

文章编号: 1000-8055(2009)01-0044-06

离心力场下多孔层的不同厚度对热驱动换热的影晌

夏 婕¹, 常海萍²

- (1. 空军第十三飞行学院司令部 航空理论教研室, 蚌埠 233000;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 以涡轮叶片新型超级冷却技术的研究为背景, 在具有冷却通道的新型冷却结构中加入多孔介质, 采用实验与数值模拟相结合的方法研究了不同多孔层厚度条件下, 新型冷却结构的热驱动换热规律, 实验和计算结果基本一致. 研究表明不同多孔层厚度条件下, 该新型冷却结构具有相同的换热规律: 随着旋转速度、热流密度和冷气进口速度的增大, 该结构的热驱动换热能力逐渐增强. 同时实验研究发现, 随着多孔层厚度的增大, 热驱动换热效果降低.

关 键 词: 多孔介质; 厚度; 热驱动

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Study effect of different thickness of porous layer on thermally driven heat transfer in a centrifugal force field

XIA Jie¹, CHANG Hai-ping²

- (1. Avigation Theory Staff Room,
The Air Force 13th Flight Academy, Bangbu 23000, China;
2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the research of turbine blade super cooling technology, porous medium was installed in a new kind of cooling configuration with cooling tunnels. Experiments and numerical simulations were carried out to investigate the thermally driven heat transfer rules in the new kind of cooling configuration with different thickness of porous layers in a centrifugal force field. The results of experiments and numerical simulations are consistent basically. The results of study show that the heat transfer rules of the new cooling configuration are identical under different thickness of porous layers. The thermally driven heat transfer of the cooling configuration filled with porous medium can be enhanced with increase of the rotate speed, heat flux and cooling air speed. At the same time, the heat transfer effect is weakened with increase of the thickness of porous layer.

Key words: porous medium; thickness; thermally driven

涡轮叶片的冷却设计在目前高性能发动机研制中占有举足轻重的地位, 新型高效的冷却技术

越来越成为现代和未来航空、航天、电力和电子行业发展的迫切需要. 针对这种情况, 常海萍和过增

收稿日期: 2007-12-22; 修订日期: 2008-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(50276027); 国防基础科研项目(J1400D001)

作者简介: 夏婕(1975-), 女, 浙江上虞人, 博士, 主要从事传热与传质, 涡轮叶片冷却方面研究. E-mail: xjxj_china@163.com

元提出了一种基于热驱动(温度变化所引起的自然对流)理论的新型冷却技术^[1]. 该技术的核心是细微冷却通道,在细微冷却通道中存在着冷却介质,从增强细微通道结构强度的角度考虑,可以在通道中加入多孔介质. 同时多孔介质内流体的流动存在着弥散效应,能使流体分子团产生径向混掺,使径向温度分布均匀平坦化,从而使换热得到显著地增强^[2-4]. 虽然换热增强的同时,流动阻力增加的也很多,但增大的流动阻力可以通过很大的浮升力来克服. 因为在各种高速旋转的部件中,例如航空发动机中的涡轮,小小几十克的涡轮叶片在高速旋转下要承受几十吨的离心力,其离心加速度可达 10^5 m/s^2 . 根据热驱动的理论,在如此大的离心力场下,如果流体存在有温度差,哪怕仅仅是几度的温差,都将会产生很大的浮升力. 如此大的浮升力足以克服微小通道中的阻力,驱使流体自身运动.

