉爽型)
 Cfa	常湿温暖气候(夏季炎热型)	 Dsd	夏干冷气候(显著大陆型)
 Cfb	常湿温暖气候(夏季温暖型)	 Dwa	冬干冷气候(夏季炎热型)
 Cfc	常湿温暖气候(夏季凉爽型)	 Dwb	冬干冷气候(夏季温暖型)
 Csa	夏干温暖气候(夏季炎热型)	 Dwc	冬干冷气候(夏季凉爽型)
 Csb	夏干温暖气候(夏季温暖型)	 Dwd	冬干冷气候(显著大陆型)
 Csc	夏干温暖气候(夏季凉爽型)	 EF	冰原气候
 Cwa	冬干温暖气候(夏季炎热型)	 ET	苔原气候
 Cwb	冬干温暖气候(夏季温暖型)		

本文涉及的地区气候均采用柯本气候分类法进行分析总结。以便获得不同气候区域对建筑室建筑节能率及室内舒适度的影响规律。

4. 不同气候下, PCMs 在建筑中的应用

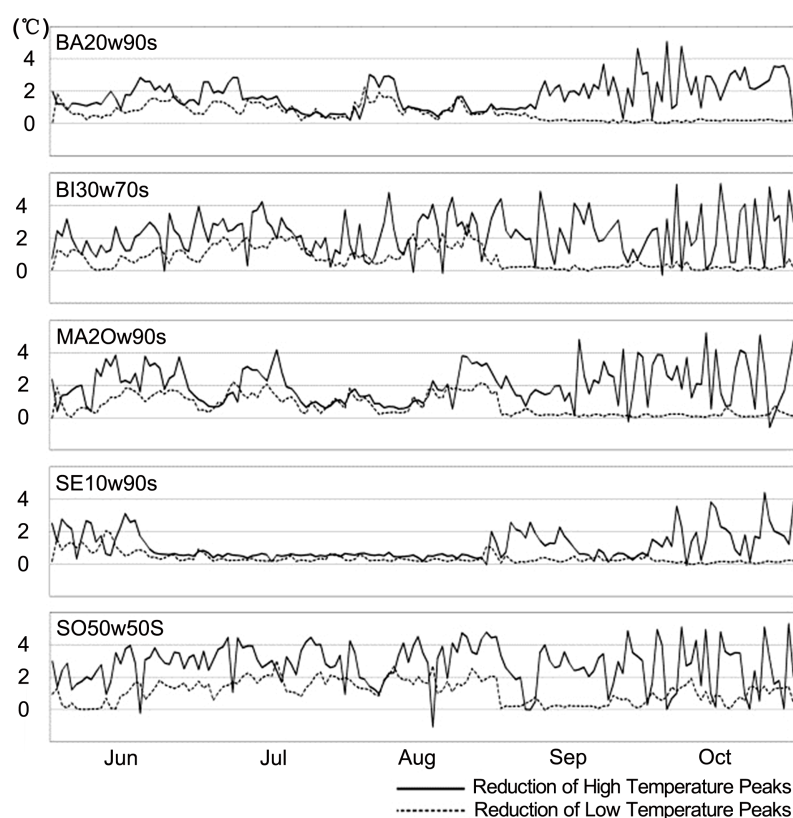
PCMs 在建筑中的相变蓄能作用是由于发生了相变效应, PCMs 相变效应取决于温度是否达到相变温度[21]。而 PCMs 的相变功效主要体现在室内温度变化及建筑能耗指标。

4.1. 不同气候下, PCMs 对建筑室内温度的影响

Ubinas 等[7]建立试验房和对照房, 将两者对比研究, 用于验证 PCM express 模拟的准确性, 比较了西班牙五个不同城市 PCMs、窗墙比及遮阳系数等变量对室内温度的影响。研究表明, PCMs 有助于增加室内体感舒适度的时间, 降低热峰值, 减少室内温度波动。然而, 不同城市气候下 PCMs 对热舒适性的影响不尽相同, 如表 2, 五个城市中, PCMs 可使热舒适时间增加超过 1000 h, 尤其毕尔巴鄂增加 1699 h。索里亚全年热舒适度时间占全年时间的 87.5%, 与无 PCMs 相比, 增加 27.7%, 而塞维利亚热舒适度增加最少, 仅增加 11.2%。在最佳参数下, 与无 PCMs 相比, PCMs 降低了室内温度峰值如图 3 所示, 结果表明 PCMs 使热峰值降低 6℃, 内部温度波动降低 60%。

