丙二醇改性水溶液的发汗冷却实验研究 *

冉方圆，伍　楠，贺　菲，王建华

（中国科学技术大学 工程科学学院 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室，安徽 合肥 230027）

摘　要：针对液态水相变发汗冷却实验中的振荡、表面温度分布不均及结冰现象，对液体冷却剂进行调研，选取丙二醇添加剂对液态水改性，在主流温度573K，雷诺数1.2×10^4的亚声速高温风洞中，实验研究了不同丙二醇改性水溶液浓度和注入率下多孔平板的相变发汗冷却特性。结果表明：随丙二醇浓度增大，多孔平板对改性水溶液的渗透率增大，多孔平板表面温度的振荡幅度减小，同时振荡周期内温度波峰降低。因此，使用丙二醇改性水溶液作为冷却剂，发汗冷却结构表面温度分布更加均匀，热疲劳损伤减小，承温极限升高，进而烧蚀风险降低。另外，注入率越大平板表面冷却效果越好，表面温度的振荡幅度越小，因此增大注入率也是改善多孔板表面温度波动的有效方式。

关键词：发汗冷却；液态水改性；丙二醇；相变；振荡现象

中图分类号：V317.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4055（2021）03-0587-06

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 190650

Experimental Investigation of Transpiration Cooling Using Modified Propylene Glycol Aqueous Solution

RAN Fang-yuan，WU Nan，HE Fei，WANG Jian-hua

（CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials，School of Engineering Science，University of Science and Technology of China，Hefei 230027，China）

Abstract：In this work，liquid water was modified by adding propylene glycol（PG）to solve the oscillation，uneven surface temperature distribution and freezing phenomena observed in experiments of transpiration cooling with liquid water. In a subsonic high temperature wind tunnel with mainstream temperature of 573K and Reynolds number of 1.2×10^4，the transpiration cooling performance with phase change on a porous plate was studied experimentally under the influence of different concentration and injection rate of aqueous solution modified by PG. The results indicate that with the increase of PG concentration，the permeability of the porous plate with the modified water solution traversing increases，the oscillation amplitude of the surface temperature of the porous plate reduces，and the temperature peak during the oscillation period decreases at the same time. Therefore，using water solution modified by PG as coolant，the surface temperature distribution of transpiration cooling structure is more uniform，and the thermal fatigue damage is reduced. It can also increase the temperature tolerance and reduce the ablation risk. In addition，the larger the injection rate，the better the cooling effect of the plate surface and the smaller the oscillation amplitude of the surface temperature. Hence，increasing the injection rate is also an effective way to weaken the surface temperature fluctuation of the porous plate.

*　**收稿日期**：2019-09-22；**修订日期**：2020-01-09。

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金（51806206）；中央高校基本科研业务费专项资金。

作者简介：冉方圆，硕士生，研究领域为主动冷却技术。E-mail：ranranfy@mail.ustc.edu.cn

通讯作者：贺　菲，博士，副研究员，研究领域为多孔介质内两相流动和传热。E-mail：hefeihe@ustc.edu.cn

引用格式：冉方圆，伍　楠，贺　菲，等. 丙二醇改性水溶液的发汗冷却实验研究[J]. 推进技术，2021，42(3)：587-592.（RAN Fang-yuan，WU Nan，HE Fei，et al. Experimental Investigation of Transpiration Cooling Using Modified Propylene Glycol Aqueous Solution[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2021，42(3)：587-592.）

Key words: Transpiration cooling; Modified liquid water; Propylene glycol; Phase change; Oscillation phenomenon

1 引 言

一直以来,高效的强化冷却技术都是航空航天领域发展关注的焦点[1-2]。发汗冷却以极其出色的冷却效果(冷却能力高达6×10^7~1.4×10^9W/m^2)[3-4],得到了飞行器热防护设计者的高度重视。目前,基于发汗冷却机制的热防护结构已广泛应用于超声速飞行器的控制腔、鼻锥的防护罩以及航天器再入阶段的前缘等部位[5]。

