# 相变储热材料及技术的研究进展\*

# 张贺磊,方贤德,赵颖杰

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京 210016)

摘要 综述了相变储热的研究进展,简要介绍了相变材料的分类以及各类相变材料的性能、储热机理和优缺点。对相变材料的各种强化传热技术进行了综述与讨论,概述了相变储热技术的研究及评价方法,并探讨了相变材料在温度控制、新能源开发利用以及提高能源利用效率等方面的应用,展望了未来相变材料及其强化传热技术的发展方向和应用前景。

关键词 相变材料 储热 强化传热

中图分类号:TB3 文献标识码:A

# Progress in Phase Change Materials and Technologies

ZHANG Helei, FANG Xiande, ZHAO Yingjie

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** An overview of the research on phase change energy storage is conducted. Various phase change materials are summerized from the view of points of the classification, performance, energy storage mechanism, the advantages and disadvantages. Different heat transfer enhancement techniques for phase change materials are reviewed, and the methods of phase change energy storage technology research and evaluation are summarized. The application of phase change materials is discussed, such as the temperature control, the development and utilization of new energy sources, and the improvement of energy efficiency. The development trends and the application potential of phase change materials and heat transfer enhancement are indicated.

**Key words** phase change material, heat storage, heat transfer enhancement

随着人类社会经济的不断发展及能源的大量消耗,节能环保已成为全球关注的话题,新能源的开发利用以及提高能源利用效率已经成为各国研究开发的重点。利用储热材料实现能量供应与需求的平衡,能有效提高能源利用效率,达到节能环保的目的,在能源、航天、建筑、农业、化工等诸多领域具有广阔的应用前景,已成为世界范围内研究的热点。

材料储热的本质是将一定形式的能量在特定的条件下储存起来,并在特定的条件下加以释放和利用。热能存储有3种形式:显热储热、潜热储热和化学反应储热。显热储热是利用材料自身的温度变化来存储和释放热能,而不发生任何其它的变化[1,2],这种储热方式简单,成本低,在工作过程中温度会随储存或释放的能量大小发生持续性变化。潜热储存是利用储热材料在发生相变时吸收或放出热量来储热与放热[3-5],也称为相变储热。化学反应储热是利用储热材料相接触时发生可逆的化学反应来储放热能[6,7]。实际上,潜热储热和化学反应储热常常伴随着温度的变化,即与显热储热混合在一起,难以分离。

相变材料在相变的过程中会吸收或释放大量潜热,具有储热密度高、体积小巧、温度控制恒定、节能效果显著、相变温度选择范围宽、易于控制等优点,因此广泛应用于热量储

存和温度控制领域。

# 1 相变材料

相变储热材料有多种分类方式,按相变形式,可分为固固、固-液、液-气、固-气储热材料<sup>[8]</sup>;按照相变温度范围,可分为高温、中温和低温储热材料;按照其成分,可分为无机类、有机类(包含小分子和高分子合成材料)以及复合储热材料。理想的相变储热材料应具备相变潜热高、可逆性好、导热性好、相变速率快、体积变化小、性能稳定、廉价易得、安全无毒、无腐蚀性等特点。

目前,固-液相变储热材料是相变材料中研究最多和应用最广的一类材料,主要包括结晶水合盐类、熔盐类、金属合金、高级脂肪烃、脂肪酸及有机高分子合成材料等,种类繁多,性能各异。固-固相变材料包括高密度聚乙烯、多元醇以及层状钙钛矿等。固-固相变储热材料并不是指相变材料的相态发生改变,而是晶型发生了变化。液-气、固-气储热材料相变时,尽管其相变潜热较大,但气体体积变化很大,保存不便,经济实用性差,因此目前在储热实际应用中很少见。

#### 1.1 无机类相变储热材料

无机固-液相变储热材料主要有结晶水合盐类、熔盐类、

<sup>\*</sup> 江苏高校优势学科建设工程资助项目

金属合金等。结晶水合盐类大都属于中低温相变材料,主要包括碱金属及碱土金属的卤化物、硫酸盐、磷酸盐、硝酸盐、醋酸盐、碳酸盐的水合物,比较常见的有  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  (芒硝)、 $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ 、 $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 、 $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  (苏打)、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  等。这类相变材料的优点是价格便宜、体积蓄热密度大、熔解热大、导热系数比有机相变材料大、一般呈中性,但在使用过程中会出现过冷、相分离等不利因素,储热性能不稳定<sup>[5,9]</sup>。

熔融盐主要是某些碱金属的氟化物、氯化物、氧化物以及碳酸盐、硝酸盐等,一般具有较高的相变温度,相变潜热高,但热导率较低,且在高温下具有较强的腐蚀性[10-13]。金属或合金相变潜热大,热导率高,储热密度大,体积变化小,无过冷,但在高温下有强烈的腐蚀性[14-16]。

