

大孔径规则多孔介质强化石蜡熔化的实验研究

李树谦^{1,3,4}, 刘子苑^{1,3,4}, 韩超^{1,3}, 李桐栋¹, 付建航¹, 张强武²

(1.河北水利电力学院土木工程学院, 河北 沧州 061001)

(2.河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018)

(3.河北省数据中心相变热管理技术创新中心, 河北 沧州 061001)

(4.沧州市储热及低品位余热利用型电磁供热技术创新中心, 河北 沧州 061001)

[摘要] 强化相变材料熔化是提高与之相关的储热装置效率的有效途径, 区别于既往常见的泡沫金属强化相变材料熔化, 本文以黄铜为材料设计加工了一种大孔径规则多孔介质, 并将其与石蜡和 PC 圆管组成实验段. 以只填充石蜡的实验段作为对照, 通过可视化实验和典型位置处瞬时温度的测量考察了该类型多孔介质强化石蜡熔化的作用效果和机理. 结果表明: 填充大孔径规则多孔介质实验段内的石蜡在熔化过程中无明显的糊状区. 此外, 与只填充石蜡的实验段相比, 填充大孔径规则多孔介质的实验段内固-液界面向上移动的高度较高且温升速率显著较快. 再者, 该类型多孔介质可显著强化距离加热壁面较远的测点 C_{3a} 的自然对流传热, 从而使其温度在 500 min 后高于距离加热壁面最近的测点 C_1 的温度.

[关键词] 大孔径规则多孔介质, 石蜡熔化, 固-液界面, 温升速率, 自然对流

[中图分类号] TK124, TK02 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2022)03-0020-07

Experimental Study on Enhancing Paraffin Melting Rate with the Large-Aperture Regular Porous Media

Li Shuqian^{1,3,4}, Liu Ziyuan^{1,3,4}, Han Chao^{1,3}, Li Tongdong¹, Fu Jianhang¹, Zhang Qiangwu²

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

(2.School of Architecture, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(3.Hebei Technology Innovation Center of Phase Change Thermal Management of Internet Data Center, Cangzhou 061001, China)

(4.Cangzhou Technology Innovation Center of Thermal Storage and Electromagnetic Heating with Low Grade Waste Heat, Cangzhou 061001, China)

Abstract: It is an effective way of improving related thermal storage equipment to enhance phase change materials melting rate. In the aspect of pore structure, it is different between the common foam metal and the large-aperture regular porous media developed by us, which is made of brass and is part of the test section together with paraffin and PC circular tube. Compared with the test section with only paraffin, the effect and mechanism of the large-aperture regular porous media on paraffin melting rate enhancement was investigated through visualization experiment and transient temperature measurement of typical locations. The results show that, there is no mushy zone during paraffin melting process for the test section with the large-aperture regular porous media. Additionally, the moving height of solid-liquid interface is larger and temperature rise is faster for paraffin in the test section with the large-aperture regular porous media compared with the test section with only paraffin. Also, the large-aperture regular porous media could significantly enhance natural convection at the location of measuring point C_{3a} where it is farther from the heating surface, and the temperature at this location was higher than that of the nearest measuring point C_1 after 500 minutes.

Key words: the large-aperture regular porous media, paraffin melting, solid-liquid interface, temperature rising rate, natural convection

收稿日期: 2020-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976052)、河北省自然科学基金资助项目(E2020412176)、河北省高等学校科学技术研究重点资助项目(ZD2019032)、2020 年河北省高等学校基本科研业务研究项目.

通讯作者: 李桐栋, 副教授, 研究方向: 流固耦合研究. E-mail: litongdongcz@163.com

相变储热(也称为潜热储热)技术作为节能和能源高效利用的重要手段之一,有着广泛的应用前景,涉及太阳能热储存、工业余热利用以及电子设备热控制等诸多领域^[1-3]。然而,作为相变储热技术核心的相变材料(phase change material, PCM),由于其导热系数普遍较低,导致相变储热系统无法快速进行热量的储存和释放,严重影响了系统的热性能^[4]。因此,采用相变材料的储热系统一般需要通过强化传热技术改善相变材料内部的传热性能。

在形式众多的强化传热技术中,以金属为骨架的多孔介质因其具有较高的热导率、孔隙率和面密度,被认为是改善相变材料内部传热性能最有应用前景的强化传热元件之一^[5-6]。