目前,从国内外学者的研究结果中发现多孔介质厚度的选择对于利用多孔介质达到强化换热的效果影响较大. 如 Chikh 等^[5]研究了水平套管之间部分充满多孔介质的强迫对流. 研究发现对于低传导性的材料,存在一个临界厚度使得热交换最小,而对于高传导性材料这一临界厚度不存在. 而且采用高渗透性和传导性多孔介质时,没有必要将其完全充满空间来获得最大的热交换率. 文献^[6]指出,多孔层结构参数、工质物性参数、沸腾热负荷及沸腾程序与多孔层成型工艺均影响多孔表面的沸腾换热性能. 在一定热负荷和工质下,对烧结型多孔层而言,多孔层孔隙率 ϕ 、孔隙直径 d_0 (或颗粒直径 d_p) 及层厚 δ 的影响甚大. 本文在机理研究^[7-9]的基础上,采用实验与数值模拟相结合的方法研究了不同多孔层厚度条件下,新型冷却结构的热驱动换热规律,并对其换热效果进行比较.

1 实验研究

1.1 实验装置

图 1 为实验研究所用的旋转台和试验件安装示意图. 主要包括动力系统、加热系统、冷却系统、测量系统等,具体如图所示. 冷却空气从空心轴进入,通过集气箱进入试验件然后由盘腔上方流出,其中集气箱内有两层孔板是使空气均匀进入试验件,以此来模拟涡轮叶片的工作状态.

图 2 和图 3 为本次实验所采用的试验件的照

片和示意图. 为了获得示意图中所示的封闭循环通道,实验中加工了一个外壳体,5 个内壳体,两块端板. 其中封闭通道中的多孔介质区域采用了材料为铜镍合金的泡沫金属作为固体介质. 具体见图 2. 整个试验件的外形尺寸为 $50 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$. 为了研究多孔层厚度的不同对流体热驱动换热的影响,实验中多孔介质区域采用了两种宽度,分别为 3 mm 和 6 mm ,其余通道宽度均为 1 mm ,如图 4 所示(图中展示了两种多孔介质区域宽度).

