

燃烧室内壁面发汗冷却数值模拟研究

刘 学¹, 杨海威¹, 周伟星²

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 燃烧室内的高热流会使得燃烧室内壁面因烧蚀而破坏, 发汗冷却作为一种先进的冷却技术可用作燃烧室内壁面的热防护过程中。通过平板发汗冷却模型研究了发动机燃烧室内壁面在不同热流密度下温度分布, 结果显示随着热流密度的增大, 壁面温度线性上升。通过研究多孔介质几何结构对发汗冷却效果的影响, 发现在保持其他变量不变的条件下, 孔隙率与孔径的增大均会导致固体壁面温度的上升, 不利于固体壁面的保护。模拟结果表明, 冷却工质流量的增大使得热端壁面温度快速下降, 即使增加微小的流量也会起到明显的降温效果, 热壁面温度与冷却剂流量符合幂函数关系, 相关度较高。

关键词: 多孔介质; 发汗冷却; 数值模拟; 孔隙率; 比表面积

中图分类号: V430 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)04-0030-07

Numerical simulation research on transpiration cooling on the inner wall of combustion chamber

LIU Xue¹, YANG Haiwei¹, ZHOU Weixing²

(1. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The high heat flux in the combustion chamber will damage the walls in the combustion chamber due to ablation. As an advanced cooling technology, transpiration cooling can be used in the process of thermal protection of the walls in the combustion chamber. In this paper, the plate transpiration cooling model was used to study the temperature distribution of the wall in the engine combustion chamber at different heat flux conditions. The results show that the wall temperature increases linearly with the increase of heat flux. By studying the influence of the geometric structure of porous media on the transpiration cooling effect, it was found that the increase of porosity and pore size will lead to the rise of solid wall temperature when other variables remain unchanged, which is not favorable to the protection of solid wall. The simulation results show that the increase of the coolant flow rate makes the temperature of the hot end wall drop rapidly, and even a small increase of the flow rate will have an obvious cooling effect. The temperature of the hot wall and the coolant flow are in a power function relationship, and the

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2021-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(51676056)

作者简介: 刘学(1995—), 男, 硕士, 研究领域为航空发动机主动热防护。

correlation is high.

Keywords: porous media; transpiration cooling; numerical simulation; porosity; specific surface area

0 引言

航空航天领域大推力、高马赫数飞行器需要承受复杂的力热载荷,因此高效的热防护系统设计是关键技术之一^[14]。极高热流密度的能量转换传递中,若未采取高效的热防护措施用作高温壁面的冷却,将会使得材料因高温而损伤偏离安全范围,导致飞行任务的失败,造成难以估量的后果。

热防护措施通常分为主动热防护和被动热防护两种形式。主动热防护包括对流冷却^[5]、冲击冷却^[6]、膜冷却^[7]和发汗冷却^[8-12]。本文研究的发汗冷却是冷却工质流经多孔材料内部时由于自身温度较低,与固体骨架形成温度差,所以通过对流可以带走部分热量,也可以阻隔外部高温燃气对固体壁面的快速加热,阻止烧蚀情况的发生。

在实验方面,Weinbaum 利用不同的金属材料作为多孔介质的固体骨架,分析对发汗冷却效果的影响^[13]。2004 年 Greuel 证明冷却效率随着冷却剂流量的增加而线性增加,并表明,通用模型预测边界层的冷却效果的影响时误差较大^[14]。2007 年 Otsu 证明,发汗冷却在冷却过程中,少量的冷却工质也会在很大程度上消耗热量^[15]。2018 年 Xiao 对鼻锥的发汗冷却进行了实验研究,分析了冷却剂边界层对激波的影响^[16]。

在数值方面,Lezuo 建立多孔介质换热模型,该模型可以用来评估多孔壁面温度随着时间的变化过程^[17]。2008 年 Juki 利用两相流模型分析了多孔介质内部传热传质过程进行了研究,分析发现流体流速的增大会加大流-固之间的温度差,相变发生时,液态工质巨大的潜热会吸收更多的热流,使得此种现象更加明显^[18]。Su 利用直接模拟对多孔头锥内部的流动换热进行了研究,分析了在头锥内部的流动换热特性,大量的冷却工质流向了承受热载荷较小的头锥尾部,造成冷却工质的浪费^[19]。