Li 等^[7]数值研究了糊状区传热特性、速度场分布以及糊状区厚度与多孔介质孔隙率和孔密度的依赖关系。杲东彦等^[8]利用光学显微镜和红外热成像技术对泡沫铝内石蜡融化过程进行了可视化实验研究,发现泡沫铝内石蜡融化液相中存在大量片絮状悬浮体,指出其对微观相变过程的影响,且孔隙尺度下数值模拟该现象亟待深入开展。Zhao 等^[9]研究发现泡沫金属能够显著提高 PCM 的相变速率,凝固时间较单纯 PCM 缩短 50% 以上。Martinelli 等^[10]开展了管壳式储热器中泡沫铜强化 PCM 传热性能的实验研究,通过摄像机记录固-液界面的变化,考察了相变材料体积膨胀和自然对流对相变传热的影响。盛强等^[11]实验研究了八水氢氧化钡/泡沫铜复合材料的热性能,研究表明泡沫铜不仅增强了相变材料的传热速率,且有效降低了相变材料的过冷度。

目前,用于 PCM 强化换热的金属多孔介质多为非规则结构,近年来有研究指出,在其他条件相同时规则多孔介质较非规则多孔介质具有更为优良的强化换热效果。吴志根等^[12]数值分析了多孔金属铜网架对硝酸钠融化传热的影响,研究指出,在孔隙率相同的前提下较小的孔密度能够强化自然对流。从公开报道的文献来看,关于规则金属多孔介质强化 PCM 传热的研究只有为数不多的理论和数值模拟研究,而相关的实验研究未见报道。

鉴于前述原因,同时考虑到大孔径对 PCM 相变过程中自然对流的强化作用,本文设计了一种大孔径规则金属规则多孔介质并将其应用于 PCM 融化过程,通过可视化实验探究其对 PCM 固-液界面演变行为、融化速率以及典型位置处温度变化的影响规律。据此,一方面可为规则多孔介质强化 PCM 传热研究提供较为丰富的实验数据,而且可为相关的数值模拟提供实验依据;另一方面则为新型储热装置的开发提供一定的理论依据。

1 实验部分

1.1 大孔径规则多孔介质和实验段的制备

图 1 为所设计的大孔径规则多孔介质的实物图和示意图,该类型多孔介质材质选用黄铜,其外形尺寸为 40 mm×40 mm×210 mm(长×宽×高),菱形孔尺寸和孔间距见图 1(a),经计算该规则多孔介质的孔隙率为 49.93%。

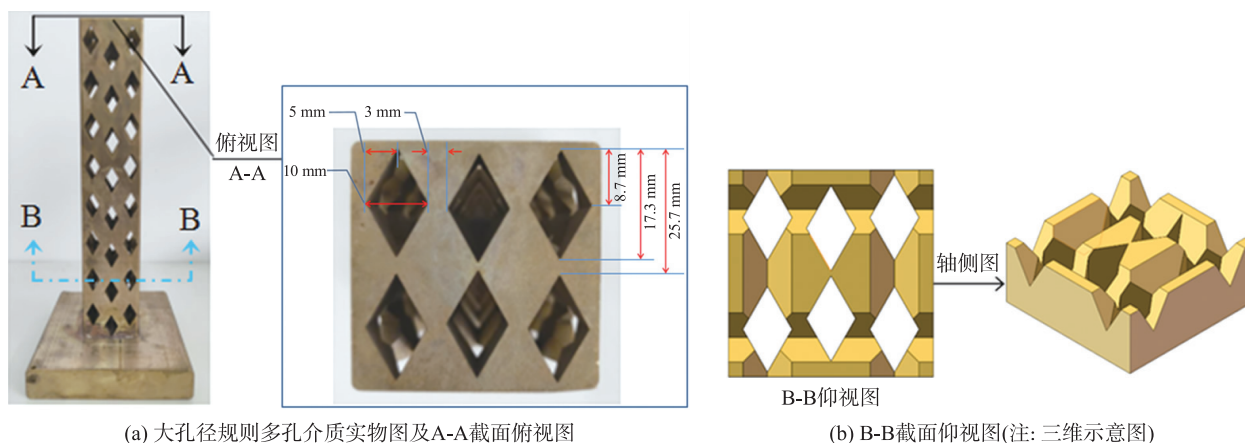


图 1 大孔径规则多孔介质实物图及示意图

Fig. 1 Picture of real product and schematic diagram of the large-aperture regular porous media

上述规则多孔介质与同种材质的基座利用焊接方式连接成整体结构,并与颗粒状石蜡一并放置于透明 PC(聚碳酸酯)圆管和铝基板组成的容器内,共同构成本实验所需的实验段,实验段中涉及的 PC 圆管尺寸为 $\phi 43\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ (外径 \times 厚 \times 高).此外,为了进一步分析该类型规则多孔介质对石蜡熔化的强化效果,以只填充相同质量石蜡的另一实验段作为对照,这两个实验段的实物图如图 2 所示.

