

# 相变蓄热蜂窝陶瓷蓄放热性能研究

沈 翰<sup>1,2</sup>, 熊志波<sup>1\*</sup>, 周涛涛<sup>1</sup>, 吴志根<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学环境科学与工程学院, 上海

Email: 183770135@st.usst.edu.cn, \*xzb328@163.com, \*wuzhigen@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021年5月10日; 录用日期: 2021年7月8日; 发布日期: 2021年7月15日

## 摘 要

本文采用熔融浸渍法, 将无机盐相变蓄热材料渗入到陶瓷基体当中, 得到一种新型复合相变材料。研究拟在保持原有蜂窝陶瓷高导热传热性能、多孔通道的几何结构的基础上, 提高蜂窝陶瓷蓄热性能。本文基于新型蜂窝陶瓷表征的热物性参数, 采用Fluent软件, 对添加硝酸钠的新型相变蓄热蜂窝陶瓷在高温条件的蓄放热过程进行模拟。研究结果表明, 新型相变蓄热蜂窝陶瓷基体中, 陶瓷的进口风速从1 m/s上升到10 m/s时, 蓄热功率提高了328%。相变材料比例从10%提升到50%时, 蓄热量提高了89%, 陶瓷的蓄热性能得到有效提高。

## 关键词

蜂窝陶瓷, 相变蓄热, 数值模拟

# Study on Heat Storage and Release Performance of Phase Change Heat Storage Honeycomb Ceramics

Han Shen<sup>1,2</sup>, Zhibo Xiong<sup>1\*</sup>, Taotao Zhou<sup>1</sup>, Zhigen Wu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Power, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: 183770135@st.usst.edu.cn, \*xzb328@163.com, \*wuzhigen@tongji.edu.cn

Received: May 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 15<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, the inorganic salt phase change heat storage material was infiltrated into the ceramic matrix by melt dipping method, which obtains a new composite phase change material. This re-

\*通讯作者。

search intends to improve the thermal performance of honeycomb ceramics on the basis of maintaining the high thermal conductivity, heat performance of the original honeycomb ceramics and the geometric structure of the porous channels. Based on the thermophysical parameters of the new composites, Fluent software was used to simulate the heat storage process under high temperature conditions. The research results show that in the new phase-change heat storage honeycomb ceramic matrix, when the inlet wind speed of the ceramic increases from 1 m/s to 10 m/s, the heat storage power is increased by 328%. When the proportion of phase change materials is increased from 10% to 50%, the heat storage capacity is increased by 89%, and the heat storage performance of ceramics is effectively improved.

## Keywords

Honeycomb Ceramics, Phase Change Heat Storage, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

太阳能是各种可再生能源中最重要的基本能源,它具有资源丰富、取之不尽、用之不竭、不会污染环境和破坏生态平衡等优点。然而,太阳能具有能量密度低、间歇性、不稳定性特点,影响了太阳能的收集和利用。在太阳能热发电中使用高效蓄热材料,可以提高太阳能的利用率和稳定性,降低运行成本,对太阳能热发电技术有重要意义[1] [2]。

蓄热材料根据蓄热方式的不同又可分为显热蓄热、化学蓄热和潜热蓄热材料。无机盐陶瓷基复合相变蓄热材料是一种新型的潜热相变蓄热材料。这种蓄热材料是由相变材料和陶瓷基体组成,相变材料分布在基体中。在受热且温度超过相变材料的熔点时,相变材料熔化吸收潜热,大大降低了蓄热系统的成本同时提高了热效率[3] [4]。

张兴雪[5]等以 MgO 为基体材料, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 为相变材料,采用粉末烧结工艺制成一种新型高温复合相变蓄热材料,结果表明复合相变蓄热材料具有良好的化学相容性和较高的蓄热密度,能够实现高温蓄热。王胜林[5]等以陶土为基体材料,采用粉末压力成型工艺研究不同种类熔盐与陶土复合后的蓄热效果,得出比较理想的熔融盐和陶土的配比为 4:6~4.5:5.5。许超[6]等以电熔镁砂和白刚玉为镁铝尖晶石陶瓷基体材料,以 KCl、KF 复合盐为相变材料,用原位反应烧结法制备熔盐尖晶石复合高温相变储能材料,结果表明,烧结温度为 1000℃和熔盐含量为时,制备的储能材料的相变潜热为 70.98 KJ/Kg,蓄热密度为 240 KJ/Kg。吴建锋[7]等以 SiC 粉、高岭土、钠长石等为原料,采用有机泡沫浸渍法制备泡沫蓄热陶瓷,结果表明,在 1400℃烧结温度下制备出气孔率为 78%、热扩散率为  $5.335 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  的蓄热材料。

