

气波引射装置真空度实验研究

魏蓓¹, 于洋², 刘凤霞², 胡大鹏²

(1. 中石化石油勘探开发研究院 地面工程研究所, 北京 100083; 2. 大连理工大学 化工机械与安全系, 辽宁 大连 116000)

摘要: 为了研究转速及高、中压喷嘴间偏转距离对气波引射装置性能的影响, 分析两个参数与低压端口真空度间的变化规律。设定高压进气压力为 1.5 MPa, 低压、中压和高压端口宽度分别为 63, 37 和 44 mm, 高压与低压端口间固壁段宽度为 14 mm。实验研究了当转速分别为 2 500, 3 000, 3 500 以及 4 000 r/min, 偏转距离分别为 10, 18 和 26 mm 时, 中压出口压力与低压端口真空度之间的关系。结果表明: 在恒定转速条件下, 低压端口处真空度与中压出口压力呈负相关关系; 当中压出口压力恒定时, 随着设备转速的增加, 真空度先增大后减小。在中压压力一定的情况下, 当转速较低时真空度随偏转距离增大而减小, 当转速较高时真空度随着偏转距离的增大呈现先减小后增大的趋势, 偏转距离对真空度具有显著影响, 且存在最优值, 最优值与设备转速相关。此外, 真空度与设备引射率近似呈正比例关系, 即引射率和增压比呈负相关关系。

关键词: 气波引射; 真空度; 转速; 偏转距离; 引射率

中图分类号: TQ051.3 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.07.018

[引用本文格式] 魏蓓, 于洋, 刘凤霞, 等. 气波引射装置真空度实验研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(7): 110-115. WEI Bei, YU Yang, LIU Feng-xia, et al. Experimental study on vacuum degree of air wave ejector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7): 110-115.

Experimental Study on Vacuum Degree of Air Wave Ejector

WEI Bei¹, YU Yang², LIU Feng-xia², HU Da-peng²

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Facilities Division, Beijing, China, Post Code: 100083; 2. Dalian University of Technology, Department of Chemical Machinery & Safety Engineering Dalian, China, Post Code: 116000)

Abstract: In order to study the influence of rotating speed and deflection distance between high and medium pressure nozzles on the performance of gas wave ejector, the variation law of them on the vacuum degree of low pressure port is analyzed. The pressure at the high pressure port is 1.5 MPa, and the width of low, medium and high pressure ports is 63, 37 and 44 mm respectively, the width of the fixed wall section between the high and low pressure ports is 14mm. The relationship between the pressure at the middle pressure outlet and the vacuum degree at the low pressure port is studied when the rotating speed is 2 500, 3 000, 3 500 and 4 000 r/min, and the deflection distance is 10, 18 and 26 mm, respectively. The results show that the vacuum at the low-pressure port increases with the decrease of the pressure in medium port under the condition of constant speed. When the pressure in medium is constant, the vacuum increases first and then decreases with the increase of the equipment speed. When the rotation speed is low, the vacuum degree decreases with the increase of deflection distance. When the rotation speed is high, the vacuum degree decreases first and then increases with the increase of deflection distance, the deflection distance has a significant influence on the vacuum degree. And there is an optimal value, which is related

收稿日期: 2020-06-03; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0704602); 国家自然科学基金(22008022)

Fund-supported Project: The National Key Research and Development Program of China(2018YFA0704602); National Natural Science Foundation of China(22008022)

作者简介: 魏蓓(1987-), 女, 河北石家庄人, 中石化石油勘探开发研究院博士后。

to the rotating speed of the equipment. In addition, the ejection rate of the equipment is approximately positively proportional to the vacuum degree, that is, ejection rate and pressurization ratio are negatively correlated.