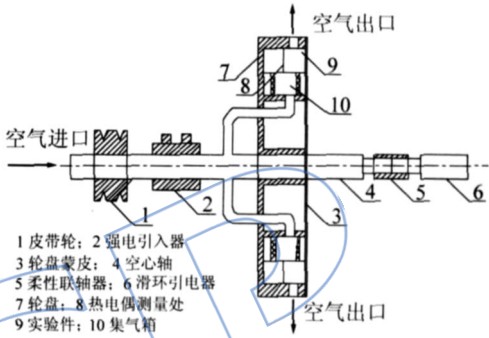


图 1 旋转台和试验件安装示意图
Fig.1 Schematic of experimental apparatus

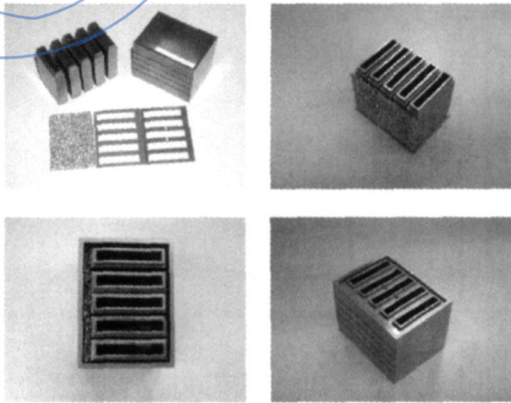


图 2 试验件照片
Fig.2 Photos of experimental model

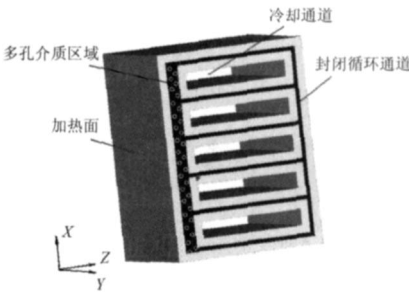


图 3 试验件示意图
Fig.3 Schematic of experimental model

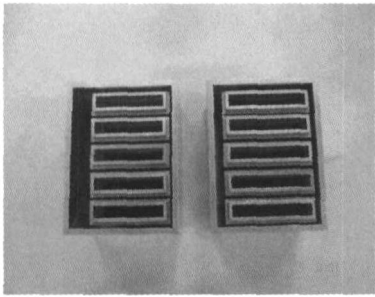


图 4 试验件照片

Fig. 4 Photos of experimental model

实验中通过贴在外壳体表面的加热膜对循环通道进行加热,调节电流可以获得不同的加热量.同时冷却空气穿过内壳体形成的冷却通道,将循环工质释放的热量带走.调节空气流量可以获得不同的冷却空气的进口速度.整个实验的工作范围为:加热量从 5390 W/m^2 到 48500 W/m^2 ;冷却空气进口速度从 32.1 m/s 到 96.2 m/s ;转速从 300 r/min 到 1380 r/min .

为了研究装有多孔介质的封闭通道内流体热驱动换热效果,这里定义了一个热驱动换热能力参数—— KH ,它表征了封闭通道内的流体通过热驱动循环流动,将热量携带至冷端的能力.其具体定义如下:

$$KH = \frac{q}{T_{\max} - T_{\min}}$$

其中 q 为加热面的热流密度, $T_{\max}$ 与 $T_{\min}$ 分别是沿着流体热驱动循环方向,封闭通道壁上测得的最高和最低温度.

1.2 实验结果和分析

图 5 给出的是 $\delta=6\text{ mm}$ (δ 表示的是多孔介质区域的宽度,具体见图 2 和图 3) 时,转速和冷气进口速度一定的情况下,不同热流密度时加热面的温度随 Y 的变化曲线图.从图中可以看出,在相同热流密度下,沿着流程方向(Y 轴正方向)热端壁面温度不断降低,这是因为流体在加热面处吸收热量,温度增加,密度减少,在离心力的作用下沿着 Y 轴负方向运动.这说明加入多孔介质后封闭腔体中仍然发生了热驱动流动.而且随着热流密度的提高,壁面上各测点温度均有不同程度的增加.热流密度越高,壁面上最高和最低测点的温差越大.这说明热流密度增大,热驱动能力增强,从而热驱动换热能力也不断提高.参考文献 [10] 可以发现,在热流密度变化的情况下, $\delta=3\text{ mm}$ 和 $\delta=6\text{ mm}$ 时,两者具有相同的换热规律.同样研究表明,转速与冷气进口速度变化时两者也

具有相同的换热规律,随着旋转速度和冷气进口速度的增大,流体的热驱动换热能力逐渐增强.

图 6~图 8 分别为热流密度、转速和冷气进口速度变化时,封闭腔体分别采用两种多孔层厚度时的热驱动换热能力参数的比较.从图中可以看出,两种厚度时封闭腔体具有相同的换热规律,但是 $\delta=3\text{ mm}$ 时封闭腔体的热驱动换热效果明显好于 $\delta=6\text{ mm}$ 时的情况.这是因为相比于 $\delta=6\text{ mm}$,当 $\delta=3\text{ mm}$ 时,多孔介质区域通道的宽度减