无机固-固相变储热材料主要包括层状钙钛矿类、 $KHF_2$ 、 $NH_4SCN$ 等。它们的相转变焓较高,过冷度小,热稳定性较好。

# 1.2 有机类相变储热材料

有机类相变材料一般成型好,无过冷和相分离现象,腐蚀性小,性能稳定,但导热率一般较低。常用的有机固-液相变材料包括高级脂肪烃类、脂肪酸或其酯或盐类、醇类、芳香烃类、芳香酮类、酰胺类、氟利昂类和多羟基碳酸类等,另外还包括聚烯烃类、聚多元醇类、聚烯醇类、聚烯酸类、聚酰胺类等一些高分子材料[17]。目前最常见的有机相变材料是石蜡,其由直链烷烃混合而成,分子通式为 C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>,其物理和化学性能稳定,能反复使用,无过冷或晶液分离现象,且具有价格便宜、无毒、无腐蚀性等优点。其缺点是热导率低、融解和凝固时的体积变化较大<sup>[18]</sup>。

固-固有机相变材料包括多元醇类以及有机高分子类等。 多元醇类主要包括季戊四醇(PE)、新戊二醇(NPG)、三羟甲 基丙烷(TMP)、三羟甲基乙烷(TME)、2,2-二羟甲基丙醇 (PG)和三羟甲基氨基甲烷(TAM)等。它们具有相转变焓较高、体积变化小、过冷度低、无腐蚀、热效率高、使用寿命长等 优点。而高分子类相变材料主要是一些高分子交联树脂,如 联聚烯烃类、交联聚缩醛类和一些接枝共聚物等,它们具有 易加工成型、导热率高、熔解热较高等特点[17]。

# 1.3 复合相变储热材料

为了克服单一无机或有机相变材料的不足,改善相变材料应用效果以及拓展其应用范围,研究和开发复合材料逐渐成为储热材料研究的热点。复合相变储热材料主要指性质相似的二元或多元化合物的一般混合体系或低共熔体系、形状稳定的固-液相变材料、无机有机复合相变材料混合;另一种是定型相变材料。混合而成的复合相变材料制造简单,可以根据混合比例的不同改变其相变温度,但也需要封装,容易发生泄漏,使用不安全。定型相变材料是利用胶囊、多孔材料或高分子材料等作为支撑将相变材料包容在一个个微小空间中,以保证相变时维持一定的形状。这类材料不需封装器具,减少了封装成本和封装难度,避免了材料泄漏的危险,增大了使用的安全性,减小了容器的传热热阻,有利于相变

材料与传热流体间的换热[19]。

# 2 相变材料强化传热研究

许多常用的相变材料存在导热系数低这一缺点,如石蜡、脂肪酸类相变材料等,这在一定程度上制约了相变材料的实际应用。为了提高相变材料的导热性能,使相变材料得到更为广泛的应用,常常采用以下几种方式:在相变材料中添加金属、石墨、碳纤维等材料;将不同的相变材料进行组合构成复合材料;在封装壁面上加肋片;进行胶囊封装等。

#### 2.1 添加材料

在相变材料中添加金属、石墨、碳纤维、纳米材料等,可以改善相变材料的导热性能。金属是热的良导体,具有较高的导热系数,采用金属基结构<sup>[20,21]</sup>或在相变材料中添加金属物<sup>[22]</sup>、金属粉末<sup>[23,24]</sup>或金属泡沫<sup>[25]</sup>,都能够强化相变材料的传热性能。但有些金属与相变材料之间可能存在不相容性,且由于金属密度较高,容易导致整个蓄热系统的质量增加。

将石墨制成粉末加入石蜡中也可以提高其导热性能<sup>[26,27]</sup>,其导热性良好,无毒害作用,且价格便宜。而应用更为广泛的是利用石墨独特的晶体结构以及良好的吸附性能,将其作为支撑材料制备定型的相变储热复合材料<sup>[28,29]</sup>。这样制备的相变储热材料具有不会发生泄漏,不需要进行封装等优点,但多次使用后相变材料容易析出。

碳纤维具有较高的导热系数和很强的抗腐蚀能力,相对密度较低,同时又能与绝大多数相变材料相容,因此在强化传热方面具有很大的优势。Fukai等<sup>[30-32]</sup>对利用碳纤维提高相变材料的导热系数方面做了大量的研究,证实在一般情况下,传热效果随着碳纤维体积分数和直径的增大而不断加强,但存在最优值,同时还发现碳纤维的排布方向及其有序性也是影响导热系数的重要因素。

