

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.002



复合相变蓄热材料太阳能通风井性能

丁云飞^{a,b}, 王元明^a, 吴会军^{a,b}

(广州大学 a. 土木工程学院; b. 广东省建筑节能与应用技术重点实验室, 广州 510006)

摘要:针对太阳能通风井道蓄热单元的技术需求,制备了复合相变蓄热材料,并将其应用于通风井壁,建立了基于复合相变蓄热材料的太阳能通风井测试系统,并测试了其运行性能。结果表明:添加 5% 碳纳米管制备的复合相变材料,其导热系数为 $0.65 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,是添加前的 2.03 倍,相变潜热为 107 J/g ,是添加前的 0.718 倍。应用上述材料的太阳能通风井测试系统在 10:00—21:00 时段通风量为 $55.0 \sim 103.9 \text{ m}^3/\text{h}$,其中在 17:00 风速和风量达到最大,为良好的自然通风提供了保障。

关键词:相变材料;热物性;自然通风;热压

中图分类号:TK511.2 TU834.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0007-06

Performance of solar ventilation shaft based on composite phase change thermal storage materials

Ding Yunfei^{a,b}, Wang Yuanming^a, Wu huijun^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Building Energy Efficiency and Application Technologies, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: According to the technical requirements of thermal storage unit of solar ventilation shaft, A composite phase change materials were prepared and applied to the ventilation shaft, and a solar ventilation shaft experimental system using composite phase change material was established, and its operation performance was tested. The results showed that the thermal conductivity and the latent heat of the composite phase change material prepared by adding 5wt% carbon nanotubes were $0.65 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ and 107 J/g respectively, and 2.03 times and 0.718 times of that before adding. And outlet air flow of the solar ventilation shaft experimental system using above material were $55 \sim 103.9 \text{ m}^3/\text{h}$ beteewn 10:00 to 21:00, and the time was in 17:00 to the both of maximum value. This provides a guarantee for the natural ventilation.

Keywords: phase change materials; thermophysical property; natural ventilation; thermal pressure

收稿日期:2017-12-19

基金项目:国家自然科学基金(51678167);广东省重大科技专项(2013A011404005)

作者简介:丁云飞(1967-),男,博士,教授,主要从事建筑节能与暖通空调技术研究,E-mail:dingyf@126.com。

Received:2017-12-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51678167); Major Science and Technology Special Projects in Guangdong Province(2013A011404005)

Author brief: Ding Yunfei (1967-), PhD, professor, main research interests: building energy efficiency promotion and HVAC technology, E-mail: dingyf@126.com.

在夏热冬暖和夏热冬冷地区,自然通风是改善夏季室内热环境和节能的重要手段,是广泛应用的被动式建筑技术,然而,风压作用下的自然通风不稳定,热压作用下的自然通风依赖室内外空气温差。通过设计一种透明结构通风井,利用太阳辐射加热井道中的空气,增加热压实现强化自然通风的效果^[1-5]。将相变蓄热材料粘附在通风井壁,蓄存白天的太阳能,晚上则释放相变潜热加热井道中的空气,实现昼夜连续的自然通风,其中,高性能相变蓄热材料是应用的关键。固-固相变材料相变过程中体积变化小,不出现液态,并且容易与其他材料复合,因而在中、低温蓄热中得到了广泛的应用^[6-9]。但是其导热系数低导致其蓄/放热速率受到限制^[10-12]。通过制备复合材料,如在相变材料中添加微米级或者毫米级的金属填料、碳纤维颗粒、石墨等,可以改善其导热性能。但这些颗粒大多与相变材料之间存在较大的密度差,在复合相变材料的制备过程中容易产生沉降,从而降低其稳定性^[13-16]。根据太阳能通风井壁面蓄热单元的技术需求,制备复合相变材料,对其性能进行表征,并应用于太阳能通风井实验装置,评价自然通风效果。