目前大多数发汗冷却数值模拟研究基于热平衡模型,忽略了冷却剂与固体骨架之间的换热,偏

离真实物理情况。本文利用非平衡换热模型,就不同多孔平板结构、冷却工质入口条件等因素带来的冷却效果进行了分析,并获得相关的规律。

1 数值方法

1.1 物理模型

本文的研究对象包括冷却剂储藏区和发汗平板两个部分,几何模型如图 1 所示,物理模型如图 2 所示。

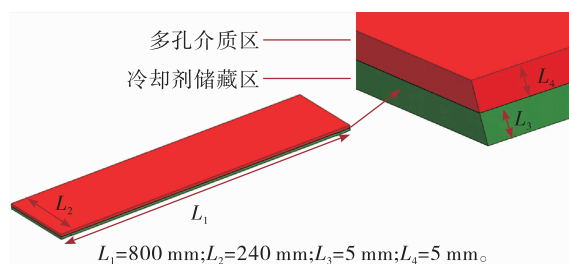


图 1 计算域几何模型

Fig. 1 Computational domain geometry model

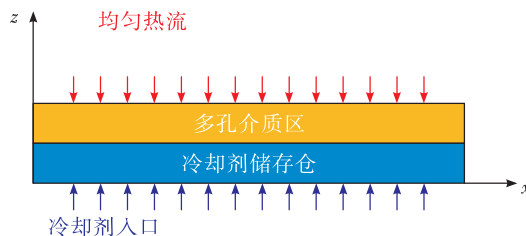


图 2 计算域物理模型

Fig. 2 Computational domain physical model

其中,发汗面板的尺寸为 800 mm × 240 mm × 5 mm。热端表面设置为第二类边界条件,施以均匀热流密度 q 。冷却剂在储藏区,以垂直的方式注入。

多孔介质区底面与冷却剂储藏区顶面相互交接,为了解决交界面处流体-流体的质量交换与流体与固体的热量交换,采用拼接网格的方式进行处理。

1.2 控制方程

多孔介质区,需要同时考虑黏性阻力损失和惯

性阻力损失的 Darcy-Forchheimer 渗流模型和多孔介质局部非热平衡模型对多孔介质内的流动进行模拟^[20]。

连续方程和动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \boldsymbol{\tau}) - \frac{\varepsilon^2}{K} \mu_f \mathbf{v} - \frac{\varepsilon^3 F}{\sqrt{K}} \rho_f |\mathbf{v}| \mathbf{v} \quad (2)$$

其中

$$K = d_p^2 \varepsilon^3 / [150 (1 - \varepsilon)^2] \quad (3)$$

$$F = \frac{1.75}{\sqrt{150} \varepsilon^{1.5}} \quad (4)$$

式中: ε 为孔隙率; ρ_f 为流体密度; \mathbf{v} 为速度矢量; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切应力矢量; K 为渗流率; F 为惯性系数; d_p 为颗粒粒径。

热平衡模型认为固体骨架温度与冷却剂温度一致而忽略掉了两者之间的换热。非热平衡模型考虑了流体和固体骨架之间的换热,需要计算流体和固体的两个能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f E_f) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{v} E_f) = \\ -\nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\varepsilon \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) + \\ \nabla \cdot (\varepsilon k_f \nabla T_f) + h_{fs} A_{fs} (T_s - T_f) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[(1 - \varepsilon) \rho_s E_s] = \nabla \cdot [(1 - \varepsilon) k_s \nabla T_s] + \\ h_{fs} A_{fs} (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_f 为流体导热系数; k_s 为固体导热系数; T_f 为流体温度, T_s 为固体温度; E_f 为单位流体所具有的能量; E_s 为单位固体所具有的能量; h_{fs} 为流-固之间的换热系数; A_{fs} 为固体骨架比表面积。

1.3 模型验证

为验证计算模型的准确性,以文献[21]的实验数据为基础进行比较。实验中保持主流马赫数 $Ma = 0.5$, 密度 $\rho_{HC} = 0.65 \text{ kg/m}^3$, 总温 $T_{HC} = 525 \text{ K}$, 静压 $P_{HC} = 95.6 \text{ kPa}$, 其他如表 1 和表 2 所示。

对比实验结果与数值仿真结果,如表 3 所示,两者相近,因此可以使用本计算模型进行大尺寸发汗面板的数值仿真分析。

表 1 多孔介质实验数据列表

Tab. 1 Experimental data list of porous media

参数	数值
ε	0.116
$\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.14
$C_{p,s} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	622
$k_s / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	1.4
K_D / m^2	1.196×10^{-13}
K_F / m	8.8×10^{-9}
$h / (\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	1×10^6