在 Choi 等<sup>[33]</sup>提出纳米流体的概念之后,添加各种纳米材料而增强材料的传热性能成为一个新的研究热点。纳米材料会改变储热材料的结构,且纳米粒子与液体间具有微对流现象,增强了能量传递过程,因此增大了导热系数。在目前的研究中,所添加的纳米粒子主要有纳米金属(如 Al、Cu、Ni 等)、金属氧化物(如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CuO 等)、纳米石墨、纳米碳纤维以及纳米胶囊等,都能大幅提高相变材料的导热性能<sup>[34-36]</sup>。添加纳米材料组成复合材料,其性能十分优越,少量添加即可大幅提高储热材料的导热性能,但纳米复合材料的制备和热物性能比较复杂,有待进一步深入研究。

添加材料能够大幅提高相变材料的导热效率,但会增加整个系统的质量,因此添加时需合理考虑质量增幅与导热效率增幅的关系。

#### 2.2 组合相变材料

将两种或两种以上的相变材料采用一定的方法进行组合,得到新的组合相变材料,可以改变相变材料的相变温度并能提高相变材料的导热性能。相变材料的组合方式主要有两种:一种是沿传热流体流动方向分别放置相变温度不同的相变材料储热单元;另一种是沿垂直于传热流体流动方向上放置相变温度不同的相变材料。另外,也有可能是这两种

方式的组合。

Farid<sup>[37,38]</sup>首次提出将不同相变温度的相变材料进行组 合,并建立其传热理论模型,同时分别从理论和实验上验证 了不同的相变材料的合理组合能够提高传热速率。方铭 等[39.40] 采用焓法运用数值计算模拟了不同 PCM 质量配比下 组合 PCM 储热系统的储热性能,结果表明组合式 PCM 储热 系统存在着组分配比的最优值,且 PCM 之间的相变温差越 大,其质量分数的变化对系统储热性能的影响越大,合理选 择不同相变温度的相变材料进行组合对于提高储热单元的 储热性能有重大意义。王剑峰等[41]对组合相变材料建立一 维模型,并采用有限差分法进行模拟计算分析,证实不同相 变材料的组合存在最优分配,可使其相变时间比单一相变材 料减少 25%~40%。Gong 等[42]和 Cui 等[43]采用数值模拟 方法,都证实了采用组合相变材料可以强化传热,并能降低 出口温度波动。Shaikh等[41]对几种不同排列的组合相变材 料进行数值模拟,指出自然对流对组合相变材料的强化传热 具有极其重要的影响,而不同的组合方式以及各个材料的热 物理性能都会影响强化传热所增加的程度。

采用组合相变材料可以在不同的温度下发生相变,在工作温区变化较大的储热系统有着独特的应用,不但可以起到强化传热的作用,而且能降低热流出口的温度波动,但是对于不同的相变材料如何进行组合而达到最优的强化传热,需进一步研究和探讨。

#### 2.3 肋片

在储热系统中增加肋片,增加了传热表面积,降低对流传热的热阻,以达到强化传热的目的,也是一种较为常用的方法。根据流体流动通道形状的不同,目前主要包含两种形式,即管式和板式。制作肋片的材料一般是导热系数高、质量轻的金属,比较常见的有铝和铜。

目前,有关肋管式相变储热系统的强化传热研究已经比 较成熟,常常在圆管外围增加直肋及环肋来提高传热效率, 缩短传热时间。Al-Abidi 等[45,46]对几种具有不同肋片数量 的管式直肋相变储热器建立二维模型,采用数值模拟的方式 研究了肋片长度、厚度及数量对传热效果的影响,证实传热 效果受肋片厚度的影响不大,而受肋片长度和数量的影响 大,一般来说肋片越长数量越多传热效果越好。Ismail 等[47] 对几种不同直径的环肋进行了实验研究,发现工作流体的温 度、流量以及环肋的直径越大,固液交界面的移动速度越大, 传热效果越好。朱冬生等[48]采用数值模拟方法对有无环肋 的圆管传热特性进行对比,证实采用铝翅片可以大大强化相 变过程的传热,提高放热速率,放热速率随着翅片间距的减 小而加快,两者呈近似直线关系。Agyenim 等[49] 对采用环 肋、直肋以及无肋片的3种管式相变储热器进行比较,证实 直肋可以起到很好的强化传热效果,而环肋由于数量太少对 深层的传热效果影响很小。

近年来还发展了一些新型的其它形状的肋片,如螺旋肋、针状肋等。Liu等<sup>[50]</sup>设计了一种螺旋型肋片,并以硬脂酸为相变材料的储热单元,研究了硬脂酸的熔化过程特性,发现采用这种螺旋型肋片后,导热和自然对流都有显著的提

高,相变材料的有效导热系数增大了3倍。唐刚志等<sup>[51]</sup>采用 赤藻糖醇作为相变材料,设计了一套针翅管式相变传热蓄热 系统,其也具有较好的传热效果。