尽管国内外对于蜂窝陶瓷蓄热材料的研究已经不少[8]-[14],但针对不同比例相变材料的蓄热蜂窝陶瓷在不同风速下的蓄热性能研究较少,需要开展基础研究,优化配置相变蜂窝陶瓷结构。本文在对新型蜂窝陶瓷热物性表征的基础上,采用数值模拟方法对添加硝酸钠的新型相变蓄热蜂窝陶瓷在高温条件下的蓄热性能进行模拟,分析其蓄热传热性能及效率。

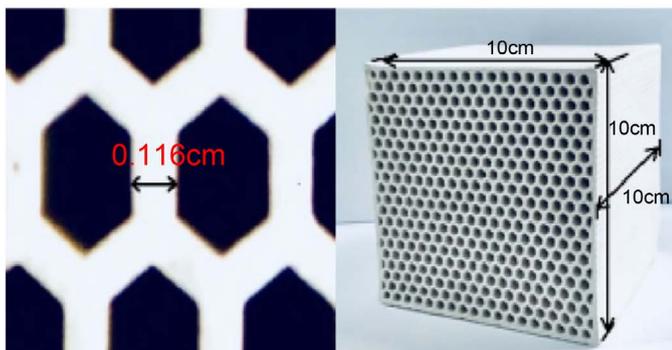
## 2. 物理模型与数值方法

### 2.1. 蜂窝陶瓷几何结构及物理模型

本文研究对象为蜂窝陶瓷浸润硝酸钠相变材料的蓄热体,其几何结构如图 1 所示,长 10 cm,宽 10 cm,

厚度 10 cm，具体结构参数见表 1。计算模型如图 2 所示，将其置于一长通道中进行换热，通道进口距蜂窝陶瓷 50 cm，出口距蜂窝陶瓷 100 cm，截面为 10 cm \* 10 cm，外壁面均为绝热条件。

本文选择干空气为传热流体，进口风速从 1 m/s 至 10 m/s 变化。由于相变材料为硝酸钠，其相变温度为 306℃，加热条件下空气进口温度设置为 350℃，相变材料初始温度为 250℃。

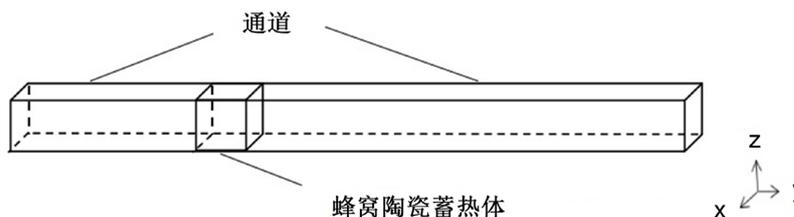


**Figure 1.** Physical and geometric characteristics of honeycomb ceramics  
**图 1.** 蜂窝陶瓷实物及几何特征

**Table 1.** The main structure of honeycomb ceramics

**表 1.** 蜂窝陶瓷的主要结构参数

性能	指标	单位
尺寸	100 × 100 × 100	mm
孔洞形状及尺寸	正六边形，边长 2.1	mm
壁厚	1.16	mm



**Figure 2.** Numerical simulation structure and calculation model  
**图 2.** 数值模拟结构及计算模型

## 2.2. 材料物性

蜂窝陶瓷作为基体，其具体物性参数见表 2。NaNO<sub>3</sub> 作为浸润到蜂窝陶瓷的相变材料，其物性参数见表 3。干空气作为换热介质，在标准大气压、温度为 250℃ 下的干空气密度、比热容以及动力粘度分别为 0.675 kg/m<sup>3</sup>，1.034 kJ/(kg·K) 和 4.117 × 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s。

**Table 2.** The main properties of honeycomb ceramics

**表 2.** 蜂窝陶瓷的主要性能

性能	指标	单位
单个重量	1.005	Kg
导热系数	3.29	W/m·K

Continued

比热容	1.32	kJ/kg·K
体积密度	2.51	g/cm <sup>3</sup>
热膨胀系数	2.96	×10 <sup>-6</sup> /°C, RT~800°C
吸水率	16.8	%
抗热震性能	室温~800°C, 10 次循环以上	
软化温度	1500	°C