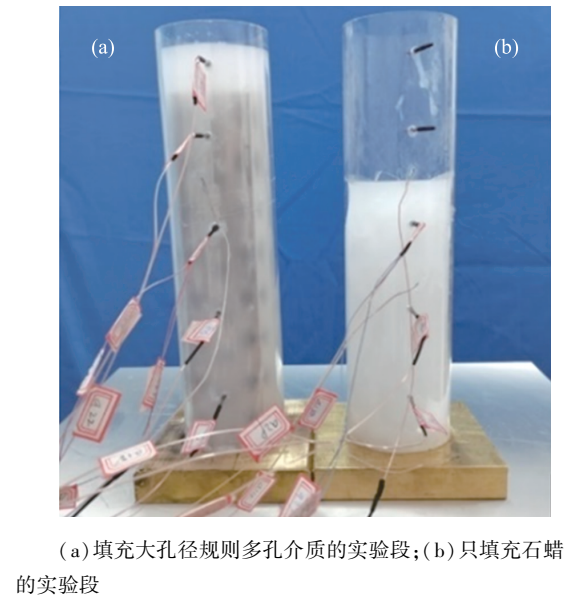


图 2 两种不同的实验段
Fig. 2 Two different test sections

1.2 实验系统及方法

在实验段制备基础上设计并搭建实验测试系统,其示意图如图 3 所示. 本实验系统主要包括加热台、温度数据采集系统、图像信息采集系统和实验段,相关设备的主要技术参数见表 1.

表 1 设备的功能及技术参数

Table 1 Function and technical parameters of equipment		
设备及型号	功能	技术参数
电加热台(X3040)	加热实验段基座	工作电压 220 V;设备功率 1 800 W;温度范围室温~450 ℃;发热面积 300 mm×400 mm(宽×长);精度为 0.1 ℃.
温度采集仪(PXIe-1073)	采集实验段中各监测点温度	测量误差 0.1 ℃
恒温水浴箱(JOANLAB BHS-1)	标定 K 型热电偶	温度范围 1~99.9 ℃;功率 300 W;精度为 0.1 ℃
高清摄像机(X311M)	采集实验段的图像信息	分辨率 1 280×1 024;最大内存 32 GB+

本实验所用石蜡和黄铜(大孔径规则多孔介质所用材料)的主要热物性见表 2.

为获取石蜡熔化过程中轴向温度分布和典型截面的周向温度分布,利用插针法分别在距 PC 圆管内壁面 20 mm 的纵断面以及距加热壁面 140 mm 处的横断面布置热电偶,热电偶的位置及其命名见图 4. 需要说明的是,只填充石蜡实验段的温度测点为 P_1, P_2, P_{3a} 和 P_{3b} ;填充大孔径规则多孔介质实验段的温度测点为 $C_1, C_2, C_{3a}, C_{3b}, C_4$ 和 C_5 .

实验方法简述如下:将填充大孔径规则多孔介质的实验段放置于恒温加热台上并启动电源开关,采用电子天平多次称取颗粒状石蜡并将其逐次放置于实验段内,直至熔化的石蜡没过大孔径规则多孔介质,计量粒状石蜡的总装入量为 410 g. 随后,将该实验段取下待其自然冷却至室温,同时将只填充石蜡的实验段放置于恒温加热台上,按照上述方法装入等量的粒状石蜡,待石蜡完全熔化后停止加热并自然冷却至室温.

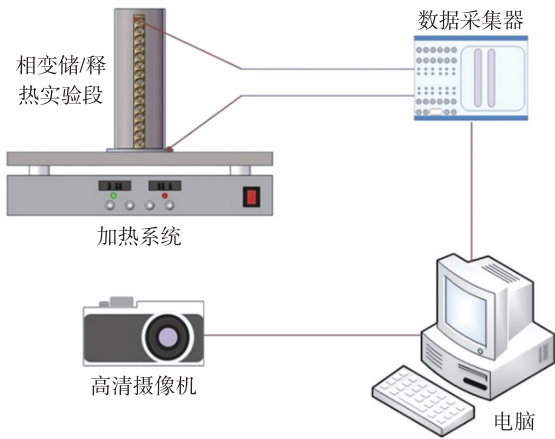


图 3 实验系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system

表 2 石蜡及相关材料热物性参数
Table 2 Physical parameters of paraffin and related materials

材料名称	参数	数值
石蜡	固态密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	785.02
	比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 20 ℃)	2 850
	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.12
	热膨胀系数/(K^{-1} , 65 ℃)	3.085×10^{-4}
	动力粘度/($\text{N}\cdot\text{S}\cdot\text{m}^{-2}$, 65 ℃)	3.65×10^{-3}
黄铜	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	8.8×10^3
	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	118