1 蓄热型太阳能通风井

图 1 是蓄热型太阳能通风井结构,主要由玻璃盖板、相变集热墙和通风井道组成,其中,相变材料的性能是其能否正常工作的关键。对相变材料的性能要求包括较高的相变潜热、较大的热导率,同时性能稳定不分解。

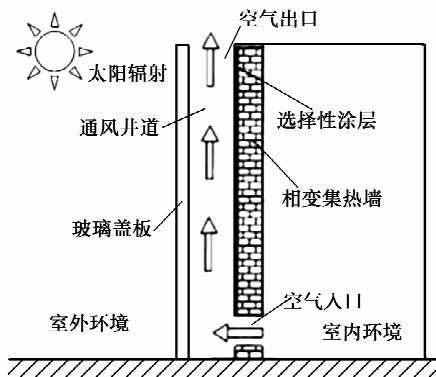


图 1 太阳能通风井结构

Fig. 1 Structure of solar ventilating shaft

以高分子聚乙二醇(PEG)为基底,添加异氰酸

酯(MDI)、十八醇(ODO)及 1,4 丁二醇(BDO),制备相变材料,为改善其热导率,添加碳纳米管(CNT),制备复合相变材料。

2 复合相变材料制备及性能

2.1 材料制备

制备过程:1)预处理:ODO、PEG 在 110 ℃ 条件下真空干燥,除去残留水份,BDO 蒸馏脱水;2)CNT 分散:将 CNT(多壁,直径 10~20 nm,长度 10~30 μm)按不同质量分数加入到预处理后的熔融 PEG 中,如表 1 所示,以十二苯磺酸钠作为分散剂,添加 0.02 g,超声震荡,使 CNT 均匀分散在熔融 PEG 中;3)复合相变材料合成:将 MDI 滴入上述熔融 PEG 中,N₂ 保护,水浴加热至 65 ℃,反应 1~2 h,再加入预处理后的 BDO 和 ODO 进行扩链反应 1.5~3 h,将样品在 80 ℃ 烘箱中干燥固化 24 h,得到复合相变材料,其在相变过程中 CNT 不沉降,稳定性好^[17]。

表 1 样品 CNT 含量
Table 1 Sample CNT content

样品号	CNT 含量 / %	样品号	CNT 含量 / %
1#	0	2#	0.5
3#	1	4#	2
5#	3	6#	5

2.2 性能表征

热导率测试:采用热常数分析仪(Hot-Disk, TPS1500,瑞典);相变温度及相变潜热测试:采用差示扫描量热仪(NETZSCH, STA409PC/PG,德国)。热重分析:采用热重分析仪(TGA4000,美国);红外光谱分析:采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, NEXUS-670,美国 PE 公司)。

2.2.1 热分析 图 2 是 6 个样品的 DSC 曲线,由图可见,1#~6# 样品 DSC 曲线均出现了一个明显的相变峰,相变峰值温度相近,约在 60 ℃ 左右,其中,3# 样品最高为 62.8 ℃,6# 样品最低为 57.2 ℃。1#~6# 样品中,融化过程温度最大变化为 4%,可见,CNT 的添加对相变温度影响较小。