**Table 3.** Physical parameters of NaNO<sub>3</sub>**表 3.** NaNO<sub>3</sub> 的物性参数

物性参数	NaNO <sub>3</sub>
体积密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.261
熔化温度 $T_m$ (°C)	306
比热容 $c_p$ (KJ/(kg·K))	1.82
相变潜热 $L$ (kJ/kg)	173.3
动力粘度 $\eta$ (kg/(m·s))	2.5E-3
膨胀系数 $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )	7.15E-4
导热系数 $\lambda$ (W/(m·K))	0.5

研究采用 4 种比例的硝酸钠浸润到蜂窝陶瓷, 数值分析其相变蓄热性能。这 4 种比例的陶瓷蓄热体的密度、比热、相变潜热及相关计算方法见表 4。

**Table 4.** Physical parameters of ceramics under four working conditions**表 4.** 四种工况下陶瓷的物性参数

	S1	S2	S3	S4
硝酸钠含量 $\varepsilon$	0%	10%	40%	50%
体积密度(g/cm <sup>3</sup> ) $\rho = \rho_{\text{Taoci}} + \varepsilon\rho_{\text{PCM}}$	2.51	2.74	3.41	3.64
比热容(kJ/kg·K) $C_p = \frac{\varepsilon\rho_{\text{PCM}}C_{p\text{PCM}} + \rho_{\text{Taoci}}C_{p\text{Taoci}}}{\rho}$	1.32	1.36	1.45	1.48
相变潜热(kJ/kg) $L = \frac{\varepsilon\rho_{\text{PCM}}L_{\text{PCM}}}{\rho}$	0	14.32	45.90	53.82

### 2.3. 控制方程及数值方法

描述计算单元体内部对流换热、多孔陶瓷壁面导热以及相变换热等流动传热行为的控制方程可参考文献[15], 对于相变材料的熔解相变过程, 其控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \text{div}(\eta \text{grad}T) + \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t}$$

$$h = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT, \Delta H = \begin{cases} LT > T_m \\ 0, T < T_m \end{cases}$$

其中  $T_{ref}$  为初始温度,  $T_m$  相变材料的熔化温度,  $L$  为相变材料潜热。

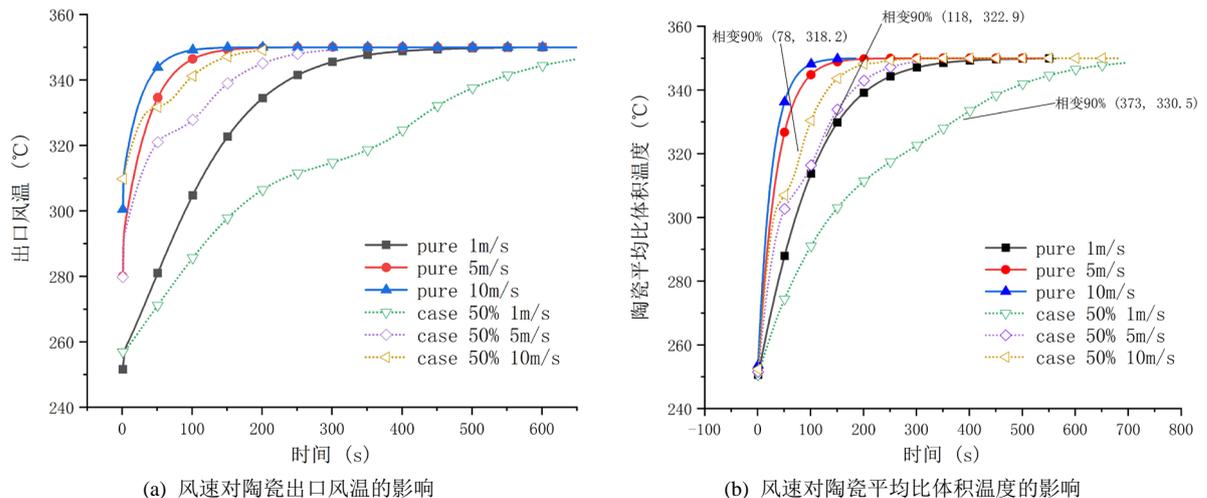
空气流动通道内:  $Re = ud/v > 2300$ , 由此可知计算控制单元内部空气运动为湍流状态。根据物理模型, 计算单元进口风速  $v$ 、进口风温  $T_{ref}$  为常量, 出口为充分发展条件。因此左右边界(y 方向)为进出口边界条件,  $v = 0$ ,  $\partial u/\partial y = 0$ ,  $\partial \omega/\partial y = 0$ ,  $\partial T/\partial y = 0$ ; 上下、前后边界(x、z 方向)为绝热固体边界且液相无滑移,  $u = v = \omega = 0$ 。