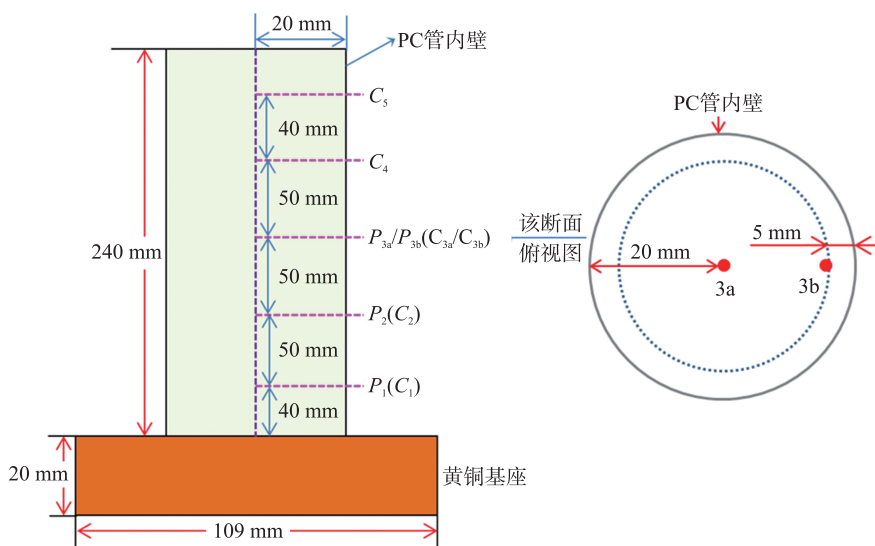


图4 热电偶布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of thermocouple arrangement

上述两种规格的实验段内石蜡完全凝固后(见图2),将其放置于恒温加热台上,随后依次启动高清摄像机、温度采集系统和恒温加热台以开展石蜡熔化的可视化实验.此外,实验过程中需要说明的是:为减小接触热阻的影响,在恒温加热实验台和两种实验段底部涂覆耐高温导热硅脂;恒温加热台升温过程为梯度加热,即初期设定温度为60℃并维持20 min,随后以1℃/min的升温速率升至65℃并维持20 min,在此基础上仍以1℃/min的升温速率升至70℃并维持至熔化实验结束;温度采集和图像信息采集的时间间隔分别为5 s和30 min.为保证实验结果的可靠及准确稳定,在相同工况及操作方法下实验重复进行了3次.

1.3 误差分析

由于选取的测量设备及其精度的不同,测量结果必然存在一定误差.为了提高实验结果的可信度及可靠性,本文采用Moffat^[13]提出的误差分析方法来验证实验所产生的测量误差对实验结果的影响情况,具体计算公式如下:

$$\phi_i = \bar{\phi} \pm \Delta\phi_i, \quad (1)$$

$$\Delta\phi_i = \pm \sqrt{(\phi_m \times \alpha)^2 + \left(\frac{KS}{\sqrt{N}}\right)^2}, \quad (2)$$

$$E_{\text{rel}} = \frac{\Delta\phi_i}{\phi_i}, \quad (3)$$

式中, ϕ_i 为直接测量变量, $\Delta\phi_i$ 为误差, $\bar{\phi}$ 为平均值, ϕ_m 为设备量程, A 为仪器精确度, K 为置信因子, N 为测量次数, S 为标准差, E_{rel} 为不确定度.依据上述方法计算得到的温度和界面高度的不确定度分别约为1.3%和1.5%.

2 结果与讨论

2.1 石蜡的相变特性

为明晰本实验所用石蜡的相变特性,利用DSC测定了石蜡的熔化特性曲线,结果如图5所示.由图可见,石蜡熔化的起始和终了温度分别为49.5℃和64.0℃,而在58.9℃出现了相变吸热峰值,且与此对应的相变潜热为186.1 kJ·kg⁻¹.

2.2 相变界面的演化进程

为了阐明大孔径规则多孔介质强化石蜡熔化的效果,以只填充石蜡的实验段作为对照,对上述两种实验

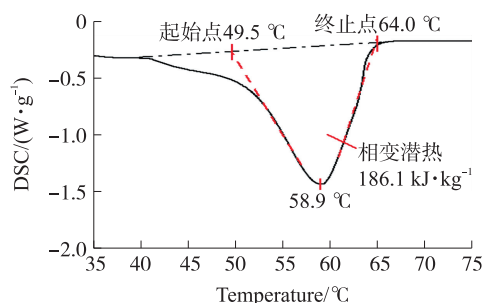


图5 石蜡的DSC相变特性曲线

Fig. 5 Phase change characteristic curve of paraffin by DSC

段的石蜡固-液界面随时间演变规律开展了可视化实验研究,结果如图 6 所示.