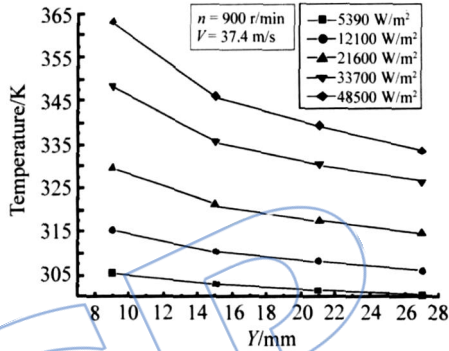


图 5 不同热流密度时加热面温度随 Y 变化曲线图

Fig. 5 Curves of temperature varying with Y under different heat flux

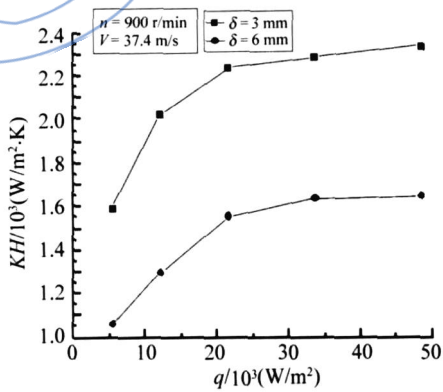


图 6 KH 随热流密度变化曲线图

Fig. 6 Curves of KH varying with heat fluxes

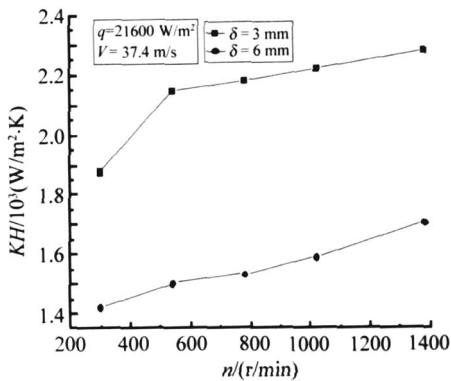


图 7 KH 随转速变化曲线图

Fig. 7 Curves of KH varying with rotating speeds

少,即多孔介质区域内冷热端间距减小,流体经过此区域时流阻降低,从而导致流体的热驱动力相对提高,流体的热驱动换热能力增强,所以其热驱动换热效果好于 $\delta=6\text{ mm}$ 时的情况。

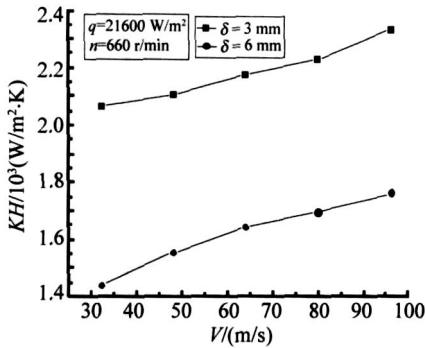


图 8 KH 随冷气进口速度变化曲线图

Fig.8 Curves of KH varying with cooling air speeds

2 数值研究

2.1 数学模型

为了更进一步了解装有多孔介质的封闭腔体中的流体流动和换热特点、热驱动流场和温度场分布,以及多种多孔层厚度条件下流体的热驱动换热能力的变化,本文对试验件进行了数值模拟。首先按照试验件的原始几何尺寸来建立模型对计算方法进行验证。然后在对多种厚度进行研究时,由于按试验件大小建立模型,计算多种厚度,计算量较大,所以计算中所采用的模型与实验模型相比,冷却通道减少为 2 个,并且将冷却通道的四周表面设为恒壁温来模拟冷却空气的冷却作用。计算时所采用的基本控制方程为^[11]

未加多孔介质部分

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ii}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

$$\frac{\partial[u_i(\rho E + P)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right]$$

加入多孔介质部分

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ii}}{\partial x_j} - \frac{\mu}{\alpha} u_i + \rho g_i -$$

$$2 \frac{\rho}{\varepsilon} e_{ijk} \omega e_j u_k + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{2} \omega^2 R^2 \right)$$

$$\frac{\partial[u_i(\rho E + P)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\kappa_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right]$$

其中 ω 为旋转角速度; ε 为多孔介质孔隙率; κ_{eff} 为

有效热传导系数 ($\kappa_{\text{eff}} = \alpha \kappa + (1 - \alpha) \kappa_s$, κ 为流体热传导系数, κ_s 为固体热传导系数); E 为流体内能; α 为多孔介质渗透率。由于数值计算中流体的相对速度较小且流体和固体的热传导系数相差不是很大,所以多孔介质部分采用了局部热平衡模型(文献[12]研究的流体和固体的热传导系数相差较大,且研究的是发汗冷却问题,所以未用文献[12]计算误差)。

边界条件参考实验中的各种参数,具体设定如下:加热面设定为等热流密度;冷却通道四周表面设为等壁温边界条件(验证计算方法时冷却面同时与封闭腔体内液体和冷却空气进行换热,均设为耦合面,每个冷却空气通道的进、出口面分别设为速度进口和压力出口);其余各面均设为绝热壁面。