本文采用 CFD 商业软件 Fluent 来进行求解, 其中流动采用标准  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型, 对流项采用二阶迎风格式, 压力与速度的耦合计算采用 SIMPLE 算法, 迭代初始速度均取零。相变过程采用非稳态模型, 计算时间步长为 1 秒, 每一时间步迭代次数为 500 次, 该收敛条件能够充分保证每一个时间步内传热流动计算达到收敛。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 风速对蓄热性能的影响

本论文首先研究风速对陶瓷的蓄热性能的影响, 图 3 展示了风速与陶瓷出口风温和陶瓷平均比体积温度的关系。可以看出, 在纯蜂窝陶瓷基体中, 通过提高进口风速, 陶瓷出口风温与陶瓷平均比体积温度的上升速度都逐渐加快, 上升到目标温度(完全相变温度)所需要的时间也随之变短, 在同一时间节点的陶瓷出口风温与陶瓷平均比体积温度也随着进口风速的提升而变大(如表 5 所示)。当进口风速由 1 m/s 分别提高到 5 m/s 和 10 m/s 时, 陶瓷蓄热体的平均蓄热功率分别提高了 109% 和 205%, 蓄热速率得到显著提升。



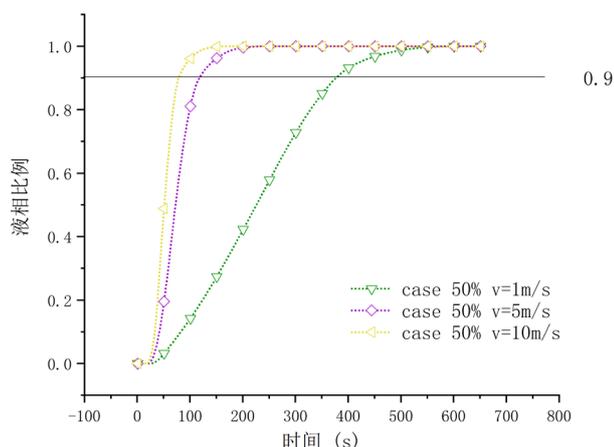
**Figure 3.** The influence of wind speed on ceramic outlet air temperature and ceramic average temperature  
**图 3.** 风速对陶瓷出口风温和陶瓷平均比体积温度的影响

此外, 在同一风速下, 纯蜂窝陶瓷与浸润了 50% 硝酸钠相变材料的蜂窝陶瓷对比可以发现, 后者出口风温与平均比体积温度的上升速率明显要缓慢许多, 上升到目标温度所需时间也更长。风速为 5 m/s 时, 浸润了 50% 硝酸钠相变材料的蜂窝陶瓷与纯蜂窝陶瓷相比, 平均蓄热功率增加了 62%。显然, 蜂窝陶瓷浸润了 50% 硝酸钠相变材料后, 其蓄热性能得到显著提高。

图 4 为浸润了 50% 硝酸钠相变材料的蜂窝陶瓷在不同风速下液相随时间的变化曲线, 结合表 6 可以发现相变材料完全相变过程中最后 10% 阶段的时间过长, 一度达到完全相变时间的 58%, 因而本论文选取相变材料相变达到 90% 作为研究基准更有利于蓄热性能等数据分析。

**Table 5.** The influence of wind speed on the heat storage performance of materials (pure honeycomb ceramic)  
**表 5.** 风速对材料蓄热性能的影响(纯蜂窝陶瓷)

风速(m/s)	蓄热时间(s)	平均蓄热功率(kW) $P = \frac{\rho V c_p \Delta T}{t}$
1	563	0.588
5	270	1.227
10	185	1.791



**Figure 4.** The change of liquid phase with time under different wind speeds (PCM case 50%)

**图 4.** 不同风速下液相随时间的变化(PCM case 50%)

**Table 6.** Phase transition time of materials under different wind speeds (PCM case 50%)

**表 6.** 不同风速下材料的相变时间(PCM case 50%)

风速(m/s)	相变 90%时间(s)	相变 90%~100%时间(s)	相变 90%~100%时间占比(%)
1	373	296	44
5	118	150	56
10	78	108	58