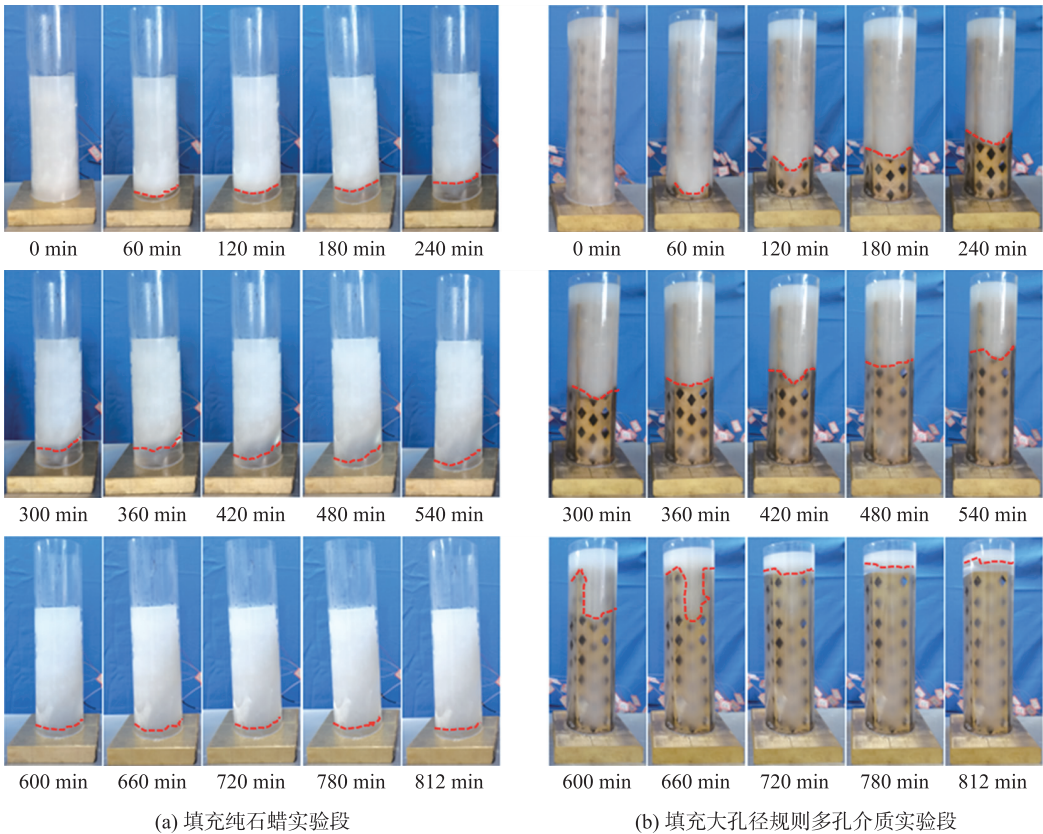


图 6 石蜡熔化界面随时间变化

Fig. 6 Variation of paraffin melting interface with time

在纯石蜡熔化过程中(见图 6(a))发现了 3 个典型的区域,即液相区、固相区和糊状区,该现象在既往文献中均有提及. 在初始时刻实验段内的石蜡为白色的全固相区,至 $t=60\text{ min}$ 时刻底部出现了明显的透明液相区,在固液两相之间则发现了半透明状的固-液两相共存区域,即糊状区. 进一步观察发现,在 $t=300\text{ min}$ 之内随时间推移液相区逐渐增加(即固-液界面向上移动),但随后自 $t=360\text{ min}$ 之后液相区“似乎”在逐渐减少(即固-液界面向下移动),该现象的主要原因可能是石蜡熔化到一定程度后自然对流传热作用增强,温度较高的液态石蜡通过 PC 圆管壁面向周围环境的热量散失增加,从而导致壁面附近的液态石蜡凝固. 需要说明的是,鉴于实验测试手段的局限性,在 $t=360\text{ min}$ 之后仅依据固-液界面的位置难以判断液相区的增减.

在填充大孔径规则多孔介质的石蜡熔化过程中(见图 6(b))则发现了两个典型的区域即液相区和固相区,并未发现明显的糊状区. 为了更为清晰的表述填充大孔径规则多孔介质对石蜡熔化过程区域分布的影响,以 $t=240\text{ min}$ 时刻为例进行说明,如图 7 所示.