表 2 冷却剂参数(空气)

Tab. 2 Coolant parameters (air)

参数	数值
$C_{p,f} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	1 010
$K_f / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	0.04
$\mu / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	1.7×10^{-5}

表 3 实验与仿真数据对比

Tab. 3 Comparison of experimental and simulation data

物理量	数值	数值	数值
几何位置 y/m	-0.014	-0.009	-0.004
实验温度 T_1/K	404	422	439
仿真温度 T_2/K	408	420	430

2 计算结果分析

2.1 高温壁面温度分析

图 3 为固体热端壁面的温度分布状况,质量流量设置为 3.752 g/s ,冷却剂入口温度 293 K ,向平板壁面垂直施加的热流密度分别为 0.8 MW/m^2 , 2.0 MW/m^2 。由于固体壁面四周存在对流换热,对流换热带走部分热量使得边缘区域壁面温度降低,且明显低于平板中心温度。壁板四周的顶点因受到几何因素的影响会出现奇点造成局部温度偏低。对比两张云图可发现,热流密度的加大使得平板温度呈现整体上升的趋势,且两者之间温度分布状况一致。

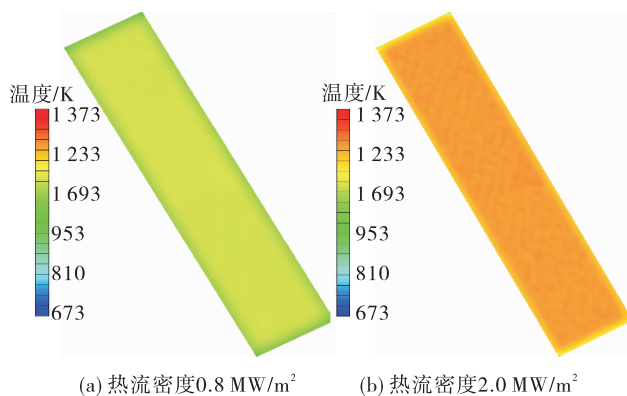


图3 壁面温度分布

Fig. 3 Wall temperature distribution

图4给出了不同热流密度下出口壁面处流体温度和固体壁面温度变化,在保持冷却剂流量与入口温度不变的前提下,随着热流密度的加大,壁面平均温度呈现出线性变化趋势,冷却剂出口温度也随之上升。在热流密度为 0.8 MW/m^2 时,热端壁面温度与冷却剂出口温度最为接近。热负荷的逐渐加大,两者之间的温度差值形成增长的趋势,这是由于冷却剂的冷却能力有限,热端热流密度的加大导致冷却效果变差。当热流密度为 2.0 MW/m^2 后,更多的热负荷被施加到热端壁面,此时冷却剂的冷却能力达到了上限,热端壁面温度与冷却剂出口温度差值几乎保持不变。

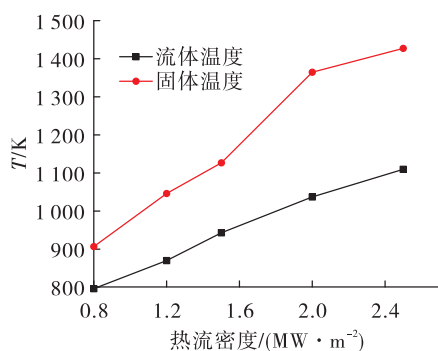


图4 出口处冷却剂温度与固体温度对比

Fig. 4 Comparison of coolant temperature and solid temperature at the outlet

2.2 冷却剂及固体骨架温度沿程分布特性分析

图5(a)为冷却剂温度的沿程分布,储藏区的冷却剂主要受到流体之间导热的影响,使得温度逐渐上升,由于冷却剂的热容在加热过程中逐渐变大,

物理热沉加大,在接近储藏区与多孔介质区交界面时,温度增长速率逐渐减缓。当冷却剂进入多孔介质区域后与固体骨架产生对流换热与热弥散效应。此时,固体骨架得到有效的热防护。在固体骨架带走的热量使得冷却剂温度增长再一次加快,呈现线性分布,在多孔平板出口处受到出口效应的影响,温度增长放缓。