此外,样品的相变潜热随着 CNT 含量增加而下降,且趋势逐渐趋于平缓。6# 样品相变潜热为 107 J/g,比 1# 样品降低了 28%。

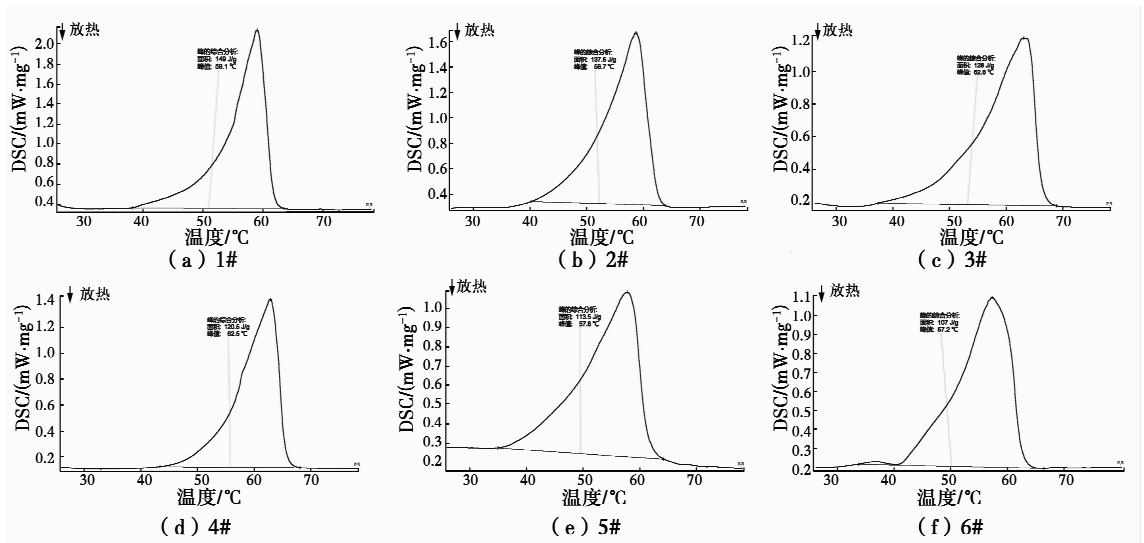


图 2 不同样品的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves of different samples

2.2.2 热导率 表 2 是各样品的热导率值,从表中可以看出,添加 CNT 后复合相变材料的热导率有了显著的提高。6 # 样品热导率为 0.65 W/m · K,比 1 # 样品提高了 103%。进一步添加时,热导率的增加趋势逐渐减缓,这主要是由于当 CNT 含量增加时,CNT 之间会发生局部团聚。

表 2 样品热导率

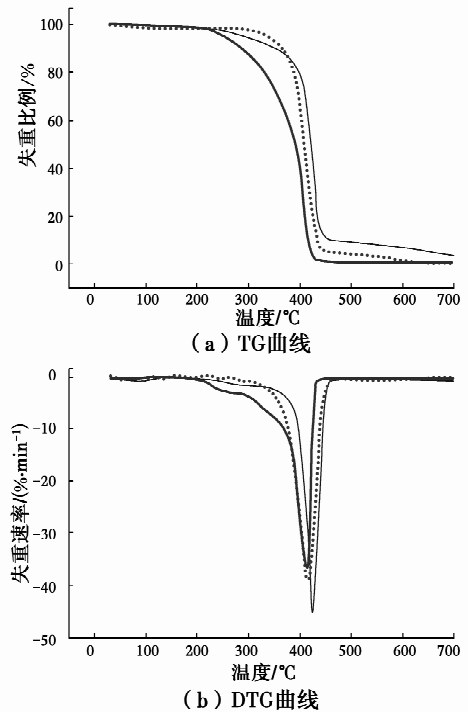
Table 2 Sample thermal conductivity

样品	$\lambda/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	样品	$\lambda/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$
1 #	0.32	2 #	0.42
3 #	0.50	4 #	0.56
5 #	0.61	6 #	0.65

从上述测试结果可见,6 # 样品相变温度适宜,添加 CNT 后相变潜热变化不大,而且热导率明显提高,以下对其进行进一步分析。

2.2.3 热重 图 3 是 6 # 样品的 TG-DTG 曲线,从图中可以看出,6 # 样品的热分解温度为 395.4 °C,终止温度为 439.3 °C,最大热分解速率对应的温度为 421.3 °C,比纯 PEG 提高了 12.8 °C,比 1 # 样品的最大热分解速率所对应的分解温度提高了 7.9 °C,且在温度 395 °C 以下范围内样品的热稳定性能较好,不易挥发分解,TG 曲线和 DTG 曲线变化一致都保持水平直线,说明在升温过程中相变材料没有失重现象,显示制备的复合相变材料热性能很好。