发汗冷却根据使用的冷却剂类别分为气体发汗冷却和液体相变发汗冷却。气体发汗冷却的冷却效率主要取决于气体的比热容[6],冷却效果有限。与气体相比,液体相变发汗冷却时,相变潜热可以作为附加的冷却机制,具有更大的冷却潜力。对发汗冷却液体冷却剂的研究有很多,Bellettre等[7]研究了乙醇液体发汗冷却对多孔板壁热防护的影响;Zhao等[8]和廖致远等[9]研究了超声速主流条件下液态水的相变发汗冷却规律;Rahli等[10]和刘伟强等[11]分别采用正戊烷和液氧进行了发汗冷却研究。其中,液态水有较大的比热(0.1MPa,c_p=4.18kJ/(kg·K))和相变潜热(0.1MPa,r=2256kJ/kg),表现出了极为优异的冷却性能。Foreest等[12]采用鼻锥模型,比较了以水和氮气为冷却剂的发汗冷却效果,结果表明,在相同质量流量0.2g/s下,采用液态水为冷却剂时,模型驻点冷却前后温差高达1500K,而氮气对驻点几乎无冷却效果,且进一步加大氮气流量至1g/s,驻点温度也仅降低500K左右,证明了水冷的高效性。值得注意的是,液态水相变发汗冷却也存在一些问题:Foreest等在实验中意外观察到了液态水结冰现象;Reimer等[13]在电弧风洞实验中也观察到了冰须在碳/碳多孔平板表面上的形成;Shen等[14]在中国航天空气动力技术研究院(CAAA)的电弧加热风洞开展了以液态水为冷却剂的发汗冷却实验研究,进一步展示了低焓环境下的结冰现象,并指出该结冰现象会影响冷却剂的输运,导致发汗冷却机制失效。此外,Huang等[15]和马杰等[16]在亚声速高温风洞中进行液态水相变发汗冷却的机理性实验研究时发现,液态水的相变过程极不稳定和在较低冷却剂注入率下多孔平板上下游表面温度分布的不均匀现象。总的来说,发汗冷却过程中液态水的巨大冷却潜力不可忽视,但其暴露的一系列问题也亟待解决。因此,很有必要对液态水改性以降低其冰点或者改善多孔板表面的温度振荡及分布不均现象。

针对上述问题,本文对不同液体冷却剂进行了调研,选取丙二醇(Propylene glycol,PG)作为添加剂对液态水改性,制备了四种不同体积浓度的(0.0,0.3,0.1,1.0)丙二醇改性水溶液,采用高温烧结不锈钢多孔平板实验件,在亚声速高温风洞环境下(主流温度573K,雷诺数1.2×10^4)开展相变发汗冷却实验研究。实验过程中测量多孔平板对丙二醇改性水溶液的渗透率,分析多孔平板的表面温度分布规律,旨为相变发汗冷却技术的工程应用提供参考。

2 丙二醇改性水溶液

2.1 添加剂的选择

液体冷却剂大体上可以分为水基和非水基两类,一般情况下,为进一步提高非水基液体的流动换热,如增大对流换热系数、导热系数、比热和潜热等,通常将这些介质作为添加剂与水混合,形成的混合溶液结合了水的高效换热特性和介质本身的优点,从而得到了很好的应用。

常用的液体冷却介质包括:(1)乙二醇、丙二醇、酒精、甘油,用于汽车发动机冷却及一些工业冷却。(2)甲酸钾、乙酸钾、氯化钙和氯化钠之类的盐溶液,主要应用于食品工业中作冷却剂。(3)含氟化合物如全氟化碳、氢氟醚等,广泛应用于电子冷却中。(4)液态金属冷却剂,主要应用于核反应堆冷却和计算机芯片散热。(5)纳米流体,添加纳米颗粒如金属氧化物、金属、碳纳米管或金刚石在冷却剂中分散以提高热导率。

值得注意的是,液体冷却剂中乙二醇(Ethylene glycol,EG)、丙二醇广泛应用于汽车防冻液,具有低冰点高沸点,与水互溶的特性。表1列出了水、乙二醇和丙二醇的主要物理性质参数,包括密度ρ,冰点t_i,沸点t_b,导热系数λ,比热c_p,动力粘度μ和相变潜热r,可见:乙二醇和丙二醇维持液态的温度范围均比水大,其中丙二醇的冰点可达-68℃,且丙二醇相较于乙二醇具有无毒无腐蚀性的优点,因此选取丙二醇作为添加剂对液态水改性;但丙二醇的比热和潜热都低于水,因此丙二醇改性水溶液是以牺牲水的冷却性能为代价的。