图5(b)为多孔骨架温度沿程分布,在多孔平板进口区域,固体骨架受到冷却剂储藏区内冷却剂的冲击与对流换热的共同作用,使得温度上升平缓。在平板内部固体骨架受到自身导热和冷却剂的主导作用,骨架温度近似呈现线性增长。平板出口处,受到跨尺度流动的影响,固体骨架的温度上升减缓。

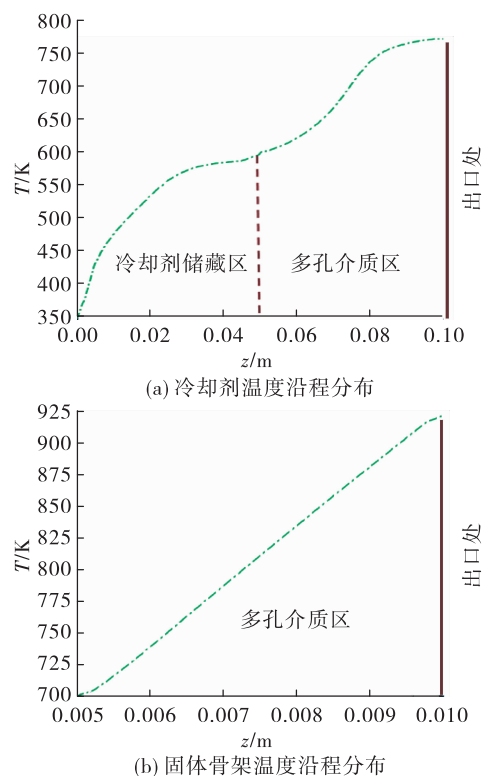


图5 沿程温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along the way

2.3 热流密度对沿程温度的影响分析

从图6可以看出,热流密度的加大,壁面的最高温度与壁面的最低温度同时呈现出线性增长,且两者之间的温度差值几乎保持不变。两者之间温差主要是受到固体材料属性的影响,固体导热系数的增大会在一定程度上缩小两者之间的温度差,使得表面温度呈现出更好的均匀性。

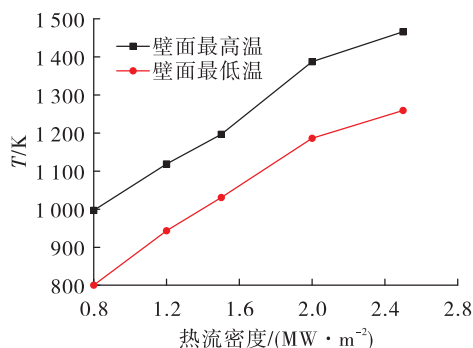


图6 出口处最高壁温与最低壁温对比

Fig. 6 Comparison of the highest and lowest wall temperature at the outlet

如图7所示,由于冷却剂不断的流入与流出使得整个系统处于动态平衡的状态,系统输入的热量不断被冷却剂带走,热阻在流动方向几乎保持不变,施加在热端壁面的热载荷使得多孔平板内部流体温度与固体骨架温度保持同步增长,温度差 $T_s - T_f$ 几乎保持不变。同时,对比图7两图可以发现,在热流密度增大的前提下,由于受到冷却剂冷却能力的限制导致温度差 $T_s - T_f$ 更大。