Table 2. Effects of PCMs on thermal comfort in different urban climates**表 2.** 不同城市气候下 PCMs 对热舒适性的影响

城市	气候	最佳窗墙比	最优遮阳系数	舒适增加时长	无 PCMs 舒适时长占比	有 PCMs 舒适时长占比
巴塞罗那	夏干温暖气候(夏季温暖型)	20%	90%	1568	60.0%	79.1%
毕尔巴鄂	常湿温暖气候(夏季温暖型)	30%	70%	1699	61.5%	81.2%
马德里	夏干温暖气候(夏季温暖型)	20%	90%	1533	60.3%	78.8%
塞维利亚	夏干温暖气候(夏季炎热型)	10%	90%	1086	59.0%	70.5%
索里亚	常湿温暖气候(夏季温暖型)	50%	50%	1559	59.8%	87.5%

**Figure 3.** The effect of PCMs on peak temperature drop [7]**图 3.** PCMs 对峰值温度降低的影响[7]

Sharifi 等人[8]利用典型气候的年度数据进行计算模拟,研究了不同城市掺有 PCMs 的墙板的建筑热性能。结果表明 PCMs 的效率受环境温度的影响。所采用 PCMs 的相变温度为 28℃,焓值为 151 kJ/kg,体积掺量为 50%,在毕晓普(CA,常湿温暖气候-夏季温暖型)地区,室内不舒适时长减少了 19%,而汉福德(WA,夏干温暖气候-夏季炎热型)地区不舒适时长减少了 12%。

由此可见,相同的 PCMs 在不同地区体现的相变效应不同,同样,相同地区不同季节,PCMs 的应用效果也不相同。Siddiqui 等人[9]使用 TRNSYS 分别模拟多伦多地区冬季和夏季 PCMs 对建筑室内温度变化的影响,如图 4。在冬季,有、无 PCMs 的室内温度变化趋势相同;在夏季,相变房间(PCMs 掺量为 20%)室内最高温度较无 PCMs 相比,降低了 8℃,与 5.08 cm 厚水泥板相比,降低近 4℃,且温度峰值后移。Kuznik 和 Virgone1 等人[10]具有相同研究成果,夏季和春秋季节 PCMs 对室内温度调控更明显。

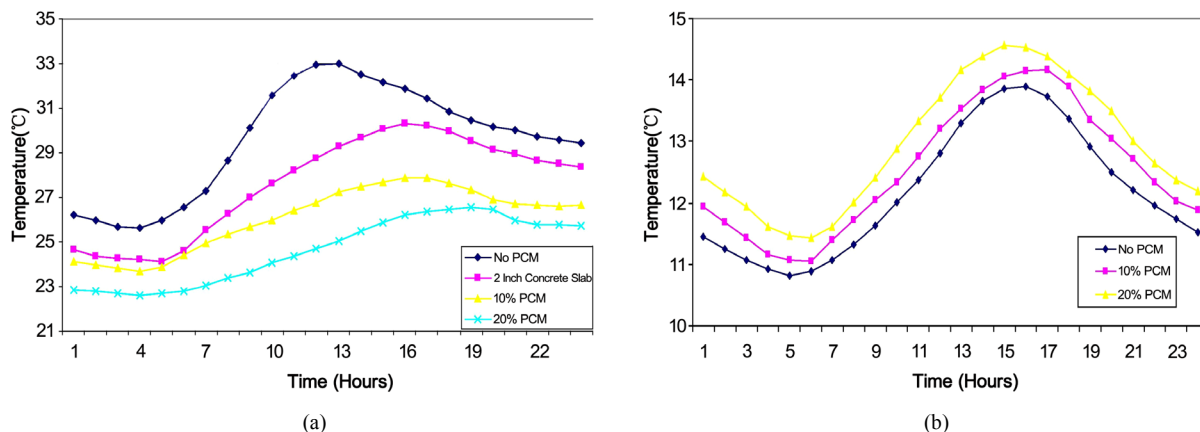


Figure 4. Indoor temperature curve under Toronto climate conditions ((a) winter, (b) summer) [9]