Table 1　Physical properties of liquid coolant

Coolant	ρ/(kg/m^3)	t_i, t_b/℃	λ/(W/(m·K))	c_p/(kJ/(kg·℃))	μ/(mPa·s)	r/(kJ/kg)
Water	1000	0/100	0.580	4.186	1.009	2256
EG	1115	−11.5/197.3	0.289	2.349	20.930	824
PG	1036	−68.0/188.2	0.186	2.490	60.500	803

2.2　丙二醇水溶液的制备和渗透性能检测

选用 1,2-丙二醇(分析纯)和去离子水为基础液体,将两者以特定比例均匀混合,得到四种不同体积浓度(C=0.0, 0.3, 0.7, 1.0)的丙二醇改性水溶液,它们的沸点 t_b 和动力粘度 μ 如表 2 所示,改性水溶液的沸点和动力粘度均随丙二醇体积浓度的升高而增大。

Table 2　Characteristics of PG modified water

C	0.0	0.3	0.7	1.0
t_b/℃	100.0	102.2	110.0	187.3
μ/(mPa·s)	0.895	2.570	11.080	50.600

借助达西公式来测试实验所用多孔平板对改性水溶液的渗流特性。实验采用烧结不锈钢多孔平板(56mm×32mm×8mm),孔隙率为 0.35。已知多孔平板的厚度 L,表面积 A 以及液体的体积流量 Q,需要测量的参数为液体流经多孔板的驱动压差 Δp。图 1 展示了丙二醇改性水溶液在给定体积流量下对应的稳态压差值,通过达西公式拟合可以得到多孔平板对改性水溶液的渗透率值。由测量结果可见:添加丙二醇改性后,随丙二醇浓度升高多孔平板对改性水溶液的渗透率增大。这种现象是合理的,丁亮等[17]通过标定水和乙醇在饱和试验件表面的湿润接触角随时间的变化,得出当液体流经多孔结构时,流体分子的粘性越高,需要克服由管壁效应引起的粘性力可能越小,而环境温度下无水丙二醇的粘度高达水的 60 倍,因此,所测得渗透特性也远大于水。

3　实验装置

3.1　实验件结构

如图 2 所示,实验件的组成包括不锈钢多孔平板和 310S 不锈钢实体金属框架,两者采用螺栓紧密结合和高温硅胶密封垫进行密封。实验中,高温主流从平板热端表面掠过,液体冷却剂通过注射泵以一定的流量注入冷却腔内,在多孔平板内发生相变,产生的蒸汽从平板热端表面渗出形成气膜保护多孔