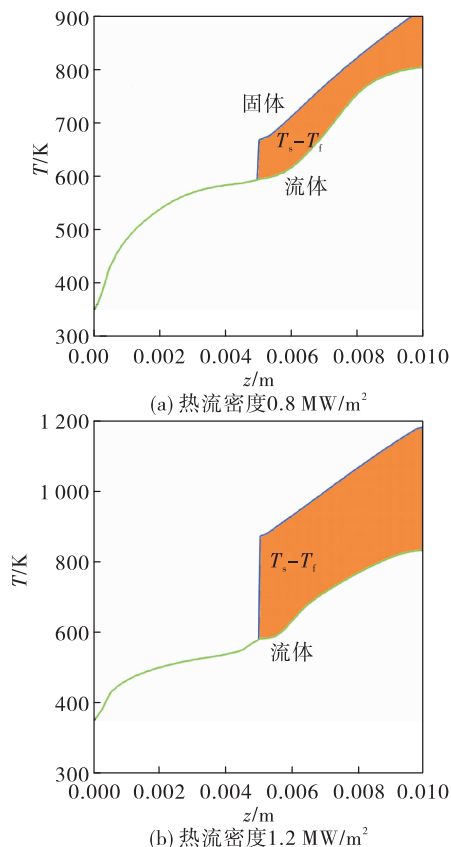


图7 流-固间温度对比

Fig. 7 Temperature comparison between fluid and solid

2.4 孔径、孔隙率及冷却剂流量对发汗冷却的影响分析

图8给出了3种孔隙率下出口壁面温度的变化趋势,当孔径保持不变时,随着孔隙率的加大,平板内部的比表面积会随之减小,对流换热减弱,使得固体骨架与冷却剂换热不充分,壁面温度升高。对比图中两种孔径下的温度变化,孔径 $5 \mu\text{m}$ 的平板出口壁面温度要明显高于孔径 $2 \mu\text{m}$ 下的平板出口壁面温度。这主要是因为孔隙率一定的前提下,孔径与比表面积呈现出反比的关系,因此孔径的增大也将导致比表面积的减小,温度的升高。

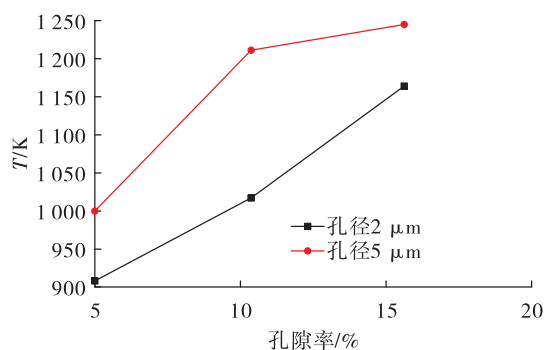


图8 出口壁面温度随孔隙率变化

Fig. 8 The outlet wall temperature changes with porosity

图9给出了不同孔隙率下流-固间温度的对比状况。对比图9(a)与图9(b)可知,孔隙率的加大使得多孔介质内部填充了更多的流体,但是由于比表面积的减小会导致换热的不充分,使得流-固之间的温度差值变大。同时可以观测到,孔隙率的变化对多孔介质入口处的温度几乎没有影响,但是固体温度却发生了变化,这是因为冷却剂在进入多孔介质区的温度主要受到冷却剂储藏区的影响,多孔结构对其温度影响甚微。然而,对于多孔介质入口处壁面温度而言,孔隙率的加大使得整体的内部结构发生了改变,一方面流-固之间换热减弱,另一方面是由于孔隙率的加大使得固体骨架间的导热减弱,无法有效进行热量的传递。两者共同作用,相互耦合使得多孔介质入口处壁面温度升高。

图10为平板出口处壁面温度随冷却剂流量变化趋势,由于冷却剂流量的增大,多孔介质内部对流换热增强,湍流度加大,使得壁面温度呈现出明显的下降。且壁面温度与冷却剂流量符合幂函数

分布的关系 $T = 1\,397.338\,21x^{-0.0469}$, 相关度达到 0.99。在冷却剂流量较小时, 增大冷却剂流量, 固体壁面温度下降较为明显。若继续增大流量, 温度下降趋势变得平缓。