Key words: gas wave ejection, degree of vacuum, rotational speed, deflection distance, ejection rate

引言

21世纪以来,天然气工业在我国发展迅速,天然气以其高效环保的优势,逐渐成为我国能源消费的重要组成部分。由于地质储层的差异,天然气井的压力也大不相同,这导致了在天然气开采和运输的过程中出现两个问题:高压气井的压力能大量浪费;低压气井不能被有效的开发^[1-3]。

为解决上述问题,目前常用的技术方法有间接式和直接式能量交换。前者主要通过机械轴实现能量传递,效率虽高,但带液运行能力差,投资费用高^[4-5],典型设备有透平膨胀机。后者按实施方式可分为喷射压缩技术和气波压力交换技术,喷射压缩技术的典型装备是静态引射器,其具有成本低、可靠性好等诸多优点,但效率较低^[6-8]。气波压力交换技术是利用运动的压力波来实现不同能量的两股流体之间的能量交换,这一技术广泛应用于燃气轮机、增压器、内燃波转子等方面。利用这一技术研制出的气波引射器具有结构简单、成本低、瞬态响应性能好以及等熵效率高等优点^[9-11]。

若想成功将低压气体引入气波引射器,需令低压入口处的压力低于低压气源的压力。通过研究发现,在气波引射器的低压端口处存在一个真空区域,该区域真空度表明了气波引射器低压端口与低压气源间的压差,从而侧面反映了低压进气流量,所以真空度的值可以在一定程度上表现出给定工况下装置性能的优劣。因此,研究气波引射装置低压端口处真空度具有重要的意义。

本文通过搭建实验平台,重点研究了中压出口压力、转速以及喷嘴偏转距离对低压端口处真空度的影响规律,实验结果将为验证设备性能好坏以及选取合适操作参数提供可靠的依据。

1 气波引射装置

1.1 气波引射器结构

气波引射器的结构简图如图1所示。在运行过

程中,各喷嘴固定,由电动机带动波转子转动。波转子为设备核心部件,由若干振荡管围成,能量交换过程在波转子内发生。

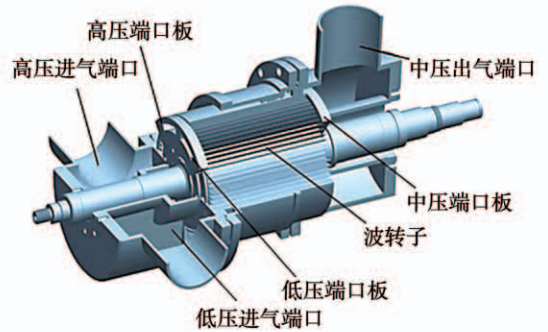


图1 气波引射器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of gas wave ejector

1.2 工作原理

气波引射器的原理如图2所示。高压气进入振荡管后,由于压差产生了向右端传播的激波 S1,压缩管内原有气体,当 S1 到达通道右端时,通道与中压出口接通,发生开口反射,产生膨胀波 E1,中压气体在激波 S1 和膨胀波 E1 的共同作用下开始排出通道。

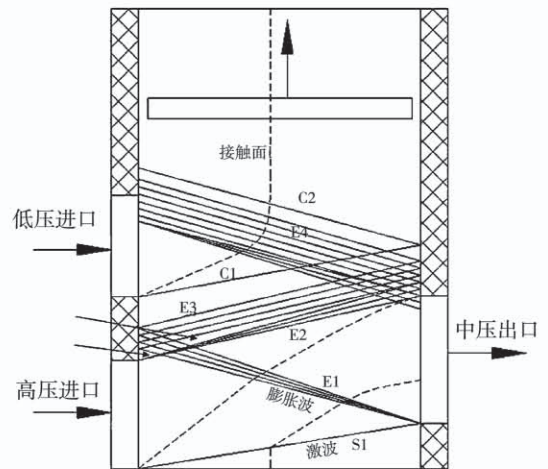


图2 气波引射器的原理波图

Fig.2 Principle wave diagram of gas wave ejector

随通道移动,高压端口闭合,产生向右传播的膨

胀波 E2, 膨胀波 E1 运行至左侧发生固壁反射, 形成膨胀波 E3, 在 E2 和 E3 的共同作用下, 管内压力降至循环周期内最低。

当振荡管与低压入口接通时, 由于管内压力低于低压气源, 会产生一道向右传播的压缩波 C1, 同时由于压差, 低压气被吸入管内。

当 E2 和 E3 运行至通道右端时, 中压出口关闭。由于 E2 和 E3 到达右端的时间不一定相同, 故膨胀波通常会发生开口反射与固壁反射, 可通过控制中压出口尺寸来控制 E3 端口反射波的类型与强度。

E2 和 E3 在通道右端发生开口反射会形成压缩波, 且 C1 发生固壁反射也会形成压缩波, 反射压缩波 C2 向左传播, 使振荡管内气压回升, 为下一周期的引射过程做准备, 当 C2 到达通道左端时, 低压进气结束, 低压端口关闭。