另外,在流体管道内部增加肋片也可增强传热,但这种方式会增加一定程度的流动阻力。Zhang 等[52]在光滑管内增加肋片,采用有限差分法建模计算,发现传热的增强程度与肋片的长度、数量有关,同时还发现在低雷诺数流动时管内增加肋片对传热的增强效果更加显著。Kasperski 等[53]提出了多种可在圆管内部使用的肋片,并对层状排列肋片建立其传热的数学模型,通过计算得出采用这种肋片可以使传热效率提高 11%~14%。

肋板式相变储热器结构紧凑,其平板式结构具有很大的传热面积,能够极大地增强传热效果,因此在强化传热中也得到了广泛的应用。Costa等[54]采用有限差分法对板式相变储热器建立二维模型,运用数值模拟方法分别对有肋和无肋进行计算分析,证实增加肋片能够有效地提高传热效率,同时指出这一方法也可用于指导相变储热器的设计。Gharebaghi等[55]采用有限体积法对板肋式相变储热器建立二维模型,对不同肋片间距及肋片厚度的板肋相变储热系统进行了数值模拟,发现肋片间距对相变所需时间的影响很大,间距越小,相变所需时间越短,而肋片厚度对相变所需时间影响不大。廖海蛟等[56]对板肋式储热器在不同放置方式下的传热效果进行了实验研究,发现在重力和自然对流的作用下,竖直放置的储热器储放热时间最短,而水平放置时最长。

通过添加肋片来提高储热系统的传热性能已经是一种 普遍采用的方法,但在实际应用中应合理选取肋片,综合考 虑肋片的尺寸、形状及布置方式等,以达到最佳的强化传热 效果。

# 2.4 胶囊密封

相变材料微胶囊是应用微胶囊技术在固-液相变材料微粒表面包覆一层性能稳定的膜而构成的具有核壳结构的复合相变材料。微胶囊相变材料由内核和外壳两部分构成。内核是指包裹在微胶囊内部的相变材料(也称为芯材、囊芯),常见的有结晶水合盐、共晶水合盐、直链烷烃、石蜡类、脂肪酸类和聚乙二醇等。外壳是指由成膜材料所形成的包覆膜(也称为壁材、囊壁),通常为合成高分子材料,如聚乙烯、聚苯乙烯、聚脲、聚酰胺、环氧树脂、脲醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂等,该类材料成膜性好、性能稳定、机械强度高、致密性好,具有良好的弹性和韧性,且原料易得,价格便宜。此外,有些微胶囊相变材料中还含有成核剂等其它助剂,用来改善相变材料的性能[57]。

目前,制备胶囊相变材料的方法主要有原位聚合法、界面聚合法、相分离凝聚法、喷雾干燥法以及溶胶-凝胶法等。几种方法各有其优缺点,其中原位聚合法和界面聚合法使用最为广泛<sup>[58,59]</sup>。原位聚合法是指反应单体及催化剂全部位于芯材液滴的内部或者外部,单体在微胶囊体系的连续相中是可溶的,而聚合物在整个体系中是不可溶的,聚合反应发生在芯材液滴的表面,所产生的聚合物沉积在囊芯表面并包覆而形成微胶囊。这种胶囊制备方法主要受壁材预聚体原

料以及芯壁比、乳化剂与分散剂的种类和用量、搅拌速度、温度和 pH 值等因素的影响,其成球容易,壁膜厚度、微粒大小及表面形态可控制,成本低,易于实现工业化<sup>[60]</sup>。界面聚合法是利用两种反应活性很高的单体在两种互不相溶的溶剂界面处发生聚合反应,从而在多孔支撑体上形成一层很薄的致密层。这种制备微胶囊的工艺方便简单、反应快、效果好,不需要昂贵复杂的设备,可以在常温下进行。但其对壁材要求较高,被包覆的单体要有较高的反应活性,且不可避免地夹杂有少量未反应的单体,所形成的壁膜一般可透性较高,不适于包覆要求严格密封的芯材<sup>[61,62]</sup>。

采用微胶囊相变材料,增大了传热面积,因此其粒径大小会直接影响材料的传热、传质和加工性能。微-纳米胶囊相变材料颗粒微小且壁薄,能够极大地提高相变材料的传热性能,但随着粒径的减小,胶囊可能会出现过冷现象,耐热性也可能降低<sup>[63]</sup>。胶囊封装可以避免相变材料发生泄漏和腐蚀,防止相变物质与周围环境发生反应,与传统 PCM 相比具有更好的稳定性,同时还能控制相转变时 PCM 的体积变化,提高相变材料的使用效率<sup>[64]</sup>。

此外,将微胶囊相变材料添加在单相流体中可构成一种固-液两相流体,即潜热型功能流体,其储热密度高,应用过程中温差波动小、强化传热的效果显著,在建筑采暖、空调系统及传热器等领域有着广阔的应用前景[65]。