2.2.4 傅里叶红外变化 图 4 为 1 # 和 6 # 样品的傅里叶变化红外光谱图。图中 1 # 和 6 # 样品的红外光谱相似,没有发生显著的变化,即表明 CNT 的



注: — a:PEG6000b:1# — c:6#

图 3 样品的 TG 曲线和 DTG 曲线

Fig. 3 The TG and DTG curve of the sample

添加没有影响相变材料的分子结构,二者发生的仅为物理变化,并没有新的物质生成。

2.2.5 循环稳定性 图 5 为 6 # 样品经过不同循环次数后的 DSC 曲线。经过 50、100、150、200 次循环后,样品的峰型未发生变化,峰位置变化不大。样品的相变峰值温度最大变化值为 3.1%,相变潜热的最大变化值为 3.4%,显示添加 CNT 后样品在相变过程中热稳定性较好。

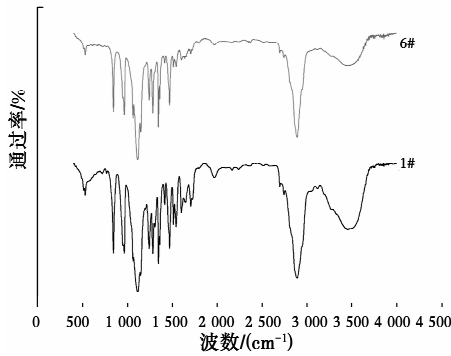


图 4 样品的红外光谱图

Fig. 4 Infrared spectrogram of the sample

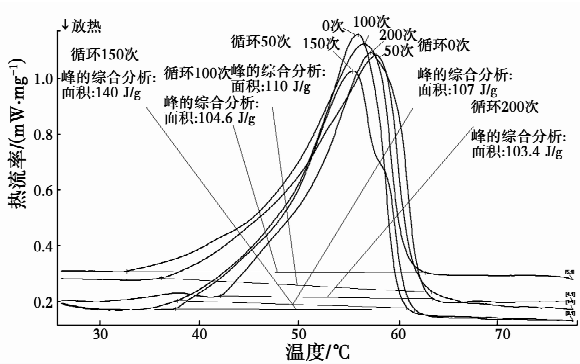


图 5 不同循环次数下的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves under different cycles

3 通风井通风效果分析

用制备的 6# 样品制作相变集热墙, 安装在太阳能通风井壁进行实验测试。通风井道的尺寸为 300 mm(L)×130 mm(W)×1 300 mm(H), 相变集热墙下部空气入口尺寸为 300 mm(L)×130 mm(H), 玻璃盖板为 4 mm 的普通玻璃。集热墙尺寸为 300 mm(L)×50 mm(W)×1 200 mm(H), 集热板外表面涂有吸收率较好的黑色油漆, 两侧和背面贴附 35 mm 保温板, 防止热量向室内散失。

井道内温度测试系统由热电偶(T 型)和数据采集仪(Agilent 34972A)组成; 井道出口风速采用热敏风速仪(testo 425)测试, 井道通风量由风速及井道截面积计算。实验装置位于广州, 测试日期为 2016 年 8 月 17—19 日, 以 18 日 00:00 到 24:00 的数据进行分析。

3.1 壁面温度分析

图 6 是太阳能通风井壁面温度实测值, 从中可知, 随着室外大气环境的温度上升, 通风井各壁面的温度也随之上升, 并在 16:00 时室外大气、玻璃表面、集热面、相变蓄热材料温度均达到最大值, 分别为 36.6、49.4、59.7、57.1 °C。集热面和相变蓄热材