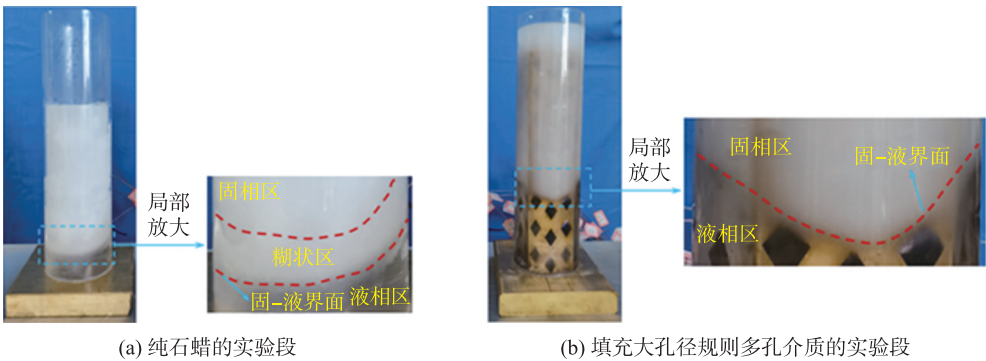


图 7 两种实验段典型时刻的固-液界面对比

Fig. 7 Comparison of the solid-liquid interface of the two different test sections

观察图 7 发现,填充大孔径规则多孔介质的实验段内石蜡熔化过程中并无明显的糊状区,其主要原因是,黄铜的导热系数远高于石蜡且大孔径能够诱发局部自然对流从而加速了固-液两相区的熔化。

再者,对于填充大孔径规则多孔介质的实验段而言,其固-液界面一方面始终较为清晰且随时间推移逐渐上移,在 540 min 之前的固-液界面基本呈下凸的抛物线型,表明石蜡的熔化速率是两侧较快而中间较慢;而在 600 min 和 660 min 这两个时刻的固-液界面显著偏离抛物线型式,其主要原因是由于大孔径规则多孔介质的高导热率致使其棱边附近的石蜡先行熔化。

此外,为了进一步探究两种不同规格实验段的石蜡在熔化过程中固-液界面演变规律,对其平均高度随时间的变化趋势进行了对比分析,如图 8 所示。

图 8 描述了两种不同规格实验段内的石蜡熔化时固-液界面高度随时间变化趋势。由图可见,同一时刻填充大孔径规则多孔介质的石蜡固-液界面高度显著高于纯石蜡固-液界面高度,且前者随时间推移呈线性上升($t=0\sim 5.5$ h)和振荡上升($t=5.5\sim 13$ h)趋势,而后者则经历了线性上升($t=0\sim 5.5$ h)和振荡下降($t=5.5\sim 13$ h)直至稳定在约 3.1 mm 位置处。除此之外,在 0~330 min

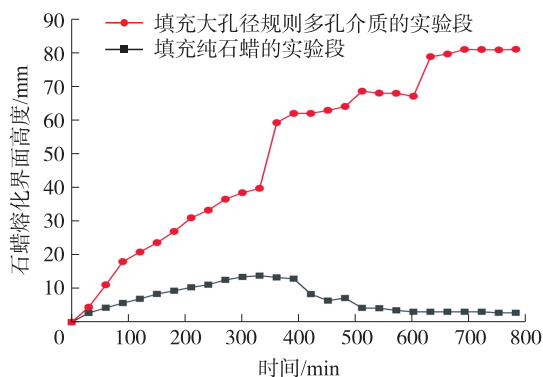


图 8 石蜡熔化界面高度随时间变化

Fig. 8 Variation of paraffin melting interface height with time

内填充大孔径规则多孔介质的石蜡熔化界面高度增长率约为只填充石蜡熔化界面高度增长率的 3 倍。上述两种实验段内固-液界面不同变化趋势的主要原因是由于大孔径规则多孔介质的作用效果不同所致,对于线性上升阶段是由黄铜多孔结构的导热系数远高于石蜡所致;此外,通过借鉴文献[14]中关于梯级多孔介质强化对流换热的影响规律,我们认为对于振荡上升的原因是大孔径规则多孔介质能够显著强化熔化后石蜡的自然对流,而仅有石蜡的实验段则由于熔化后的石蜡自然对流作用增强并通过 PC 圆管壁面散热量增从而导致振荡下降。

2.3 相变过程温度分布

图 9 描述了在加热和自然冷却整个阶段,只填充石蜡的实验段典型位置处的温度随时间变化趋势,结合图 4 可以发现,随监测点位置远离加热壁面相应的温度渐次降低。进一步观察发现,位于最底端的测点 P_1 处的温度在约 360 min 之内随时间推移逐渐升高且最高温度约 64 °C,随后直至 820 min(自然冷却前)时段内该点处的温度逐渐下降,其主要原因是该位置附近熔化后的石蜡自然对流换热加强并通过 PC 管壁面散失的热量增加所致,该现象与可视化实验过程中发现的自 360 min 后固-液界面逐渐下移且 PC 管内壁面开始出现石蜡凝固一致。