#### 2.5 复合强化传热技术

在大多数关于相变储热的强化传热的研究中,往往只采 用一种强化传热技术,而在同一相变储热系统中使用两种或 两种以上的强化传热技术则称为复合强化传热。将不同的 强化传热技术使用在同一相变储热系统中,能够更好地提高 强化传热效果,比单一强化传热技术更具优势。Seeniraj 等[66]对同时采用组合相变材料及肋片强化传热的太阳能集 热器相变储热模块进行了数值模拟计算,发现其流体出口的 温度比采用单一相变材料更为稳定。夏莉等[67]利用数值模 拟方法研究了4种相变储热单元的放热性能,包括无强化传 热、仅采用肋片强化传热、仅采用添加膨胀石墨强化传热、同 时采用肋片和添加膨胀石墨进行强化传热的复合强化传热, 结果表明强化传热措施在传热流体流量大、传热温差大的储 热单元中作用显著,目采用复合强化传热措施的强化效果最 好。此系统在换热流体流量为 0.02 m/s 时,采用复合强化 传热的放热时间与不采用强化传热的放热时间相比可缩短 50%

目前,虽然关于复合强化传热技术的研究不多,但其强化传热效果比单一强化传热技术更好,能够克服单一强化传热技术的缺点,具有很大的优势,发展空间广阔。

# 3 相变储热技术的研究及评价方法

相变储热技术的研究方法有3种,即实验、数值模拟和理论分析。实验是最基础也是目前最常用的研究方法,可以用于各个方面的研究,如相变材料的开发、传热技术的强化、相变储热技术的应用等,其通用性好,结果较为准确,但成本高、周期长、能耗大。数值模拟也是一种常用的研究方法,常

用于肋片强化传热、组合相变材料等研究。数值模拟结果与研究者对被模拟物理过程的理解程度及其采用的数值模拟方法有关,常用的数值模拟方法包括有限差分法[54]、有限容积法[55]、有限元法、边界元法等。数值模拟方法可以获得大量的有用信息,成本低、耗时短,但它的计算精度自始至终都受到人们的怀疑。相变储热的理论分析主要集中在如何建立更好的相变传热模型以及求得它们的解析解。而基础理论研究目前还比较薄弱,其计算量大,常常计算困难,能得到的有用信息少,但基础理论是所有研究的基础,能够指导工程设计及其它方面的研究,因此需增大这方面的研究力度。

相变储热技术评价主要包括 3 个方面,即热物性指标、力学性能指标以及经济评价。热物性指标主要有相变温度、潜热、导热系数、比热容、耐热性、热稳定性以及亲水性等,其中相变温度和潜热最为重要<sup>[58]</sup>。力学性能指标是指胶囊相变材料囊壁、定型相变材料及其它相变材料包装外表皮的机械强度、弹性、韧性及致密性等。经济指标评价是指应用相变储热技术所增加的工程造价及其对能源的节约是否经济科学,如选择的相变材料价格是否经济,利用相变储热技术所增加的工程成本及其能够取得的经济效益是否合理。

# 4 相变储热技术的应用及发展

目前,相变储热材料已广泛应用于诸多领域,总的来说按照其应用目的可概括为3个方面:新能源的开发利用、提高能源利用率以及温度控制。

温度控制是相变储热的一项基本功能,所有的相变储热系统在工作时对温度都具有一定的调节作用,应用领域也十分广泛。例如,在建筑节能领域,采用相变蓄能围护结构能够降低建筑运行能耗,节省运行费用,提高建筑热舒适度,减少温室气体排放,降低环境污染<sup>[68]</sup>。在现代农业中,相变材料可用于温室和暖房的温度控制,同时还能自动调节温室内的湿度。在纺织服装中加入相变材料可以增强服装的保暖功能,甚至使其具有智能化的内部温度调节功能<sup>[69]</sup>。另外在许多其它领域(如航空航天、电子设备、医药卫生等)也可以利用相变材料进行温度控制。

新能源的开发利用主要是指利用相变材料储存太阳能,在需要时释放热量。目前太阳能相变储热装置已得到了广泛的应用,如利用相变材料进行太阳能发电降低发电成本,提高发电的有效性,它可以实现高效满负荷运行,容量能够缓冲,具有可调度性、年利用率高、电力输出更平稳等特点[70.71]。太阳能相变储热水箱能够弥补太阳能受气候影响的缺陷,降低运行费用,储存等量的热量体积可比常规热水箱缩小 50%,减少了散热面积,且放热平稳,优点十分明显[72]。

提高能源利用率主要有两个方面的应用:一是回收利用工业废热或余热;二是对电力负荷的移峰填谷。柯秀芳等[<sup>73</sup>] 阐述了相变储热技术在工业加热过程中应用的可行性和节能意义,并对相变储热系统用于锻造加热过程的系统技术性能进行了分析,指出采用相变储存系统把生产时的余热储存起来,能够提高热效率、节约燃料费用、降低运行成本。