图 4. 多伦多气候条件下室内温度曲线((a)冬季, (b)夏季) [9]

本文分析总结了不同气候下 PCMs 对建筑室内温度的影响规律, 如表 3, 通过增加舒适度时长小时数, 增加舒适度时长百分比或室内最大温差来表征。结果表明, 对于温带气候地区, 温和性气候(b)较炎热型气候(a), PCMs 能发挥更大的作用。此外, 相变建筑所处环境温度需在 PCMs 的相变温度上下波动, PCMs 才能实现对温度进行调控的作用。

Table 3. Effects of phase change materials on building temperature in different climates

表 3. 不同气候下相变材料对建筑温度的影响

序号	相变温度	城市	气候	PCM 对温度影响
1 [7]	26°C	巴塞罗那	Csb	增加舒适度时长 1568 h
		毕尔巴鄂	Cfb	增加舒适度时长 1699 h
		马德里	Csb	增加舒适度时长 1533 h
		塞维利亚	Csa	增加舒适度时长 1086 h
		索里亚	Cfb	增加舒适度时长 1559 h
2 [8]	28°C	毕晓普	Csb	增加舒适度时长 19%
		汉福德	Cfa	增加舒适度时长 12%
3 [9]	23°C~26°C	多伦多	Dfb 夏季	最高温度降低 8°C
		多伦多	Dfb 冬季	温度差异不大

4.2. 不同气候下, PCMs 对建筑节能的影响

Saffari 等人[11]采用 EnergyPlus v8.4 与 GenOpt@v3.1.1 模拟不同气候下, PCMs 对建筑能耗的影响。结果表明, 建筑室内应用 PCMs 的相变温度应在 20°C~26°C 之间, PCMs 的最佳相变温度与气候条件密切相关。一般来说, 在以需要降温为主导的气候地区, PCMs 的最佳相变温度是 26°C, 而在以加热为主导的气候地区, PCMs 的最佳相变温度是 20°C。在大部分的高海拔地区, 使用 PCMs 技术可以大幅度降低建筑能耗, 节能率大于 10%。相反, 在赤道 - 季风气候区的建筑使用 PCMs 会增加建筑能耗。因此, 建筑中应用 PCMs 应根据不同的气候来确定 PCMs 的相变温度, 使其最大发挥相变效应, 实现建筑总能耗的降低。

Pop 等人[12]根据表观热容随温度的变化开发了 PCMs 热行为的模型, 研究了三种 PCMs (性能如表 4)

在 12 个不同气候下建筑冷却系统的节能效果, 如表 5。由表可知, Df (常湿冷温气候)应用 PCMs, 节能率高达 40%左右, Cf (常湿温暖气候)与 BWh (热带沙漠气候)节能率比较相似, 在 26%~37%之间, BSk (温带草原气候)和 Cs (地中海型气候)节能率较低, 为 10%左右。

Table 4. Related performance index of PCM

表 4. PCM 相关性能指标

	状态	T_s	T_p	T_c	I_{PCM} [kJ/kg]
RT20 [22]	熔化	18	21	23	138.3
	凝固	22	22	19	143.4
RT25 [23]	熔化	22	25	26	133.7
	凝固	26	25	22	139.6
RT27 [24]	熔化	27	28	29	144.9
	凝固	29	27	28	149.2