料在 14:30—19:30 时段温度均在 50 °C 以上, 其中最大值出现在 16:00, 比太阳辐射强度最大值延迟约 1 h。

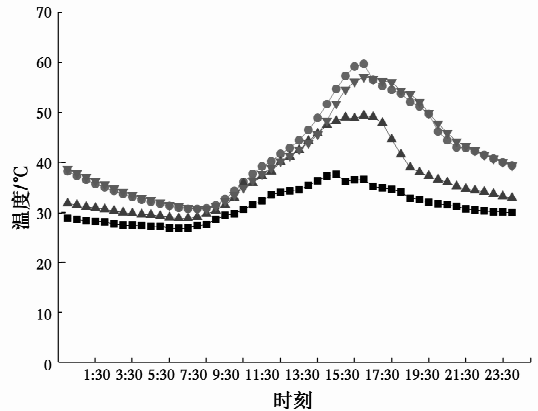


图 6 太阳能通风井壁面温度值

Fig. 6 Wall temperature of solar ventilation shaft

3.2 通道中垂直方向温度分析

图 7 为井道中垂直方向上、中、下 3 个不同高度下的温度实测值, 3 个测点分别距底面 1 200、800、400 mm 处。在 10:00—21:00 时段, 井道内空气平均温度比室外大气温度高 5~13.7 °C, 最大温差出现在 16:30, 并且当太阳辐射逐渐减弱甚至消失后的一段时间, 相变蓄热材料继续释放热量加热井道中的空气, 为自然通风提供了较大的热压差。井道垂直方向上 3 个测点的温度在整个测试过程中都比集热面的温度低。在 21:00 之后, 由于相变蓄热材料放热量的减少, 井道内外温差逐渐减小, 并在凌晨 4:00—6:00 时, 达到最低, 此时井道内的平均温度与室外温差约为 3.0 °C 左右。

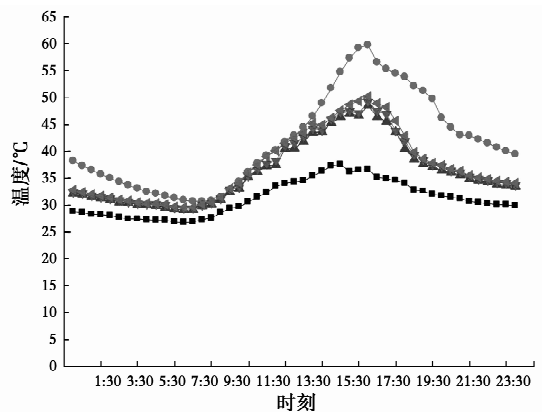


图 7 井道中垂直方向不同高度温度实测值

Fig. 7 Measured temperatures of different height in the vertical direction in the shaft

在垂直方向上的温度变化依次为: 通道上部 >

通道中部>通道下部。这说明在通风井工作时,井道中的空气温度主要受集热面的影响,接近集热面的空气被加热后向上运动,在井道垂直方向形成温度差,上部和中部的温度比下部的温度高。在 10:00—21:00 时段,通道上部与通道下部温差约为 1.0~3.0 ℃。

3.3 通风井的通风量

图 8 是太阳能通风井风量值,在 10:00—21:00 时段,井道出风口处的风速为 0.4~0.74 m/s,风量为 55.0~103.9 m³/h,其中在 17:00 风速和风量达到最大值。21:00 之后,风速逐渐降低至 0.25~0.35 m/s 之间(风量约为 35~50 m³/h),并且通风量的变化趋势与集热面温度的变化趋于一致。当白天太阳辐射增强时,集热面得热量随之增大,吸收的热量增加,用来加热通道内空气的热量增大,通风井道中空气的温度升高,井道内外热压差也逐渐增大,从而在井道中形成了较强的“烟囱效应”。