Kaizawa 等<sup>[74]</sup>利用可移动相变储热设备收集工厂废热,并将 其运输到需要的地方进行供热,从而解决长距离输送造成的 热量损失问题,收到不错的效果。而对电力的移峰填谷是指 在电力供应充足时,将电能加以转化利用并储存起来,在用 电高峰期再释放出来加以利用,虽然并不减少总的耗电量, 但可以提高发电设备的利用率,从而节约能源,对电网的安 全运行及经济效益也十分有益。例如采用相变储冷空调在 夜间用电低谷时进行制冰储存冷量,在用电高峰时直接利用 所储存的冷量工作<sup>[75]</sup>;而采用定型相变材料板制作的电热系 统,在晚间用电低谷时利用电能加热,而白天再向屋内放热 的功能进行供热<sup>[76]</sup>。

# 5 结语

20世纪70年代能源危机以来,关于相变储热基础及应用的研究迅速崛起并不断发展,目前已经取得了很大的成就,但在很多方面还不完善,有不少问题尚待解决。对于相变储热材料的开发,必须朝着理想相变材料的要求,今后研究的主要方向有:提高相变材料相变潜热;改善相变材料的导热性能和提高其相变速率;开发复合材料以弥补单一材料性能的不足;降低成本,实现工业化等。

关于相变材料的强化传热技术,今后研究的主要方向有:一是开发新型复合相变材料来克服单一相变材料的不足、提高相变材料导热系数,特别是纳米微胶囊技术的发展;二是如何合理地设计肋片尺寸及布局,以达到最优的强化传热效果;三是如何合理地将几种强化传热技术组合起来,以达到更优强化传热效果。

在应用方面,应建立齐全的相变材料及其物性的数据库,以方便根据实际选择合适的相变材料;简化复合相变材料的制备工艺、降低成本,实现工业化生产;合理扩展相变材料的应用领域,最大程度地节约能源、保护环境。

#### 参考文献

- 1 卡尔皮士, 苏波金娜. 显热的季节性储存[J]. 习亚华, 译. 制冷,1992(1):93
- 2 Fernandez A L, Martinez M, Segarra M, et al. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage [J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 2010, 94(10):1723
- 3 陈爱英,汪学英,曹学增.相变储能材料的研究进展与应用 「J〕. 材料导报,2003,17(5):42
- 4 钟学明,肖金辉,邓安民,等. 相变材料及其在贮热中的应用[J]. 江西化工,2003(4):27
- 5 Zalba B, Marin J M, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications[J]. Appl Therm Eng, 2003, 23(3): 251
- 6 李爱菊,张仁元,周晓霞. 化学储能材料开发与应用[J]. 广东工业大学学报,2002,19(1):81
- 7 杨启超, 张晓灵, 王馨, 等. 吸收式化学蓄能的研究综述 [J]. 科技通报, 2011, 56(9), 669

- 8 Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials [J]. Solar Energy, 1983, 30 (4):313
- 9 凌双梅,高学农,尹辉斌. 低温相变蓄热材料研究进展[J]. 广东化工,2007,34(3):48
- 10 Kenisarin M M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2010,14(3):955
- 11 Khare S, Dell'Amico M, Knight C, et al. Selection of materials for high temperature latent heat energy storage[J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 2012, 107:20
- 12 崔海亭, 袁修干, 侯欣宾. 高温熔盐相变蓄热材料[J]. 太阳能,2003(1):27
- 13 王胜林, 王华, 祁先进, 等. 高温相变蓄热的研究进展[J]. 能源工程,2004(6):6
- 14 Birchenall, Ernest C, Riechman, et al. Heat storage in eutectic alloys[J]. Metall Trans A: Phys Mater Sci A,1980,11 (8):1415
- 15 Farkas, Diana, Birchenall C E. New eutectic alloys and their heats of transformation[J]. Metall Trans A: Phys Mater Sci A,1985,16(3):323
- 16 孙建强, 张仁元. 金属相变储能与技术的研究与发展[J]. 材料导报,2005,19(8):99
- 17 沈学忠,张仁元. 相变储能材料的研究和应用[J]. 节能技术,2006,24(5):460
- 18 盛青青,章学来. 石蜡类复合相变材料的研究进展[J]. 制 冷空调与电力机械,2008,29(2):18
- 19 张东,康韡,李凯莉. 复合相变材料研究进展[J]. 功能材料,2007,38(12):1936
- 20 Hoogendoorn C J, Bart G C J. Performance and modeling of latent heat stores [J]. Solar Energy, 1992, 48(1):53
- 21 Khan M A, Rohatgi P K. Numerical solution to a moving boundary problem in a composite medium [J]. Numerical Heat Transfer, 1994, 25(2): 209
- 22 Ettouney H M, Alatiqi I, Al-Sahali M, et al. Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems[J]. Renew Energy, 2004, 29 (6):841
- 23 朱恂,廖强,李隆键,等.添加物对石蜡相变螺旋盘管蓄热器蓄热和放热性能的影响[J]. 热科学与技术,2005,4(1): 14
- 24 Mettawee E M S, Assassa G M R. Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system[J]. Solar Energy, 2007,81(7):839
- 25 Chen Z Q, Gu M W, Peng D H. Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin [J]. Appl Therm Eng, 2010, 30(14):1967
- 26 张秀荣,朱冬生,高进伟,等.石墨/石蜡复合相变储热材料的热性能研究[J].材料研究学报,2010,24(3):332