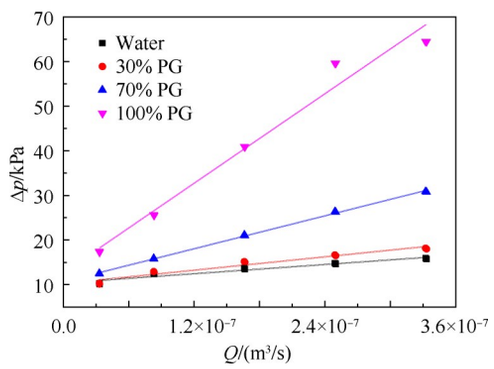

Fig. 1　Permeability of porous plate to PG modified aqueous solution

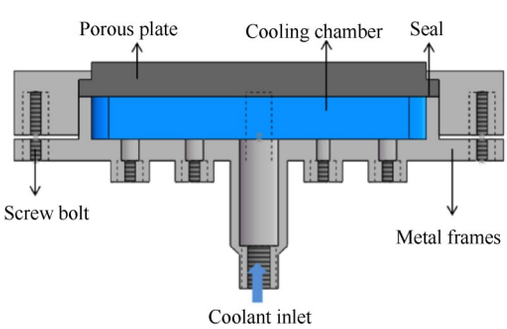

Fig. 2　Schematic diagram of the specimen

平板。

3.2　实验系统

实验所采用的亚声速高温风洞系统如图 3 所示,主要由供气系统、加热段和实验段三部分组成。压缩空气经过多级过滤,按给定流量进入电阻丝加热段。加热段温度由日产数字式温控仪设定。加热后的高温气流经由整流段形成均匀稳定的高温主流,横掠过实验件表面,实验段的高温主流温度由 K 型热电偶测量。采用远红外热像系统(ImageIR® 8300hp, InfraTec)捕捉热端表面的温度变化,一帧图像时间间隔为 1s。冷却剂由两台并联的 LSP01-1BH 型高压注射泵供应,两者交替运行,实现高精度、连续稳定的注射。

3.3　实验数据处理

实验用到的发汗冷却参数冷却剂注入率 F 和高温风洞主流雷诺数 Re_∞,分别定义如下:

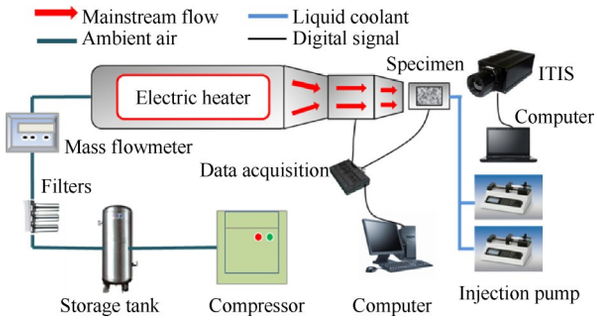

Fig. 3 Sketch of experimental system

$$F = \frac{\rho_c \dot{V}_c}{\dot{m}_\infty} \times 100\% \tag{1}$$

式中 $\dot{m}_\infty$ 为高温主流质量流量；ρ_c，$\dot{V}_c$ 分别为冷却剂的密度和体积流量。

$$Re_\infty = \frac{u_\infty D}{v} \tag{2}$$

式中 u_∞ 为主流速度，D 为风洞实验段出口水力直径，v 为高温主流的运动粘度。

实验中高温主流流量控制精度为满量程(FS)的±1%，记为±1%FS，主流速度控制精度为±2%FS，远红外热像系统测温控制精度为±1%FS，注射泵注入流量控制精度为±0.5%FS。由不确定度计算得到 F，Re 的最大相对误差分别为 1.60%，1.46%。

4 实验现象及结果分析

本文在亚声速高温风洞中进行了丙二醇改性水溶液相变发汗冷却实验，主流温度为 573K，雷诺数为 1.2×10^4，丙二醇改性水溶液浓度 C 分别为 0.0，0.3，0.7 和 1.0，冷却剂注入率 F 分别为 0.23%，0.31% 和 0.47%。实验过程中采用远红外摄像系统捕捉多孔平板表面温度变化，每一帧图像拍摄时间间隔为 1s，监测表面温度参数直至相对稳定，记录实验数据。

4.1 丙二醇浓度对相变发汗冷却的影响

在注入率保持不变(F=0.31%)的实验工况下，开展了四组不同浓度丙二醇改性水溶液的相变发汗冷却实验。图 4 给出了趋于稳定时的多孔平板表面最高温度(虚线)和平均温度(实线)变化曲线。由图可见：以液态水为冷却剂时，平板表面温度波动最先达到稳定状态，此时其它三组实验中多孔平板表面温度波动仍有轻微的下降趋势，大约 700s 后，四组实验多孔平板表面温度变化趋势均达到相对稳定。除无水丙二醇溶液(C=1)外，其它三组丙二醇改性水溶液发汗冷却实验过程中，多孔平板表面最高和平均温度均出现了振荡现象。这是因为在实验条件下，除无水丙二醇外，另外三种浓度的丙二醇改性水溶液均能达到各自的沸点发生相变，根据 Dong 等[18]对多孔平板液态水相变发汗冷却的研究，沸腾产生的蒸汽瞬间膨胀造成堵塞效应，因此随着蒸汽的缓慢释放和再积聚，多孔平板表面温度出现振荡现象。进一步分析表面平均温度变化曲线，液态水(C=0)的振荡周期和振幅最大，约为 200s 和 73K，随丙二醇浓度增大为 0.3 和 0.7，表面温度的振荡周期和振幅分别减小为 90s，25s 和 28K，11K。这是因为随丙二醇浓度增大，分别为 0.0，0.3，0.7 和 1.0 时，对应溶液的沸点分别为 100.0，102.2，110.0 和 187.3℃，沸点不同，相变产生的蒸汽量也不同。沸点越高蒸汽量越少，由蒸汽释放和积聚导致的振荡幅度和周期减小，表面温度分布越均匀。需要格外注意的是，多孔平板表面温度波动振幅越大，冷热交替引起的热应力越大，更容易导致多孔材料的疲劳失效。