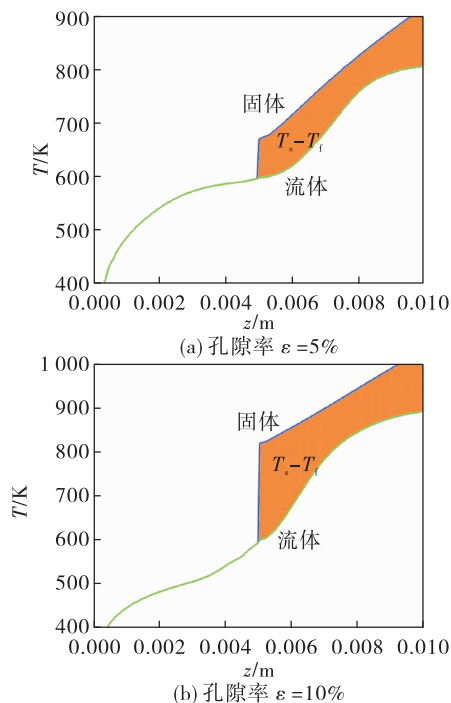


图9 不同孔隙率温度对比

Fig. 9 Comparison of different porosity temperatures

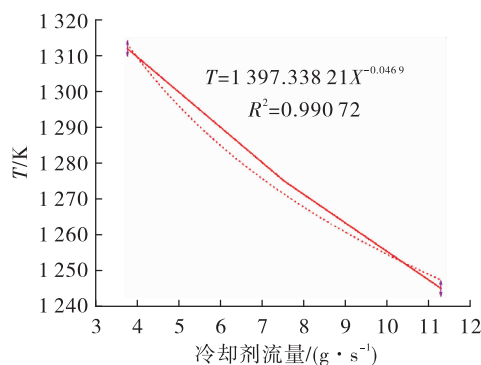


图10 出口壁面温度随冷却剂流量变化

Fig. 10 The outlet wall temperature changes with the coolant flow rate

3 结论

1) 热流密度的加大导致平板热端壁面温度整体上升, 由于几何因素, 在平板4个角点出现奇点, 温度偏低。

2) 在多孔介质区内部, 流体温度与固体骨架温

度呈现近似线性上升。在进出口处由于进出口效应的影响, 上升趋势更为平缓。

3) 孔径不变, 孔隙率加大导致比表面积的减小, 换热减弱, 温度升高。保持孔隙率不变, 孔径的增大同样也会导致比表面积的减小使得换热减弱。

4) 多孔平板出口处温度与冷却剂流量为幂函数关系, 且相关度趋近于1。

参考文献:

- [1] 蔡亚梅, 汪立萍. 美国的高超声速飞行器发展计划及关键技术分析[J]. 航天制造技术, 2010(6): 4-7.
- [2] RANGESH J, SCHUYLER H W, CRAIG J. Performance assessment of supersonic and hypersonic intake systems with nano-particle injection[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 609-621.
- [3] 张忠利, 张蒙正, 周立新. 液体火箭发动机热防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [4] 丁锐. 发散冷却在高超声速飞行器上的应用可行性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [5] HASSAN A R, SALAWU S O. Analysis of buoyancy driven flow of a reactive heat generating third grade fluid in a parallel channel having convective boundary conditions[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(8): 1-9.
- [6] KAYANSAYAN N, KUCUKA S. Impingement cooling of a semi-cylindrical concave channel by confined slotairjet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25(6): 383-396.
- [7] LIU D D, TAO Z, LUO X. Experimental investigation of heat transfer characteristics on turbine endwall with full coverage film cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 295-303.
- [8] JIANG P X, LIAO Z Y, HUANG Z, et al. Influence of shock waves on supersonic transpiration cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, (129): 965-974.
- [9] XIAO X F, ZHAO G B, ZHOU W X, et al. Large-eddy simulation of transpiration cooling in turbulent channel with porous wall[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 618-629.
- [10] DING R, WANG J H, HE F, et al. Numerical investigation on the performances of porous matrix with transpiration and film cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 422-431.
- [11] HE F, DONG W J, WANG J H, et al. Transient model and

- its application to investigate the injection mode and periodical operation of transpiration cooling with liquid coolant phase change [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181:115956.
- [12] KUMAR S, SINGH O. Performance evaluation of a transpiration-cooled gas turbine for different coolants and permissible blade temperatures considering the effect of radiation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2011, 225(8):1156-1165.
- [13] WEINBAUM S, WHEELER H L. Heat transfer in sweat-cooled porous metals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1949, (1):113-122.
- [14] GREUEL D, HERBERTZ A, HAIDN O J, et al. Transpiration cooling applied to C/C liners of cryogenic liquid rocket engines [J]. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2004.
- [15] OTSU H, FUJITA K, ITO T. Application of the transpiration cooling method for reentry vehicles [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [16] XIAO X F, ZHAO G B, ZHOU W X. Numerical investigation of transpiration cooling for porous nose cone with liquid coolant [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121:1297-1306.
- [17] LEZUO M, HAIDN O, LEZUO M, et al. Transpiration cooling using gaseous hydrogen [C]//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Seattle, WA, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1997.
- [18] YUKI K, ABEI J, HASHIZUME H, et al. Numerical investigation of thermal fluid flow characteristics with phase change against high heat flux in porous media [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130(1):012602.
- [19] SU H, HE F, WANG J H, et al. Numerical investigation on the characteristics of coolant flow, heat absorption and phase change in transpiration cooling process [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 142:68-76.
- [20] 肖雪峰. 发汗冷却传热特性及边界层流动规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [21] DAHMEN W, GOTZEN T, MÜLLER S, et al. Numerical simulation of transpiration cooling through porous material [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2014, 76(6):331-365.