Table 5. The energy-saving effect of urban building in different climates

表 5. 不同气候下城市建筑的节能效果

城市	国家	气候	PCM 类型	PCM 用量/kg _{PCM} /m ²	模拟月份/季节	节能效果
克卢日	罗马尼亚	常湿冷温气候(夏季温暖型)	RT20	1.20	5-9	39%
布加勒斯特	罗马尼亚	常湿冷温气候(夏季炎热型)	RT20	1.29	4-9	39%
布达佩斯	匈牙利	常湿温暖气候(夏季温暖型)	RT20	1.87	5-9	36%
巴黎	法国	常湿温暖气候(夏季温暖型)	RT20	1.31	6-9	27%
米兰	意大利	常湿温暖气候(夏季炎热型)	RT25	1.68	4-19	33%
柏林	德国	常湿冷温气候(夏季温暖型)	RT25	1.42	5-8	41%
塞维利亚	西班牙	常湿温暖气候(夏季炎热型)	RT25	1.08	4-9	31%
卡泰里尼	希腊	温带草原气候	RT25	1.28	6-9	12%
罗马	意大利	夏干温暖气候(夏季炎热型)	RT25	1.11	6-9	7%
布莱斯	美国	亚热带沙漠气候	RT27	2.55	1-11	30%
开罗	埃及	亚热带沙漠气候	RT27	2.60	1-11	37%
菲尼克斯	美国	亚热带沙漠气候	RT27	2.70	1-11	26%

Wu 等[13]采用热湿耦合传递(HAMT)模型, 分析了中国北京和广州、法国巴黎、美国亚特兰大四个典型的气候下 PCMs 对建筑节能效率的影响。PCMs 相变温度为 25℃~27℃时, 在夏季 PCMs 有较好的相变效应, 使建筑达到了较高的节能效率。北京、广州、巴黎和亚特兰大, 建筑节能效率分别为 10.22%、8.76%、19.57%和 17.82%。巴黎和亚特兰大有更高的节能效率, 是因为这两个城市的气候温和, 室外温差很大。而广州常年温度较高, 长期高于 PCMs 的相变温度, PCMs 实现相变储能放热过程的天数有限, 因此节能效率最低。

Ascione 等[14]基于“一维传导有限差分”方法, 依据热平衡, 研究了五种不同气候下, 建筑节能效率与 PCMs 相变温度(26℃、27℃、28℃、29℃)、PCMs 墙板厚度(0.5 cm、1 cm、2 cm、3 cm)的相关性。结果表明, 相变温度是影响节能效率的主要因素, PCMs 最优相变温度为 29℃, PCMs 墙板最佳厚度为 3 cm。但在不同气候下, 节能率有所不同。在温带大陆性气候的安卡拉(Ankara 土耳其)节能率高达 57.1%,

相同气候的塞维利亚(Seville 西班牙)节能率仅为 29.3%，地中海气候三个城市，马赛(Marseille 法国)和那不勒斯(Naples 意大利)具有较高的节能率，分别为 52.7%和 47.6%，而雅典(Athens 希腊)仅为 27.0%。

Berardi 等[15]将两种熔融温度(熔化温度为 21.7℃和 25℃)的复合 PCMs 系统集成到高层公寓中，利用 Energy Plus TM 软件模拟量化，研究了多伦多(温带大陆性湿润气候)和温哥华(温带海洋性气候)气候条件下公寓建筑室内温度和建筑能耗的变化，评价了这种复合 PCMs 系统的有效性。结果表明，复合 PCMs 系统通过降低温度波动，改善了室内温度；多伦多和温哥华的制冷能源需求分别减少了 6%和 31.5%。

上述各研究均表明，应用 PCMs 建筑的能耗与其区域气候相关，为实现更高的相变效应，还需要根据当地气候选择适宜的相变温度。此外，Xie 等人[25]研究了中国五个不同地区使用 PCMs 墙板的热工性能，PCMs 墙板在不同区域的传热能力和热性能在不同月份出现显著变化。Ye 等人[26]提出采用 ESI 的概念从能量的角度直观地评估组件或材料的性能。当 $ESI > 0$ ，表示检测的材料或元件节省的能量多于浪费的能量，表明该材料或元件是节能的；当 $ESI < 0$ ，意味材料或组件浪费能源，不建议使用。结果表明，实验房应用 PCMs 相变点区间为 33.41℃~38.79℃，北京、上海地区 PCMs 墙板的 ESI 大于零，但数值远小于保温材料(EPS)，对于广州，ESI 小于零，该地区不适宜应用此相变区间的 PCMs。

本文分析总结了不同气候下 PCMs 对建筑节能效率的影响规律，如表 6，通过节能率来表征，不同研究者因采用模型不同，相同气候下节能效率差异较大，但仍可参照对比。结果表明，热带气候(A)不适合将 PCMs 应用于建筑中；对于沙漠(B)或高山气候，昼夜温差大，白天具有充足的太阳能，更适合应用 PCMs；同时与上述结论相似，温带气候地区，温和性气候(b)较炎热型气候(a)，PCMs 建筑具有更高的节能效率。