2 气波引射实验

2.1 实验装置

气波引射实验装置如图 3 所示, 主要由轴向波转子及左右机体组成, 设备采用三相异步电动机驱动, 由皮带进行传动。

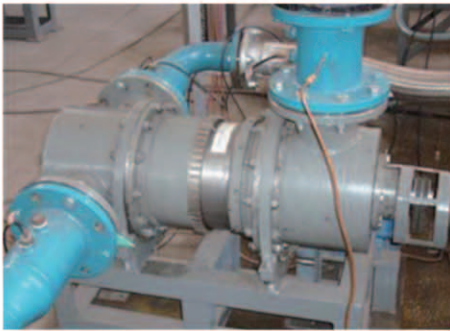


图 3 气波引射实验装置图

Fig. 3 Experimental device diagram of gas wave ejection

本次实验选用轴向波转子。为便于实验, 需使设备结构参数易于调节, 可通过使用可拆卸的端口板来调节各端口的尺寸。

2.2 实验流程

本次实验流程如图 4 所示。介质空气, 经压缩机压缩后, 作为高压气源储存于储气罐, 并设置一个缓冲罐以降低实验时高压气体的压力波动, 高压气

体流量通过流量计进行测定, 并由截止阀 V-1 来调节。气波引射器低压入口直接与大气相连, 并通过截止阀 V-2 控制开闭。中压出口流量通过皮托管测量, 并由调节阀 V-3 控制, 在各端口都设置好压力和温度测量点以确定各端口参数。

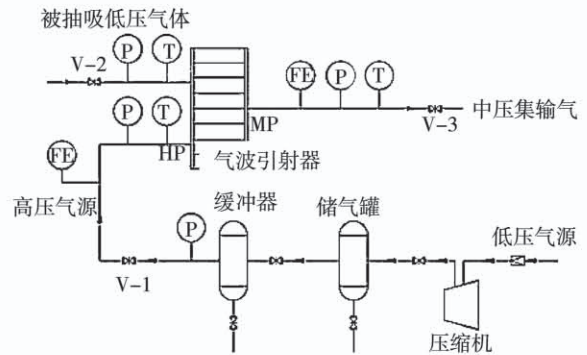


图 4 实验流程图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental process

2.3 实验方案

关闭低压入口处阀门, 在低压端口处安装一个真空表, 测量实验中低压端口处的真空度。高压端口处气压设为 $p_h = 1.5 \text{ MPa}$, 低压、中压和高压端口宽度分别为 63, 37 和 44 mm, 高压与低压端口间固壁段宽度为 14 mm。

3 实验结果及分析

3.1 不同转速下中压出口压力对真空度的影响

其它结构和操作参数不变, 转速分别设为 2 500, 3 000, 3 500 和 4 000 r/min, 考察真空度随中压出口压力的变化规律, 实验结果如图 5 所示。

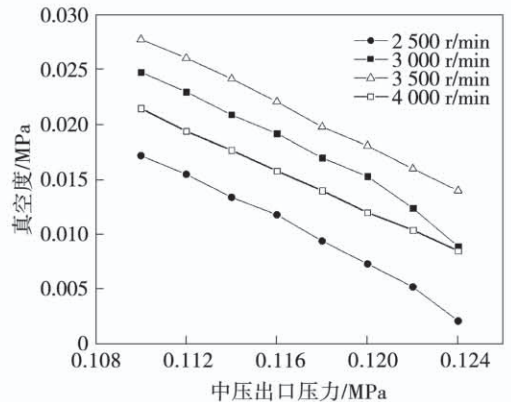


图 5 转速对真空度的影响

Fig. 5 Effect of rotational speed on vacuum degree

由图 5 可知,当转速恒定时,中压出口压力与低压端口处真空度呈负相关关系,中压出口压力越大,低压端口处真空度越小,随着设备转速的增加,真空度先增大后减小。造成此现象的原因是中压出口压力增大会导致其与通道间压差减小,继而削弱膨胀波 E1 的强度,从而使膨胀波 E3 强度减弱。此外,膨胀波 E2 的强度也随着中压出口压力的增大而减弱,因此在中压出口压力越大的情况下,膨胀波 E2 和 E3 对低压端口处真空度的共同作用越弱,从而导致低压端口处真空度越小。