本文数值模拟中采用商业软件 GAMBIT 生成网格,计算中采用了 Fluent 的耦合稳态隐式求解器(Coupled implicit steady solver),同时考虑到在旋转条件下,流场中有可能存在着较强的剪切作用,故采用了 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型,并在近壁区采用双层模型(Two-layer model)。

2.2 计算结果和分析

图 9 为整个试验件的温度分布,从加热面(平行于 XY 平面)来看,沿着 Y 轴的正方向,温度逐渐降低,这与实验的结果一致。为了验证计算模型和计算结果,本文将计算得到的加热面温度值和实验测量值进行了比较。图 10 为相同条件下($q = 5390\text{ W/m}^2$, $n = 900\text{ r/min}$, $v = 37.4\text{ m/s}$, $\delta = 3\text{ mm}$),计算得到的加热面温度分布曲线和实验中所测量得到的结果之比。从图中可以看出,计算结果和实验结果变化趋势一致,温度值接近,两者之间相差 5°C 左右,计算值偏高,这主要是由于实验时不可能做到完全绝热造成的。

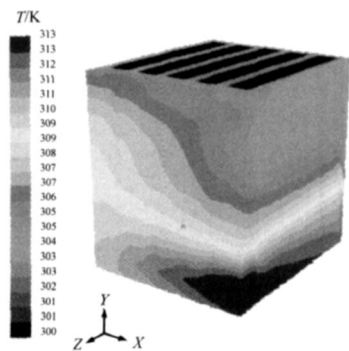


图 9 数值模拟得到的试验件温度分布

Fig.9 Temperature distribution by computation

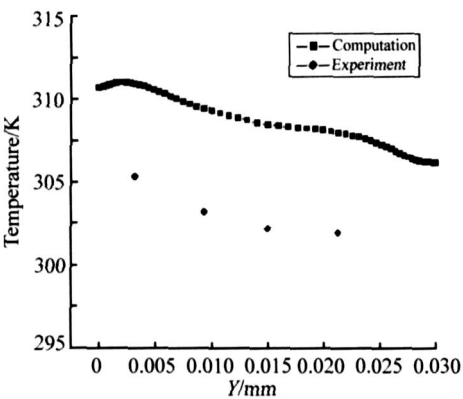


图 10 计算和实验结果比较

Fig. 10 Comparison between computation and experiment results

图 11 和图 12 给出了分别采用铜和钢两种固体介质后加热壁面的最高温度和热驱动换热能力参数随着多孔层厚度 δ 的变化曲线. 从图中可以看出, 无论是铜还是钢, 加热壁面的最高温度均随着多孔层厚度的减少而降低, 热驱动换热能力参数值随着多孔层厚度的减少而增加. 这说明多孔层厚度越小, 流体热驱动能力越强, 换热效果越好. 此结论与实验所得结果相同.