- 27 Pincemin S, Olives R, Py X, et al. Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage[J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 2008, 92(6):603
- 28 Py X, Olives R, Mauran S. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44(14): 2727
- 29 Sari A, Karaipekli A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material [J]. Appl Therm Eng, 2007, 27(8):1271
- 30 Fukai J, Kanou M, Kodama Y, et al. Thermal conductivity-enhancement of energy storage media using carbon fibers [J]. Energy Convers Manag, 2000, 41(14):1543
- 31 Fukai J, Hamada Y, Morozumi Y, et al. Effect of carbonfiber brushes on conductive heat transfer in phase change materials[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45(24):4781
- 32 Fukai J, Hamada Y, Morozumi Y, et al. Improvement of thermal characteristics of latent heat thermal energy storage units using carbon-fiber brushes: Experiments and modeling [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2003, 46(23):4513
- 33 Choi S U. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [C]// Developments and applications of non-newtonian flows. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1995:99
- 34 Khodadadi J M, Hosseinizadeh S F. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage [J]. Int Commun Heat Mass Transfer, 2007, 34(5):534
- 35 李建立, 薛平. 纳米技术在相变储热领域的应用[J]. 中国 科技论文在线, 2008, 3(4): 299
- 36 席丽霞,金学军. 纳米复合相变材料[J]. 材料热处理技术, 2012,41(14):5
- 37 Farid M M. Storage of solar energy with phase change[J]. J Solar Energy Res, 1986, 4:11
- 38 Farid M M, Kanzawa A. Thermal performance of a heat storage module using PCMs with different melting temperature: Experimental [J]. Solar Energy Eng, 1989, 112(2): 125
- 39 方铭,陈光明.组合式相变材料组分配比与储热性能研究 [J].太阳能学报,2007,28(3):304
- 40 Fang M, Chen G M. Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system [J]. Appl Therm Eng, 2007, 27(5):994
- 41 Wang J F, Chen G M, Zheng F. Study on phase change temperature distributions of composite PCMs in thermal energy storage systems[J]. Int J Energy Res, 1999, 23(4): 277
- 42 Gong Z X, Mujumdar A S. Cyclic heat transfer in a novel storage unit of multiple phase change materials [J]. Appl

- Therm Eng, 1996, 16(10):807
- 43 Cui H T, Yuan X G, Hou X B. Thermal performance analysis for a heat receiver using multiple phase change materials [J]. Appl Therm Eng, 2003, 23(18): 2353
- 44 Shaikh S, Lafdi K. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage[J]. Energy Conver Manag, 2006, 47(15): 2103
- 45 Al-Abidi A A, Mat S, Sopian K, et al. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers[J]. Appl Therm Eng, 2013, 53(1):147
- 46 Al-Abidi A A, Mat S, Sopian K, et al. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2013, 61:684
- 47 Ismail K A R, Lino F A M. Fins and turbulence promoters for heat transfer enhancement in latent heat storage systems [J]. Experimental Therm Fluid Sci, 2011, 35(6):1010
- 48 朱冬生, 徐婷, 杨硕, 等. 管翅式热泵相变储能器的数值模拟[J]. 流体机械, 2011, 39(6):53
- 49 Agyenim F, Eames P, Smyth M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins[J]. Solar Energy, 2009,83(9):1509
- 50 Liu Z L, Sun X, Ma C F. Experimental investigation on the characteristics of melting processes of stearic acid in an annulus and its thermal conductivity enhancement by fins[J]. Energy Convers Manag, 2005, 46(6):959
- 51 唐刚志,李隆健,崔文智,等. 针翅管式相变蓄热器传热特性的实验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2008,29(3):69
- 52 Zhang Y W, Faghri A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube[J]. Heat Mass Transfer, 1996, 39(15):3165
- 53 Kasperski J, Nems M. Investigation of thermo-hydraulic performance of concentrated solar air-heater with internal multiple-fin array[J]. Appl Therm Eng, 2013, 58(1):411
- 54 Costa M, Buddhi D, Pergamon A O. Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction [J]. Energy Convers, 1998, 39(3):319
- 55 Gharebaghi M, Sezai I. Enhancement of heat transfer in latent heat storage modules with internal fins[J]. Numerical Heat Transfer Part A; Applications, 2008, 53(7);749
- 56 廖海蛟, 吕兰尚. 低温肋板式储热器的相变传热性能研究 [J]. 化工设备与管道,2011,48(1): 17
- 57 毛华军, 晏华, 谢家庆. 微胶囊相变材料研究进展[J]. 功能材料,2006,37(7):1022
- 58 李建立, 薛平, 韩晋民, 等. 微胶囊化相变材料的制备与评价方法[J]. 精细化工,2007,24(9):843
- 59 潘向萍, 邢宏龙. 纳米胶囊的制备方法及其在相变材料中的应用[J]. 科技信息,2008(1):42