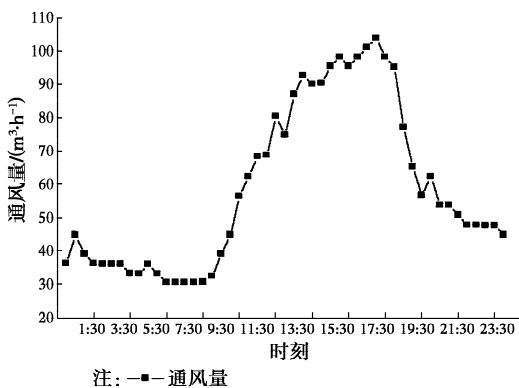


图 8 太阳能通风井自然通风量

Fig. 8 Natural ventilation volume in a solar ventilation shaft

4 结论

根据太阳能通风井蓄热单元的技术需求,制备了含 5% 的 CNT 复合相变蓄热材料,其样品的热导率为 0.65 W/m·K,相变潜热为 107 J/g,样品经多次循环后相变温度和相变潜热衰减较小,具有较好的循环稳定性;将制备的复合相变蓄热材料应用于太阳能通风井实验系统,在 10:00—21:00 时段,自然通风量为 55.0~103.9 m³/h,具有良好的自然通风效果。

参考文献:

[1] RAKESH K, LEI C W. A scaling investigation of the laminar convective flow in a solar chimney for natural ventilation [J]. International Journal of Heat and Fluid

Flow, 2014, 45(2): 98-108.

- [2] XU J L, LIU W H. Study on solar chimney used for room natural ventilation in Nanjing [J]. Energy and Buildings, 2013, 66: 467-469.
- [3] CORDEAU, SEBASTIEN, BARRINGTON, et al. Heat balance for two commercial broiler barns with solar preheated ventilation air [J]. Biosystems Engineering, 2010, 107 (3): 232-241.
- [4] RAKESH K, LEI C W. Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8): 1811-1819.
- [5] 苏亚欣, 柳仲宝. 太阳能烟囱自然通风的一维稳态模型 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 102-107
- SU Y X, LIU Z B. One dimensional steady model for natural ventilation of solar chimney [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33 (5): 102-107. (in Chinese)
- [6] LIU Z Y, YAO Y P, WU H Y, et al. Numerical modeling for solid-liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage [J]. Applied Energy, 2013, 112: 1222-1232.
- [7] HARALD M. Enthalpy and temperature of the phase change solid-liquid - An analysis of data of compounds employing entropy [J]. Solar Energy, 2013, 95: 290-299.
- [8] WANG W L, YANG X X, FANG Y T, et al. Preparation and performance of form-stable polyethylene glycol/silicon dioxide composites as solid-liquid phase change materials [J]. Applied Energy, 2009, 86(2): 170-174.
- [9] BEDECARRATS J P, CASTAING-LASVIGNOTTES J, STRUB F, et al. Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part I: Experimental results [J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(10): 2486-2494.
- [10] LU D F, DI Y Y, TAN Z C, et al. Low-temperature heat capacities, and thermodynamic properties of solid-solid phase change material bis (1-octylammonium) tetrachlorocuprate [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, 111(1): 213-218.
- [11] ZHOU X M. Preparation and characterization of PEG/MDI/PVA copolymer as solid-solid phase change heat storage material [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(3): 2041-2045.
- [12] CAO Q, LIU P S. Hyperbranched polyurethane as novel solid-solid phase change material for thermal energy storage [J]. European Polymer Journal, 2006, 42(11): 2931-2939.
- [13] CHANG L, DOMINIC G. Experimental study of the

- phase change heat transfer inside a horizontal cylindrical latent heat energy storage system [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 82: 100-110.
- [14] MURRAY R E, GROLX D. Experimental study of the phase change and energy characteristics inside a cylindrical latent heat energy storage system: Part 2 simultaneous charging and discharging [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 724-734.
- [15] MING L, MARTIN BELUSKO N H, STEVEN T, et al. Impact of the heat transfer fluid in a flat plate phase change thermal storage unit for concentrated solar tower plants [J]. *Solar Energy*, 2014, 101(3): 220-231.
- [16] KHAMIS M M. Effect of natural convection on conjugate heat transfer characteristics in liquid minichannel during phase change material melting [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 228 (3): 491-513.
- [17] 王元明. 基于太阳能通风装置固-固相变蓄热材料的性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2016.
- WANG Y M. Study on the properties of solid-solid phase change heat storage materials based on solar ventilation system [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016. (in Chinese)

(编辑 胡玲)