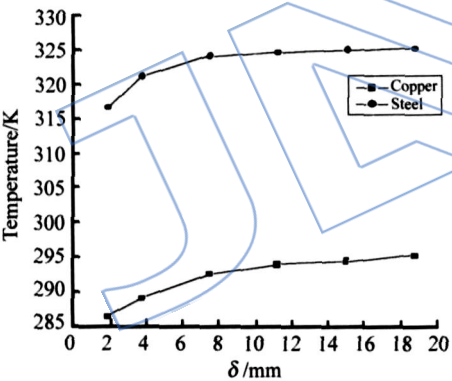


图 11 加热壁面的最高温度随 δ 的变化

Fig. 11 Highest temperature at heated wall varying with δ

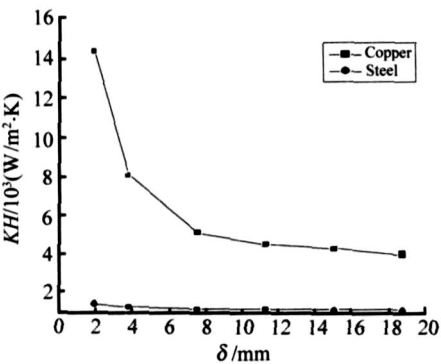


图 12 KH 随 δ 的变化

Fig. 12 KH varying with δ

为了直观地反映多孔层厚度对流体热驱动换热的影响, 这里以铜为例给出了封闭腔体的温度场和加热面温度分布随多孔层厚度的变化. 图 13 为四种不同多孔层厚度时, 封闭腔体表面的温度

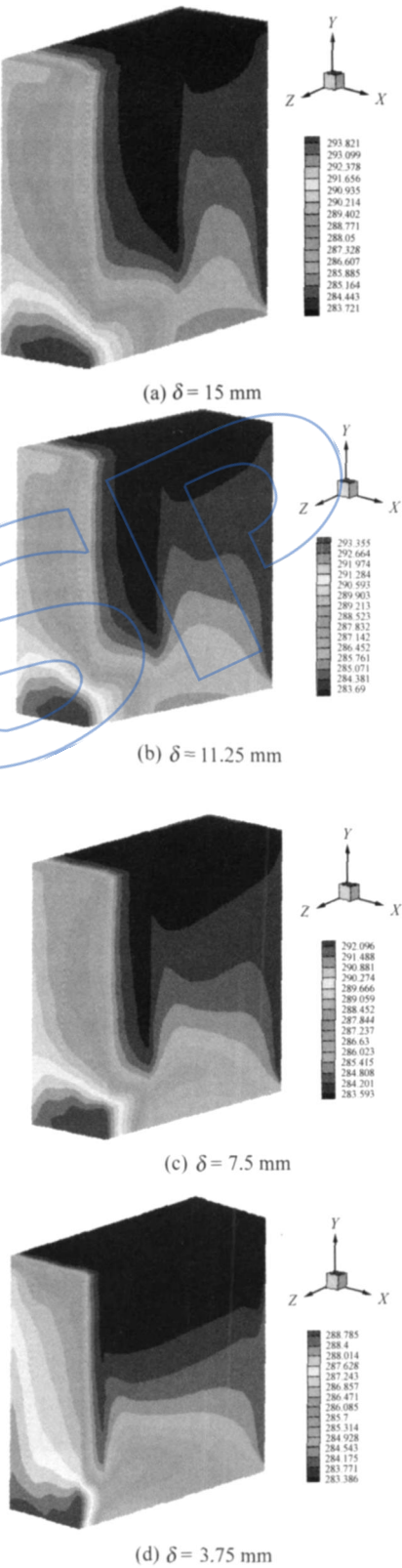


图 13 温度场显示图

Fig. 13 Temperature field display image

分布.图 14 为不同多孔层厚度时加热面的温度分布.从图 13 可以看出,封闭腔体表面随着多孔层厚度的减少温度沿 Y 轴分层分布的趋势越发明显,尤其是加热面处.这说明随着多孔层厚度的减少流体热驱动能力增强,从而封闭腔体的热驱动换热效果不断提高.这一结论又可从图 14 中得到证明,因为随着多孔层厚度的减少,加热面温度下降,同时加热面上的最高和最低温度之间的温差也不断降低.此外,从图 14 还可以看出,随着多孔层厚度的减少,到了后期加热面温度下降的幅度以及加热面上的最高和最低温度之间的温差降低的幅度均急剧增大.这可能是多孔层厚度减少到一定程度,全部流体充分迅速地加入到循环流动中去的结果.以上分析表明,多孔层厚度越小,流体的热驱动能力越强,封闭腔体的热驱动换热效果越好.