对于 P_2 测点而言,虽然在 820 min 之内温度随时间逐渐升高且其峰值高于 49.5 °C 这一石蜡起始熔化温度,但始终并未达到 58.9 °C,表明此位置处的石蜡在该时段内并未完全熔化。至于 P_{3a} 和 P_{3b} 这两个测点,其峰值温度远低于石蜡的起始熔化温度,即该处的石蜡始终处于固体状态。此外,在实验初期阶段铜基座上表面温度呈振荡上升阶段,这是由于恒温加热台的设定温度为梯度递增所致。

图 10 描述了在加热和自然冷却整个阶段,填充大孔径规则多孔介质的实验段典型位置处的温度随时间变化趋势。结合图 4 可以发现,测点 $C_1\sim C_4$ 的温度在 600 min 之前随时间推移逐渐升高,且在 600 min 后直至自然冷却前($t=820$ min)其温度基本维持恒定,表明这些测点处的石蜡在 600 min 以后全部熔化完毕。对于距离加热壁面最远的测点 C_5 而言,其峰值温度在加热阶段约为 57 °C 并未达到 58.9 °C 表明此处

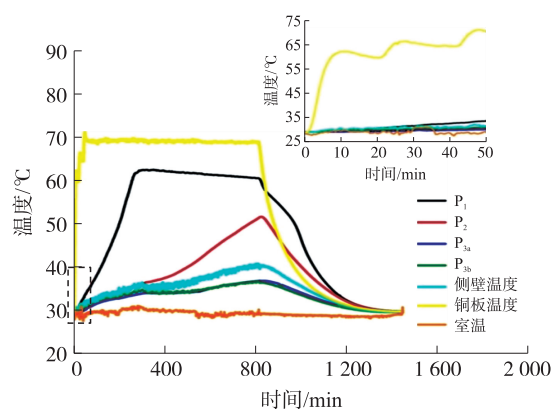


图 9 只填充石蜡的实验段典型位置温度随时间变化

Fig. 9 Typical location temperature variation with time at the test section with only paraffin

的石蜡未完全熔化.

此外,自约 500 min 后直至自然冷却开始前,距离加热壁面较远的 C_{3a} 测点处的温度反而依次高于测点 C_2 和距离加热壁面最近的测点 C_1 处的温度,该现象的主要原因是大孔径规则多孔介质内部错列排布的结构型式显著强化了 C_{3a} 位置附近熔化石蜡的自然对流.

通过对比图 9 和图 10 可以发现,对于相同的测点位置,填充大孔径规则多孔介质的实验段其温升速率较只填充石蜡的显著较快,且其能达到的温度峰值也较高. 其主要原因一方面是由于大孔径规则多孔介质的导热系数远高于石蜡,另一方面也是由于较大的孔径在石蜡部分熔化后诱发局部的自然对流从而强化换热所致.

进一步观察图 9 和图 10 发现, P_1 、 C_1 测点开始熔化的时间分别约为 200 min 和 25 min, P_2 、 C_2 测点开始熔化的时间分别约为 766 min 和 70 min, 填充大孔径规则多孔介质实验条件下两个测点石蜡开始熔化的时间分别提前了 175 min 和 696 min, 可见填充大孔径规则金属多孔介质可以大幅提升相变材料熔化过程.

3 结论

为探究大孔径规则金属多孔介质对相变材料熔化过程的影响特性和机理,本文以只填充石蜡的实验段作为对照,通过可视化实验和典型位置处瞬时温度测量相结合的方式,对所考察的两种类型实验段内石蜡熔化过程的固-液界面演变行为和温度变化趋势进行了研究,主要结论如下:

(1) 对于只填充石蜡的实验段而言,石蜡在熔化过程中呈现典型的 3 个区域,即固相区、液相区以及糊状区(固-液两相共存区),而填充大孔径规则多孔介质的实验段内石蜡在熔化过程中则并无明显的糊状区. 其主要原因可能是,黄铜的导热系数远高于石蜡且大孔径能够诱发局部自然对流从而加速了固-液两相区的熔化.

(2) 石蜡熔化过程中的同一时刻,与只填充石蜡的实验段相比,填充大孔径规则多孔介质的实验段内固-液界面向上移动的高度较高,并且对于相同位置的温度测点,填充大孔径规则多孔介质的实验段内温升速率较快,且其能达到的温度峰值也较高,这均表明该类型多孔介质能够显著强化石蜡熔化过程.