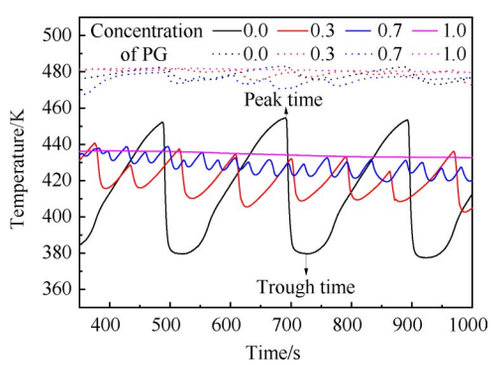

Fig. 4 Transient curve of surface temperature of porous plate at F=0.31%

在相同注入率 F=0.31% 下，根据多孔平板表面的温度振荡曲线，选取一个振荡周期内，四种浓度丙二醇水溶液对应的多孔平板表面平均温度波峰时刻和波谷时刻的热像图见图 5。由图可见：多孔平板表面沿着主流方向温度总是呈下降趋势。这是因为平板前端靠近主流出口，温度值始终最高。平均表面温度最低即波谷时刻，液态水对多孔板的表面冷却效果最好，随丙二醇浓度增大，多孔板表面的冷却效果逐渐降低。观察波峰时刻的表面热像(图 6)发现了一个有趣的现象，以液态水为冷却剂时，波峰时刻多孔平板的表面平均温度反而最高，随丙二醇浓度升高，波峰时刻温度逐渐降低。这种现象是合理的，随丙二醇改性水溶液浓度降低，溶液的沸点越低，相变产生的蒸汽越多，多孔平板内蒸汽区的厚度增大，导致多孔平板表面温度升高。可见，尽管液态水在波谷时刻对多孔平板的冷却效果最

好，但它的振荡幅度最大，波峰时刻表面温度最高，因此以液态水为冷却剂时对热防护材料的承温极限要求反而最高。

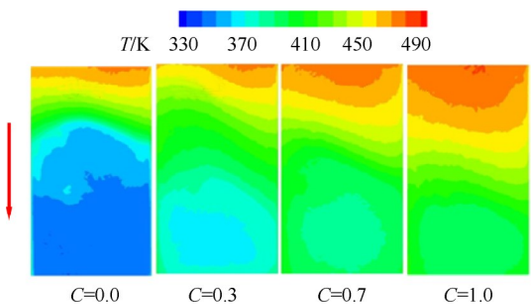

Fig. 5　Temperature distribution at trough time in an oscillation period at *F*=0.31%

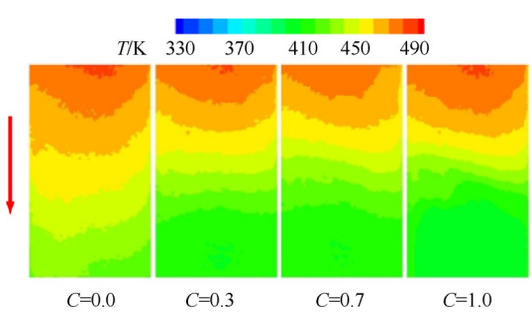

Fig. 6　Temperature distribution at peak time in an oscillation period at *F*=0.31%