Table 6. Effects of phase change materials in different climates on building energy efficiency

表 6. 不同气候下相变材料对建筑节能效率的影响

序号	相变温度	城市	气候	节能率
1 [11]	26℃	玛瑙斯	Am	-9.0%
		加尔各答	Aw	1.4%
		印多尔	As	3.3%
		阿布达比酋长国	Bwh	1.8%
		拉斯维加斯	Bwk	2.6%
		塞维利亚	Csa	3.5%
		亚的斯亚贝巴	Cwb	12.0%
		奥马哈	Dfa	1.5%
		Linxi	Dwb	1.9%
		克卢日	Dfb	39%
2 [12]	18℃~23℃	布加勒斯特	Dfa	39%
		布达佩斯	Cfb	36%
		巴黎	Cfb	27%
		米兰	Cfa	33%
	22℃~26℃	柏林	Dfb	41%
		塞维利亚	Csa	31%
		卡泰里尼	BSK	12%
		罗马	Csa	7%

Continued

		布莱斯	BWh	30%
	27°C~29°C	开罗	BWh	37%
		菲尼克斯	BWh	26%
		北京	Dwa	10.22%
3 [13]	25°C~27°C	巴黎	Cfb	19.57%
		亚特兰大	Cfa	17.82%
		广州	Cwb	8.76%
		安卡拉	Csa	57.1%
		塞维利亚	Csa	29.3%
4 [14]	29°C	马赛	Csb	52.7%
		那不勒斯	Csb	47.6%
		雅典	Csb	27.0%
5 [15]	21.7°C和 25°C	多伦多	Dfb	6%
		温哥华	Csb	31.5%

5. 结果与建议

相变材料应用在建筑中主要考虑其相变温度、相变潜热和价格情况。建筑室内所应用相变材料的相变温度范围应为 18°C~34°C。在不同气候条件下,相变材料起到的作用不同,结论如下:

一是针对温度长期偏高或长期偏低的地区,不适宜使用相变温度与环境温度相差较大的相变材料;而在高海拔地区或早晚温差较大的地区,更适合采用相变材料。

二是针对四季分明的地区,可采用两种熔点的相变材料,以加热主导的气候适合采用低熔点相变材料,以冷却主导的气候适合采用高熔点的相变材料。

三是针对一年四季气候变化不大的地区,适合采用相变温度为 20°C~26°C 左右的相变材料,缓解室内波动,提高环境舒适度。

同一地区,节能效率存在很大差异。因为目前相变材料对建筑节能多采用软件建模数字模拟或小型装置来演示,不能代表相变材料对建筑实际产生的作用。因此,建议今后更多研究能够从实际出发,使用建筑实际数据来进行分析,这样才会更利于相变材料的推广应用,降低建筑能耗,减少化石能源的消耗和二氧化碳的排放。

基金项目

“十三五”国家重点研发计划“功能型装饰装修材料的关键技术研究与应用”(2016YFC070090000)。

参考文献

- [1] IEA (2012) CO₂ Emissions from Fuel Combustion.
- [2] U.S. Energy Information Administration (2017) International Energy Outlook 2017. <http://www.eia.gov/ieo>
- [3] Sadineni, S.B., Madala, S. and Boehm, R.F. (2011) Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **15**, 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- [4] Chen, Z., Qin, M. and Yang, J. (2015) Synthesis and Characteristics of Hygroscopic Phase Change Material: Composite Microencapsulated Phase Change Material (MPCM) and Diatomite. *Energy & Buildings*, **106**, 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.033>