(3) 对于填充大孔径规则多孔介质的实验段而言,距离加热壁面较远的 C_{3a} 测点处的温度自约 500 min 后直至自然冷却开始前始终高于距离加热壁面最近的测点 C_1 处的温度,这很可能是大孔径规则多孔介质内部错列排布的结构型式显著强化了 C_{3a} 位置附近熔化石蜡的自然对流.

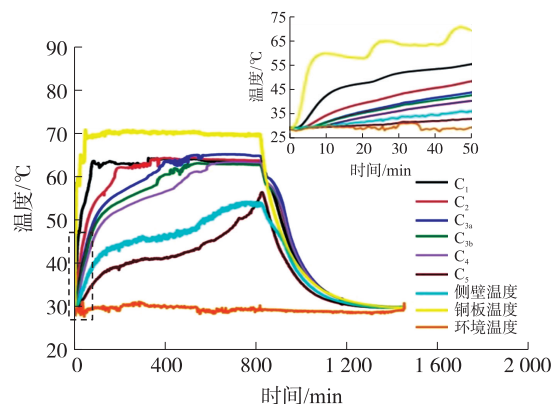


图 10 填充大孔径规则多孔介质的实验段典型位置温度随时间变化

Fig. 10 Typical location temperature variation with time at the test section with the large-aperture regular porous media

[参考文献]

- [1] 郭茶秀,黄云浩,崔丽,等. 电子元器件相变冷却的数值传热研究[J]. 电子器件,2008(5):1553-1558.
- [2] 陶汉中,刘士琦. 热管式组合工质蓄热系统换热特性的数值模拟[J]. 可再生能源,2018,36(12):1890-1896.
- [3] 吴学红,姜文涛,翟亚妨,等. 内翅式套管相变蓄热器性能研究[J]. 可再生能源,2016,34(9):1369-1374.
- [4] LIU J J, XU C, JU X, et al. Numerical investigation on the heat transfer enhancement of a latent heat thermal energy storage system with bundled tube structures[J]. Applied thermal engineering, 2017, 112(5): 820-831.
- [5] FENG S S, SHI M, LI Y F, et al. Pore-scale and volume-averaged numerical simulations of melting phase change heat transfer in finned metal foam[J]. International journal of heat and mass transfer, 2015, 90: 838-847.
- [6] FERNANDES D, PITIÉ F, CÁCERES G, et al. Thermal energy storage: "How previous findings determine current research priorities" [J]. Energy, 2012, 39: 246-257.

(下转第 34 页)

-
- [8] 刘哲,张万远,黄晓霜,等. 海底管道检测与三维点云重建算法[J]. 海洋测绘,2019,39(3):36-40.
- [9] JIA D F,ZHANG W P,WANG Y H,et al. A new approach for cylindrical steel structure deformation monitoring by dense point clouds[J]. Remote sensing,2021,13(12):2263-2279.
- [10] 吴永兴. 利用超体素的车载激光点云锚杆目标的提取[J]. 测绘地理信息,2021,46(4):77-81.
- [11] 李鹏鹏. 基于车载 LiDAR 数据的道路场景典型锚杆地物分类和动态分析[D]. 焦作:河南理工大学,2020. DOI:10.27116/d.cnki.gjzgc.2020.000161.
- [12] SINGH S K,RAVAL S,BANERJEE B. Roof bolt identification in underground coal mines from 3D point cloud data using local point descriptors and artificial neural network[J]. International journal of remote sensing,2020,42(1):367-377.

[责任编辑:顾晓天]

(上接第 26 页)

- [7] LI Z,WU Z G. Numerical study on the thermal behavior of phase change materials(PCMs) embedded in porous metal matrix[J]. Solar Energy,2014,99:172-184.
- [8] 杲东彦,陈振乾,陈凌海. 开孔泡沫铝内石蜡融化相变过程的可视化实验研究[J]. 化工学报,2014,65(S1):95-100.
- [9] ZHAO C Y,LU W,TIAN Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials(PCMs)[J]. Solar energy,2010,84(8):1402-1412.
- [10] MARTINELLI M,BENTIVOGLIO F,CARON-SOUPART A,et al. Experimental study of a phase change thermal energy storage with copper foam[J]. Applied thermal engineering,2016,101:247-261.
- [11] 盛强,邢玉明,王泽. 泡沫金属复合相变材料的制备与性能分析[J]. 化工学报,2013,64(10):3565-3570.
- [12] 吴志根,陶文铨. 金属矩阵材料在相变蓄热中的强化换热分析[J]. 工程热物理学报,2013,34(2):307-309.
- [13] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental thermal and fluid science,1988,1(1):3-17.
- [14] 郑章靖,徐阳,何雅玲. 梯级多孔介质强化管壳式相变储热器性能研究[J]. 工程热物理学报,2019,40(3):605-611.

[责任编辑:顾晓天]