4.2　注入率对发汗冷却实验的影响

在注入率 *F* 为 0.23%，0.31% 和 0.47% 的实验工况下，进行四种不同浓度丙二醇水溶液的相变发汗冷却规律研究，利用红外摄像仪记录多孔平板表面温度开始振荡时每一帧的温度变化。图 7 分别为四种浓度丙二醇水溶液在不同注入率下多孔平板表面平均温度的变化曲线。由于不同实验工况下多孔板表面温度开始振荡的时间各不相同，为便于比较注入率改变对振荡趋势的影响，统一设定温度振荡开始的时刻 0s。由图可见：一方面，注入率对冷却效果影响显著，随注入率增大，多孔板表面温度逐渐降低。另一方面，注入率的变化影响了平板表面平均温度的波动：以无水丙二醇为冷却剂时，多孔平板表面温度波动基本不受注入率影响；而以丙二醇浓度为 0.7，0.3 的改性水溶液和液态水为冷却剂时，多孔平板表面温度波动的周期和振幅均随注入率增大而减小，整体波动幅度变小。这是因为随注入率增大，冷却介质能够更快的补充蒸汽区域从而减弱蒸汽量变化引起的波动，使波动趋势变小，相变更稳定。由此可见，当多孔平板表面温度波动较小时，注入率的变化基本不会影响表面温度的波动；当平板表面温度呈一定规律波动时，可通过增大注入率的方式来降低波动幅度，改善多孔平板表面温度分布的均匀性。

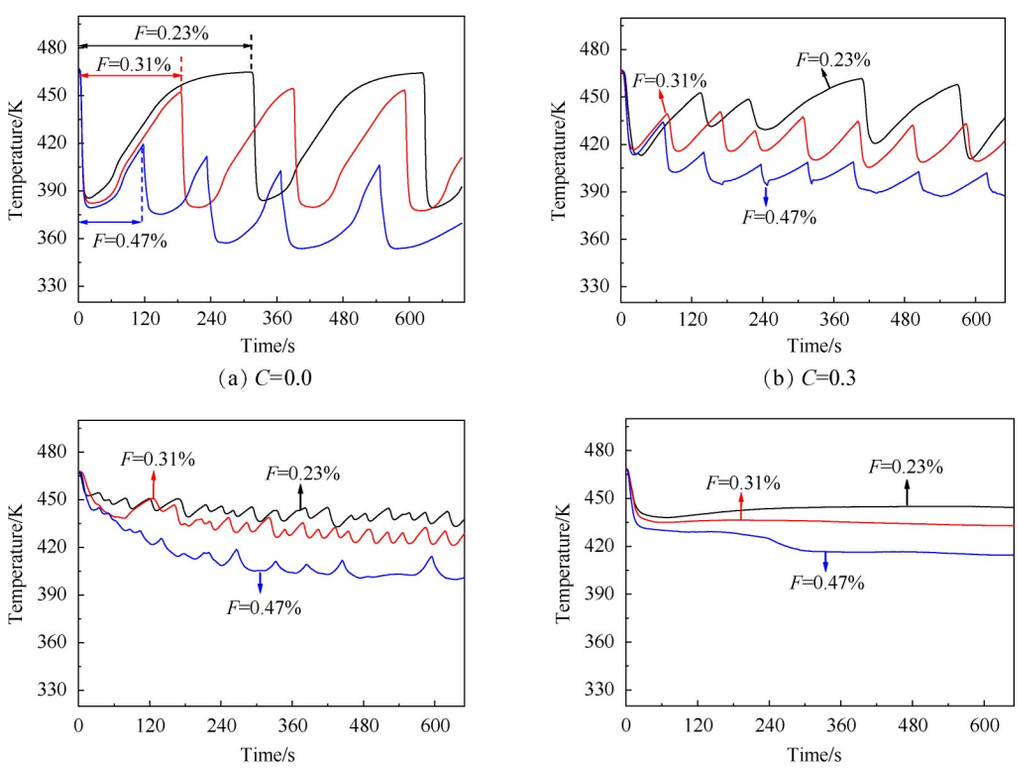

Fig. 7　Change of average surface temperature of porous plate with injection rate

5 结 论

本文通过实验,研究了不同丙二醇改性水溶液浓度和注入率影响下多孔平板的相变发汗冷却规律,主要结论如下:

(1)通过添加丙二醇对水改性,提高了水的渗透率,并且随着丙二醇浓度升高,丙二醇改性水溶液的渗透率值呈上升趋势。

(2)丙二醇改性水溶液能提高多孔平板表面温度分布的均匀性,改善表面温度的振荡现象。丙二醇浓度越高,多孔平板表面温度振荡的周期和幅度越小,一个周期内所达到的温度峰值越低。

(3)注入率对丙二醇改性水溶液的冷却特性影响较大,注入率越大,多孔平板表面冷却效果越好,表面平均温度波动幅度越小。

致 谢:感谢国家自然科学基金青年科学基金和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献

[1] Bouchez M. Multi-Level Coupled Simulations of Cooled Structures in the ATLLAS European Program[C]. *Bremen*: 16*th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes & Hypersonic Systems & Technologies Conference*, 2009.