表 7 显示从相变 90%所需时间和平均蓄热功率两个方面比较风速对陶瓷蓄热性能的影响,不同风速下 S4 蜂窝陶瓷中相变材料发生 90%相变时,可以发现: 1) 风速越高,相变材料相变时间越短。当进口风速由 1 m/s 分别提升到 5 m/s 和 10 m/s 时,相变到达 90%所需时间分别缩短了 68%和 79%。2) 风速越高,蓄热体的平均蓄热功率越高,当进口风速由 1 m/s 分别提升到 5 m/s 和 10 m/s 时,蓄热功率分别提高了 196%和 328%,提升效果较为明显。显然,风速越高时,相变蓄热陶瓷的整体蓄热效果越好。

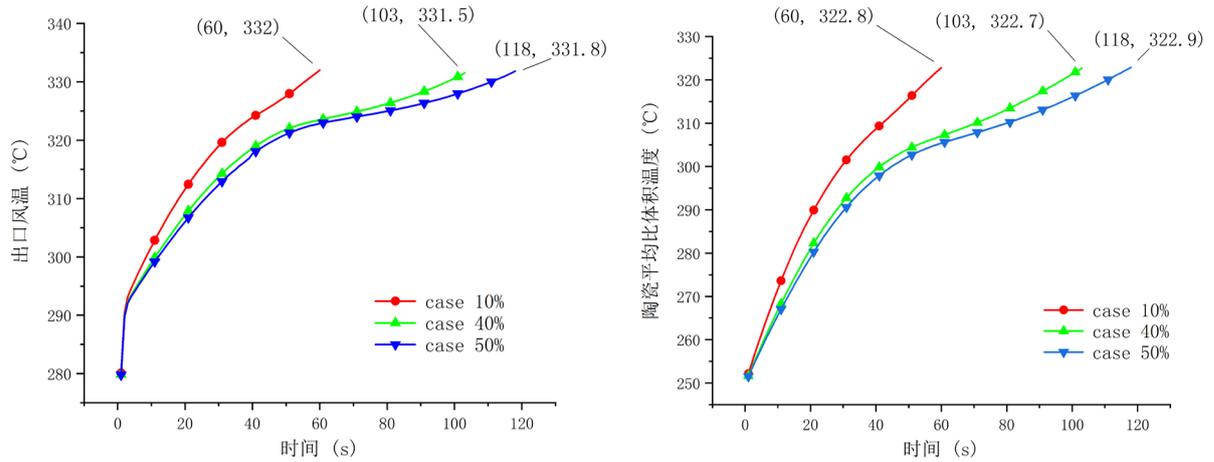
**Table 7.** The influence of wind speed on the heat storage performance of materials (PCM case 50%)

**表 7.** 风速对材料蓄热性能的影响(PCM case 50%)

风速(m/s)	陶瓷出口风温(°C)	陶瓷平均比体积温度(°C)	相变达 90%所需时间 t (s)	平均蓄热功率(kW) $P = \frac{\rho V (c_p \Delta T + L)}{t}$
1	320.9	330.5	373	0.674
5	331.9	322.9	118	1.992
10	335.8	318.2	78	2.884

### 3.2. 材料浸润比例对蓄热性能的影响

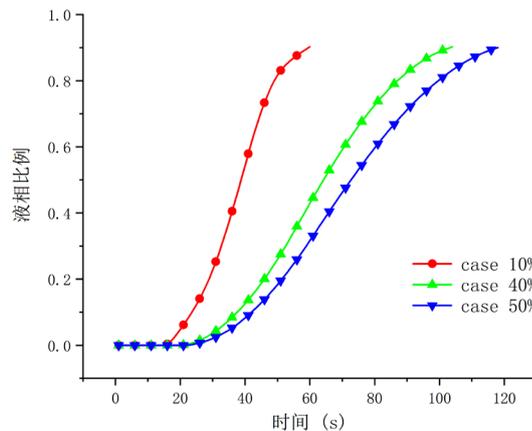
图5显示的是相变蓄热陶瓷中不同相变材料比例对陶瓷蓄热性能的影响,可以看出,在进口风速5 m/s下,相变材料浸润比例越高,陶瓷的出口风温与比体积平均温度上升越缓慢。由图6、表8可以发现,当陶瓷的相变材料浸润比例从10%分别提升到40%和50%时,蜂窝陶瓷的平均蓄热功率变化不大,但蓄热量分别增加了67%和89%,陶瓷的整体蓄热效果得到有效的提高。



(a) 相变材料比例对出口风温的影响( $v = 5 \text{ m/s}$  相变 90%) (b) 相变材料比例对陶瓷平均比体积温度的影响( $v = 5 \text{ m/s}$  相变 90%)