- 60 詹世平,周智轶,黄星,等.原位聚合法制备微胶囊相变材料的进展[J].材料导报:综述篇,2012,26(12):76
- 61 汤蓓蓓,徐铜文,武培怡. 界面聚合法制备复合膜[J]. 化 学进展,2007,19(9):1428
- 62 王建平,张兴祥. 相变材料微胶囊研究进展[J]. 材料导报, 2007,21(4):107
- 63 谢望平, 汪南, 朱冬生, 等. 相变材料强化传热研究进展 [J]. 化工进展, 2008, 27(2):190
- 64 叶四化,郭元强,吕社辉,等. 微胶囊相变材料及其应用「J]. 高分子材料科学与工程,2004,20(5):6
- 65 方玉堂, 万伟军. 潜热型功能热流体的研究进展[J]. 材料导报:综述篇,2009,23(8):108
- 66 Seeniraj R V, Narasimhan N L. Performance enhancement of a solar dynamic LHTS module having both fins and multiple PCMs[J]. Solar Energy, 2008, 82(6):535
- 67 夏莉, 张鹏, 王如竹. 套管式相变储能单元的强化换热[J]. 化工学报,2011,62(S1);37
- 68 王馨, 张寅平, 肖伟, 等. 相变蓄能建筑围护结构热性能研究进展[J]. 科技通报, 2008, 53(24): 3006
- 69 王志强,曹明礼,龚安华,等. 相变储热材料的种类、应用及展望[J]. 安徽化工,2005(2):8

- 70 Bayón R, Rojas E, Valenzuela L, et al. Analysis of the experimental behaviour of a 100 kWth latent heat storage system for direct steam generation in solar thermal power plants [J]. Appl Therm Eng, 2010, 30(17): 2643
- 71 左远志, 丁静, 杨晓西. 中温相变蓄热材料研究进展[J]. 现代化工,2005,25(12):15
- 72 陈立. 相变蓄热式太阳能热水系统及其应用[J]. 能源技术, 2002,23(5):203
- 73 柯秀芳, 张仁元. 相变储热系统在工业加热过程的应用[J]. 冶金能源,2003,22(4):46
- 74 Kaizawa A, Kamano H, Kawai A, et al. Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material[J]. Energy Convers Manag, 2008, 49(4): 698
- 75 刘蓉莉, 黄晓鸣. 发展蓄冷空调技术、推动电网移峰填谷 「J]. 节能技术,2004,22(1):39
- 76 Lin K P, Zhang Y P, Di H F, et al. Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage[J]. Energy Convers Manag, 2007, 48(7):2016

(责任编辑 杨 霞)

# 欢迎订阅

# 《纳米与新材料专辑》系列特刊

为了推动我国材料科学与技术的发展,《材料导报》自2003年编辑出版《纳米与新材料专辑》系列特刊以来,得到各方面的好评。《纳米与新材料专辑》是在《材料导报》跟踪新材料发展的重点课题的基础上,对一些热门课题更加深入报道,内容涉及各种纳米材料及新材料的研究、产业化进展评述;研究成果、论文报道;应用市场分析;相关企业介绍等,反映了国内相关领域的最新研究成果。《纳米与新材料专辑》系列特刊每年5月和11月定期出版。

《纳米与新材料专辑》内容丰富、收录文章均为首次见刊的最新论文,反映了国内相关领域的最新研究成果。《纳米与新材料专辑》定价:100元/册,港、澳、台地区订户每册加收邮寄费 15元。欢迎订户直接向《材料导报》编辑部订购。

# 订阅册数

订阅每册 100 元	, (港、澳、	台地区订尸每册加收邮寄费 15	元),共	份,	合计	٦
汇款方式	□邮局汇款	:□银行汇制	t	]汇款日期_		_

# 付款咨讯

邮局付款及通讯地址

地址: 重庆市渝北区洪湖西路 18 号材料导报社 邮编: 401121 电话 / 传真: (023)63505701 联系人: 何金洋

Email: mat-rev@126.com

mat-rev@163.com

银行汇款

开户银行: 重庆银行七星岗支行 户名: 重庆天旭科技信息有限公司

帐号: 150101040006888