另一个对设备性能影响显著的参数是转速,其对设备的影响主要体现在振荡管内的波系匹配上。由气波引射器的工作原理可知,欲使设备性能最优化,应尽可能令内部波系与原理波图(图 2)相匹配。因此当给定设备尺寸与操作参数时,设备存在最优转速。当设备的转速偏离该最佳转速值时,会降低内部波系的匹配度,导致设备性能降低。

图 6 为高压进气流量随转速的变化规律。由图 6 可知,随着转速的变化,高压进气流量先减小后增大。原因是总进气流量与单管的进气量以及接通的管道数有关,随着转速增大,单管与喷嘴接触的时间变短,单管内进气量变小,故总进气量减小;但当转速增加到一定值时,与喷嘴接通的管道数突增,其对总进气量的影响大于对单管内进气量的影响,故总进气量增加。

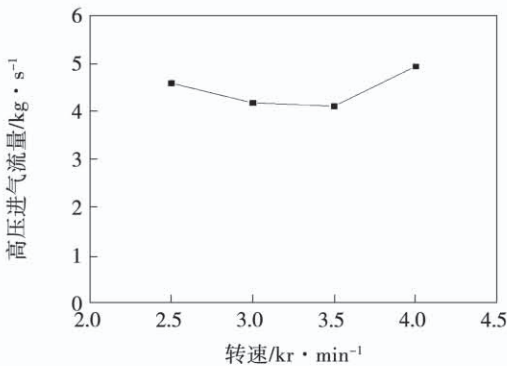


图 6 转速对高压进气流量的影响

Fig. 6 Effect of rotational speed on high pressure inlet flow

3.2 不同偏转距离下中压出口压力对真空度的影响

将高压入口和中压出口之间的偏转距离分别设为 10, 18 和 26 mm, 其它结构和操作参数恒定, 考察真空度随中压出口压力的变化规律, 实验结果如图 7 所示。

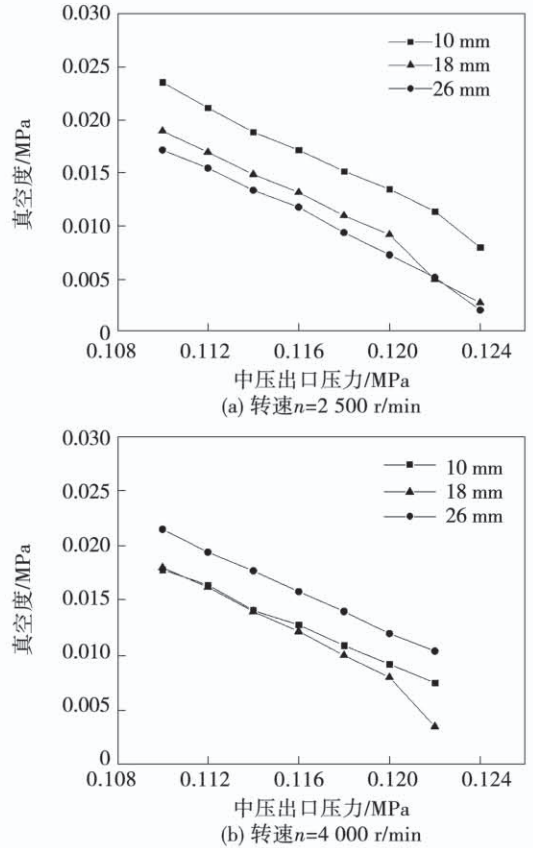


图 7 偏转距离对真空度的影响

Fig. 7 Effect of deflection distance on vacuum degree

由图 7 可知,随着转速的改变,真空度随偏转距离的变化情况呈现较大差异。固定中压出口压力,当转速为 2 500 r/min 时,偏转距离越大,真空度越小。当转速增至 4 000 r/min 时,随着偏转距离的增大,真空度呈先减小后增大的趋势。

原因是当操作参数不变时,激波 S1 的传播速度也不变。故当转速较小时,要使管内波系按原理波图所示运动,则此时中压出口与高压入口间的偏转距离不宜过大,以便激波 S1 运行至右端时能发生开口反射,使低压入口区压力尽可能降低。若偏转距