**Figure 5.** The influence of phase change material ratio on ceramic outlet air temperature and ceramic average temperature ( $v = 5 \text{ m/s}$  phase change 90%)

**图 5.** 相变材料比例对陶瓷出口风温和陶瓷平均比体积温度的影响( $v = 5 \text{ m/s}$  相变 90%)



**Figure 6.** Time change diagram of the liquid phase ratio of phase change materials with different wetting ratios ( $v = 5 \text{ m/s}$ )

**图 6.** 不同浸润比例的相变材料液相比例随时间变化图( $v = 5 \text{ m/s}$ )

**Table 8.** The influence of phase change material ratio on the heat storage performance of materials ( $v = 5 \text{ m/s}$ )

**表 8.** 相变材料比例对蓄热性能的影响( $v = 5 \text{ m/s}$ )

相变材料比例 $\varepsilon$	陶瓷出口风温(°C)	陶瓷平均比体积温度(°C)	相变达 90%所需时间(s)	平均蓄热功率(kW)	$P = \frac{\rho V (c_p \Delta T + L)}{t}$
10%	332.0	322.8	60	2.07	
40%	331.5	322.7	103	2.01	
50%	331.8	322.9	118	1.992	

## 4. 结论

本文基于新型蜂窝陶瓷热物性表征, 采用数值方法对添加硝酸钠的新型相变蓄热蜂窝陶瓷蓄放热性能进行计算模拟, 研究了新型相变蓄热材料蓄热性能相比纯蜂窝陶瓷的提高程度。结果表明:

- 1) 蜂窝陶瓷基体可以对提高传热效率具有强化作用。
- 2) 不管是纯蜂窝陶瓷还是复合相变蓄热陶瓷, 提高陶瓷的进口风速, 蓄热功率增大, 材料的相变时间会变短, 陶瓷的整体蓄热速率得到提升。
- 3) 复合相变蓄热陶瓷基体中相变材料的比例越高, 材料的相变时间越长, 陶瓷的蓄热性能得到提高。

## 参考文献

- [1] 刘强. 包裹相变材料的蓄热氧化铝基复相蜂窝陶瓷的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [2] 方斌正. 太阳能潜—显热储热复相陶瓷的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 张静. 相变储热换热装置传热特性的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [4] 苏云鹏. 基于新型光热储能相变材料的实验和数值研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [5] 张兴雪, 王华, 王胜林. 一种新型高温复合相变蓄热材料的制备[J]. 昆明理工大学学报, 2006, 31(5): 17-19.
- [6] 袁坚, 汤李纓, 许超, 李宏. 用 DTA 方法研究  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-4\text{SiO}_2$  微晶玻璃的晶化[J]. 武汉工业大学学报, 1997, 19(4): 75-77.
- [7] 吴建锋, 张亚涛, 徐晓虹, 等.  $\text{TiO}_2$  对荃青石微晶玻璃结构及性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(6): 10-13.
- [8] Wang, H., Ma, X.M., Zhang, L.G., Zhang, X.M. and Mei, Y.Y. (2021) Numerical and Experimental Study of Effect of Paraffin Phase Change Heat Storage Capsules on the Thermal Performance of the Solar Pond. *Energy Exploration & Exploitation*, **39**, 1010-1023.
- [9] Xia, R.Q., Zhang, W.Y., Yang, Y.N., Zhao, J.Q. and Liu, Y. (2021) Transparent Wood with Phase Change Heat Storage as Novel Green Energy Storage Composites for Building Energy Conservation. *Journal of Cleaner Production*, **296**, Article ID: 126598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126598>
- [10] Wang, X., Liu, J., et al. (2006) Experiment Research on a Kind of Novel High Temperature Phase Change Storage Heater. *Energy Conversion and Management*, **47**, 2211-2222. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.12.004>
- [11] Kalogirou, S.A. (2002) Parabolic Trough Collectors for Industrial Process Heat in Cyprus. *Energy*, **27**, 813-830. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00018-X)
- [12] 陈之帆, 孙志高, 等. 纳米  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /硬脂酸/十八醇纳米复合相变蓄热材料的性能研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 422-427.
- [13] 李强, 蔡有杰, 等. 复合相变材料蓄放热性能分析及研究[J]. 化工时刊, 2021, 35(3): 1-3.
- [14] 方桂花, 刘殿贺, 等. 复合相变材料的最新研究进展[J/OL]. 化工新型材料, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210514.0855.008.html>, 2021-05-14.
- [15] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.