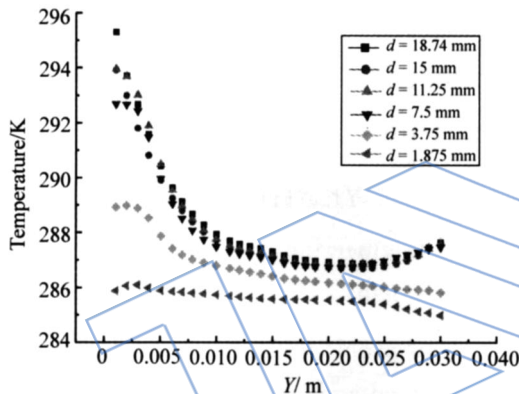


图 14 不同多孔层厚度时加热面的温度分布

Fig. 14 Temperature distribution varying with porous layer thickness

3 结 论

1) 不同多孔层厚度条件下,该新型冷却结构具有相同的换热规律.

2) 国内外的研究表明利用多孔介质可以达到增强换热的效果,但文献[5-6]指出多孔介质厚度的选择对于利用多孔介质达到强化换热的效果影响较大,因此本文中改变了多孔层的厚度.研究结果表明,随着多孔层厚度的减少,新型冷却结构的热驱动换热能力增强.

参考文献:

[1] 常海萍,过增元.一种燃气涡轮冷却技术:中国:ZL 01108222 [P]. 2001.
[2] Varahasamy M, Fand R M. Heat transfer by forced convection in pipes packed with media whose matrices are

composed of spheres [J]. Int. Heat Mass Transfer, 1996, 39(18):3931-3847.

- [3] Hsu C T, Cheng P. Closure scheme of the macroscopic energy equation for convection heat transfer in porous media [J]. Int. Commu. Heat Transfer, 1988, 15:689-703.
[4] Ould-Amer Y, Chikh S, Bouhadek K, et al. Forced convection cooling enhancement by use of porous materials [J]. Int. Heat and Fluid Flow, 1998, 19(3):251-258.
[5] Chikh S, Boumedien A, Bouhadek K. Analytical solution of non-darcian forced convection in an annular duct partially filled with a porous medium [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1995, 38(9):1543-1551.
[6] Nishikawa K, Ito T. Augmentation of nucleate boiling heat transfer by prepared surfaces, heat transfer in energy problems [M]. Washington, D C: Hemisphere Publishing Corporation, 1982:111-118.
[7] 毛军逵,常海萍,方立.离心力场下细微封闭通道内 R12 的热驱动换热研究[J].航空动力学报,2003,18(4):498-501.
MAO Junkui, CHANG Haiping, FANG Li. Experimental investigation of flow and heat transfer about the thermal driving of R12 in rotating small-size circular enclosures [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4):498-501. (in Chinese)
[8] 毛军逵,常海萍,方立.离心力场流体热驱动液晶显现实验研究[J].工程热物理学报,2004,25(2):229-231.
MAO Junkui, CHANG Haiping, FANG Li. Investigation of thermally driven in centrifugal field with liquid crystal [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2):229-231. (in Chinese)
[9] 杨敏,常海萍,毛军逵.离心力场下 H_2O 和 R12 热驱动换热特性实验研究[J].工程热物理学报,2004,25(2):302-304.
YANG Min, CHANG Haiping, MAO Junkui. Experimental investigation of thermally driving heat transfer characteristics of H_2O and R12 in a centrifugal force field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2):302-304. (in Chinese)
[10] 夏婕,常海萍.离心力场下多孔介质的不同孔隙率对热驱动换热影响的研究[J].航空动力学报,2006,21(6):972-977.
XIA Jie, CHANG Haiping. Effect of different porosity on thermally driven heat Transfer in a centrifugal force field [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(6):972-977. (in Chinese)
[11] Fluent Inc. Fluent user's guide [M]. [S. l.]: Fluent Inc., 1998.
[12] Wang J H, Wang H N. A discussion of transpiration cooling problems through an analytical solution of local thermal nonequilibrium model [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2006, 128:1093-1098.