离过大,则会导致中压端口不能及时开启,激波 S1 在通道右端会发生固壁反射使管内波系紊乱,低压入口处真空度降低,造成设备性能恶化,如图 7(a) 所示。当转速较大时,存在一个偏转距离值,使激波 S1 运行至通道右端时中压出口恰好接通。当实际偏转距离低于该值时,中压出口会在激波 S1 到达前接通,导致膨胀波 E1 强度减弱,从而使低压端口处真空度下降,如图 7(b) 所示。

综上可知,偏转距离对真空度有显著影响,且其变化规律在不同转速下有明显差异,只有当转速与偏转距离相匹配时,设备才能稳定高效地运转。

3.3 真空度与设备引射率的关系

引射率是气波引射器性能的主要评价指标之一,它代表低压流体与高压流体的质量流量之比。为研究设备引射率与低压端口处真空度之间关系,实验中保持其它参数不变,转速值取 3 500 r/min,分别测量关闭低压入口时的真空度和打开低压入口时的流量值并计算引射率,结果如图 8 所示。

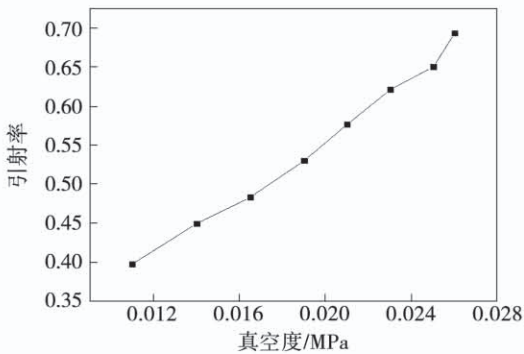


图 8 设备引射率与真空度的关系图

Fig. 8 Diagram of relation between ejection rate and vacuum degree of equipment

由图 8 可知,真空度与引射率呈正相关关系,随着真空度的增大,设备引射率也同步提高。这是因为真空度越高时,低压入口与低压气源间压差越大,故低压进气速度增大,引射率也同步提高。

4 结论

通过实验研究不同转速以及偏转距离下中压压力对低压端口处真空度的影响,得出结论:

(1) 当转速不变时,中压出口压力越大,低压端口处真空度越小。当中压出口压力不变时,随着设备转速的增加,真空度先增大后减小。当给定设备尺寸与操作参数时,必然存在一个最佳转速使设备性能达到最优。

(2) 在中压压力一定的情况下,当转速较低时,偏转距离越大,真空度越小。当转速较高时,随着偏转距离的增大,真空度呈现先减小后增大的趋势,偏转距离对真空度影响显著,只有当其与转速相匹配时,设备才能稳定高效运转。

(3) 真空度与设备引射率呈正相关关系,随着真空度的增大,设备引射率也同步提高。综上可知,增压比和引射率呈负相关关系。因此,在实际使用中,需综合考虑对引射率和增压比的需求来选择合适的操作参数。

参考文献:

- [1] 张新林,赵媛,许昕,等.中国天然气资源流动优势度时空演变特征[J].地理研究,2016,35(8):1457-1469.
ZHANG Xin-lin, ZHAO Yuan, XU Xin, et al. Characteristics of spatiotemporal evolution of dominance of natural gas resource flow in China[J]. Geographical Research, 2016, 35(8): 1457-1469.
- [2] 郑志,王树立,王婷,等.天然气输配过程流体压力能回收技术现状与展望[J].天然气与石油,2009,27(1):11-15,67.
ZHENG Zhi, WANG Shu-li, WANG Ting, et al. Current situation and prospect of fluid pressure recovery technology in natural gas transmission and distribution[J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(1): 11-15, 67.
- [3] 陈会年,张东,谢麟元,等.世界非常规天然气的储量及开采现状[J].断块油气田,2010,17(4):439-442.
CHEN Hui-nian, ZHANG Dong, XIE Lin-yuan, et al. Unconventional natural gas reserves and exploitation in the world[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2010, 17(4): 439-442.
- [4] 唐建荣,张鹏,吴洪波,等.天然气增压开采工艺技术在气田开发后期的应用[J].钻采工艺,2009,32(2):95-96.
TANG Jian-rong, ZHANG Peng, WU Hong-bo, et al. Application of pressurized natural gas exploitation technology in the later stage of gas field development[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(2): 95-96.
- [5] 靳朝霞,高铭志.天然气压缩机的选型和应用[J].石油和化工

设备,2012,15(5):23-25.