[2] Zhu Y H, Peng W, Xu R N, et al. Review on Active Thermal Protection and Its Heat Transfer for Air Breathing Hypersonic Vehicles[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(10): 1929-1953.

[3] 赵广播, 肖雪峰, 易 珺, 等. 发汗冷却中多孔壁面添质通道流动的实验和数值研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6). (ZHAO Guang-bo, XIAO Xue-feng, YI Jun, et al. Experimental and Numerical Study on Channel Flow of Porous Wall in Transpiration Cooling[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6).)

[4] Yanovski L S. Physical Basis of Transpiration Cooling for Engines of Flying Apparatus[M]. *Moscow*: *MAIN Press*, 1996.

[5] 贺 菲. 发散冷却基础问题的理论和实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.

[6] Liu Yuan-Qing, Jiang Pei-Xue, Jin Shao-Shan, et al. Transpiration Cooling of a Nose Cone by Various Foreign Gases[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(23).

[7] Bellettre J, Bataille F, Lallemad A. Studies of the Transpiration Cooling Through a Sintered Stainless Steel Plate [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2005, 18(1): 33-44.

[8] Zhao L, Wang J, Ma J, et al. An Experimental Investigation on Transpiration Cooling under Supersonic Condition Using a Nose Cone Model[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 84: 207-213.

[9] 廖致远, 祝银海, 黄 干, 等. 超声速主流平板相变发汗冷却实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(5): 1058-1064. (LIAO Zhi-yuan, ZHU Yin-hai, HUANG Gan, et al. Experimental Investigation of Transpiration Cooling on a Porous Plate with Phase Change in Supersonic Flow Tunnel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(5): 1058-1064.)

[10] Rahli O, Topin F, Tadrist L, et al. Analysis of Heat Transfer with Liquid-Vapor Phase Change in a Forced-Flow Fluid Moving Through Porous Media[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1996, 39(18): 3959-3975.

[11] 刘伟强, 陈启智, 吴宝元. 液体火箭发动机层板式预燃室液氧发汗冷却热控制[J]. 推进技术, 1998, 19(5): 10-14. (LIU Wei-qiang, CHEN Qi-zhi, WU Bao-yuan. Thermal Control for Platelet Transpiration Cooled Preburner of Liquid Rocket Engine Using Liquid Oxygen[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(5): 10-14.)

[12] Foreest A V, Sippel M, Guelhan A, et al. Transpiration Cooling Using Liquid Water[C]. *Miami*: 39*th AIAA Thermophysics Conference*, 2009.

[13] Reimer T, Kuhn M, Gülhan A, et al. Transpiration Cooling Tests of Porous CMC in Hypersonic Flow[C]. *San Francisco*: 17*th AIAA International Space Planes & Hypersonic Systems & Technologies Conference*, 2011.

[14] Shen L, Wang J, Dong W, et al. An Experimental Investigation on Transpiration Cooling with Phase Change under Supersonic Condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 549-556.

[15] Huang G, Zhu Y, Liao Z, et al. Experimental Investigation of Transpiration Cooling with Phase Change for Sintered Porous Plates[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 1201-1213.

[16] 马 杰, 林 佳, 王建华. 液态水相变发散冷却的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 556-562.

[17] 丁 亮, 马 杰, 王建华. 烧结多孔介质渗透特性的实验研究[J]. 力学季刊, 2012, 33(3): 375-381.

[18] Dong W, Wang J, Chen S, et al. Modelling and Investigation on Heat Transfer Deterioration During Transpiration Cooling with Liquid Coolant Phase-Change[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128: 381-392.

(编辑:朱立影)