- [5] Tao, Y.B. and He, Y.-L. (2018) A Review of Phase Change Material and Performance Enhancement Method for Latent Heat Storage System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **93**, 245-259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.028>
- [6] Tyagi, V., Pandey, A., Buddhi, D. and Kothari, R. (2016) Thermal Performance Assessment of Encapsulated PCM Based Thermal Management System to Reduce Peak Energy Demand in Buildings. *Energy Buildings*, **117**, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.042>
- [7] Rodriguez-Ubinas, E., Arranz, B.A., Sánchez, S., Vega, *et al.* (2013) Influence of the Use of PCM Drywall and the Fenestration in Building Retrofitting. *Energy and Buildings*, **65**, 464-476. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.023>
- [8] Sharifi, N.P., Shaikh, A.A.N. and Sakulich, A.R. (2017) Application of Phase Change Materials in Gypsum Boards to Meet Building Energy Conservation Goals. *Energy and Buildings*, **138**, 455-467. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>
- [9] Siddiqui, O., Kumar, R., Fung, A.S., *et al.* (2017) Modelling for Performance Prediction of Highly Insulated Buildings with Different Types of Thermal Mass. *Applied Thermal Engineering*, **122**, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.021>
- [10] Kuznik, F. and Virgone, J. (2009) Experimental Assessment of a Phase Change Material for Wall Building Use. *Applied Energy*, **86**, 2038-2046. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.004>
- [11] Saffari, M., De Gracia, A., Fernández, C., *et al.* (2017) Study on the Optimum PCM Melting Temperature for Energy Savings in Residential Buildings Worldwide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **251**, Article ID: 012113. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012113>
- [12] Pop, O.G., FeheteTutunaru, L., Bode, F., *et al.* (2018) Energy Efficiency of PCM Integrated in Fresh Air Cooling Systems in Different Climatic Conditions. *Applied Energy*, **212**, 976-996. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.122>
- [13] Wu, Z.M., Qin, M.H. and Zhang, M.J. (2018) Phase Change Humidity Control Material and Its Impact on Building Energy Consumption. *Energy & Buildings*, **174**, 254-261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.036>
- [14] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R.F., *et al.* (2014) Energy Refurbishment of Existing Buildings through the Use of Phase Change Materials: Energy Savings and Indoor Comfort in the Cooling Season. *Applied Energy*, **113**, 990-1007. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.045>
- [15] Berardi, U. and Soudian, S. (2018) Benefits of Latent Thermal Energy Storage in the Retrofit of Canadian High-Rise Residential Buildings. *Building Simulation*, **11**, 709-723. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0436-x>
- [16] 梁恩才. 论建筑节能中相变储能材料的运用[J]. 山东工业技术, 2018(6): 91.
- [17] Barreneche, C., Navarro, H., Serrano, S., Cabeza, L.F. and Fernández, A.I. (2014) New Database on Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Buildings to Help PCM Selection. *Energy Procedia*, **57**, 2408-2415. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.249>
- [18] Cabeza, L.F., Castel, A., Barreneche, C., DeGracia, A. and Fernández, A.I. (2011) Materials Used as PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1675-1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- [19] 魏高升, 邢丽婧, 杜小泽, 杨勇平. 太阳能热发电系统相变储热材料选择及研发现状[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 325-335.
- [20] World Maps of Köppen-Geiger Climate Classification. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>
- [21] 张源, 戴晓丽. 相变温度对相变蓄能墙体热性能影响特性[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2018, 39(6): 671-677.
- [22] Arkar, C. and Medved, S. (2015) Influence of Accuracy of Thermal Property Data of a Phase Change Material on the Result of a Numerical Model of a Packed Bed Latent Heat Storage with Spheres. *Thermochim Acta*, **438**, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.08.032>
- [23] Iten, M., Liu, S., Shukla, A. and Silva, P.D. (2017) Investigating the Impact of Cp-T Values Determined by DSC on the PCM-CFD Model. *Applied Thermal Engineering*, **117**, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.021>
- [24] Jin, X., Hu, H., Shi, X. and Zhang, X. (2015) Energy Asymmetry in Melting and Solidifying Processes of PCM. *Energy Conversion and Management*, **106**, 608-614. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.001>
- [25] Xie, J., Wang, W., Liu, J., *et al.* (2018) Thermal Performance Analysis of PCM Wallboards for Building Application Based on Numerical Simulation. *Solar Energy*, **162**, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.069>
- [26] Ye, H., Long, L., Zhang, H., *et al.* (2014) The Performance Evaluation of Shape-Stabilized Phase Change Materials in Building Applications Using Energy Saving Index. *Applied Energy*, **113**, 1118-1126. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.067>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ms@hanspub.org