JIN Zhao-xia, GAO Ming-zhi. Selection and application of natural gas compressor[J]. Petro & Chemical Equipment, 2012, 15(5): 23-25.

- [6] 史明亘, 杨 斌. 运行参数对气体引射器性能的影响研究[J]. 化学工程与装备, 2016, (10): 121-124.

SHI Ming-gen, YANG Bin. Study on the influence of operating parameters on the performance of gas ejector. [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016, (10): 121-124.

- [7] 王 磊, 于相东, 王 晶. 引射器在回收天然气回流压力能工程中的应用[J]. 当代化工, 2013, 42(8): 1088-1090.

WANG Lei, YU Xiang-dong, WANG Jing. Application of ejector in recovery of natural gas back-flow pressure energy engineering[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(8): 1088-1090.

- [8] BULUSU K V, GOULD D M, GARRIS Jr C A. Evaluation of efficiency in compressible flow Ejectors [C]. Proceedings of IMECE2008, Massachusetts, USA, 2008.

- [9] ZHANG H F, GARRIS Jr C A. A comparative study of flow induction by pressure exchange[C]. AIAA Paper, 2004.

- [10] AKBARI P, NALIM M R. Review of recent developments in wave rotor combustion technology[J]. Journal of propulsion and power, 2009, 25(4): 833-844.

- [11] 雷 艳, 周大森, 张红光. 基于 CFD 的车用气波增压器三维仿真[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(7): 990-994.

LEI Yan, ZHOU Da-sen, ZHANG Hong-guang. 3D simulation of vehicle gas wave supercharger based on CFD[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7): 990-994.

(刘 颖 编辑)

(上接第 103 页)

- [4] XIAO L, ZHAO M, HU H. Study on Graphene Oxide Modified Inorganic Phase Change Materials and Their Packaging Behavior[J]. Wuhan University of Technology, 2018, 33(4): 788-792.

- [5] 张玉兵, 王 慷, 彭浩然, 等. 金属材料非平衡相变的热/动力学协同[J]. 中国材料进展, 2019, 38(3): 251-263.

ZHANG Yu-bing, WANG Kang, PENG Hao-ran, et al. Thermal/Kinetic synergy of non-equilibrium phase transformation of metal materials [J]. Progress in Chinese Materials, 2019, 38(3): 251-263.

- [6] WEI H, XIE X, LI X, LIN X. Preparation and characterization of capric-myristic-stearic acid eutectic mixture/modified expanded vermiculite composite as a form-stable phase change material[J]. Applied Energy, 2016, 178: 616-623.

- [7] 杨 磊, 姚 远, 张冬冬, 等. 有机相变储能材料的研究进展[J]. 新能源进展, 2019, 7(5): 464-472.

YANG Lei, YAO Yuan, ZHANG Dong-dong, et al. Research progress of organic phase change energy storage materials[J]. Advances in New Energy, 2019, 7(5): 464-472.

- [8] LI Y, YAN H, WANG Q, et al. Structure and Thermal Properties of Decanoic Acid/expanded Graphite Composite Phase Change Materials[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 128(3): 1-14.

- [9] ZANG J L, LIU Y Y, CAO Z X, et al. Thermal Conductivity Enhancement of Mwnts on the Pani/tetradecanol Form-stable PCM [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007, 91(2): 113-446.

- [10] WU S Y, TONG X, NIE C D, et al. The effects of various carbon nanofillers on the thermal properties of paraffin for energy storage applications[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124(1): 181-188.

- [11] ZHAO C. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55: 13-14.

- [12] YANG J, YANG L, XU C, et al. Experimental study on enhancement of thermal energy storage with phase-change material[J]. Applied Energy, 2016, 169: 164-176.

- [13] ÜRGE-VORSATZ D, CABEZA L F, SERRANO S, et al. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41.

- [14] 徐伟强, 袁修干, 邢玉明, 等. 空穴分布对固液相变蓄热过程的影响[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 240-245.

XU Wei-qiang, YUAN Xiu-gan, XING Yu-ming, et al. Effect of hole distribution on solid-liquid phase change heat storage process [J]. Journal of Solar Energy, 2011, 32(2): 240-245.

(金圣迪 编辑)