

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0507-05

离心力场下多孔介质中热驱动 换热的实验

夏 婕, 常海萍

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 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, 用实验的方法, 模拟了离心力场下该新型冷却结构的热驱动换热现象, 并与无多孔介质的情况进行了比较。实验结果表明: 随着旋转速度、热流密度和冷气进口速度的增大, 装有多孔介质的新型冷却结构的热驱动换热能力逐渐增强。同时实验研究发现, 加入多孔介质后该新型冷却结构比未加多孔介质时具有更好的换热效果。

关键词: 航空、航天推进系统; 多孔介质; 热驱动; 封闭腔体; 离心力; 实验研究

中图分类号: V 231

文献标识码: A

Experimental Investigation on Thermo-Driving Heat Transfer in Porous Medium in a Centrifugal Force Field

XIA Jie, CHANG Hai-ping

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the research of turbine blade super cooling technique, experiments have been carried out to investigate the thermo-driving heat transfer phenomenon in a new cooling configuration filled with porous medium in a centrifugal force field. The heat transfer effectiveness of the new cooling configuration was compared to that of the configuration with no porous medium. The results show that the thermo-driving heat transfer effectiveness of the cooling configuration filled with porous medium can be enhanced by increasing the rotating speed, heat flux and cooling air speed. The heat transfer effectiveness of the new cooling configuration is strengthened with the installation of porous medium.

Key words: aerospace propulsion system; porous medium; thermo-driving heat transfer; enclosure; centrifugal force; experimental study

涡轮是发动机中热负荷和动力负荷最大的部件。采用有效的冷却措施是发动机安全可靠工作的有力保证, 也是降低高温材料成本的有效措施。

因此, 研究新的高效冷却方式已成为发展下一代燃气轮机的紧迫需求。针对这种情况, 常海萍教授和过增元院士提出了一种基于热驱动(温度变化

收稿日期: 2005- 06- 4; 修订日期: 2005- 12- 01

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

作者简介: 夏婕(1975-), 女, 浙江上虞人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热与传质及涡轮叶片冷却的研究。

所引起的自然对流)理论的新型超级冷却技术^[1]。该冷却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,这样一来将增大已经承受了高负荷的叶片的应力。而如果在细微通道中加入多孔介质就可以分散叶片所受的应力,提高叶片的强度。同时多孔介质内流体的流动存在着弥散效应,其作用与湍流中的涡流相似,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的增强^[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。因此,在新型超级冷却技术中采用多孔介质还是有一定发展前景的。本文在机理研究^[5~7]的基础上,用实验的方法模拟了加入多孔介质后新型冷却结构的热驱动换热现象,并与无多孔介质的情况进行了比较研究。

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。

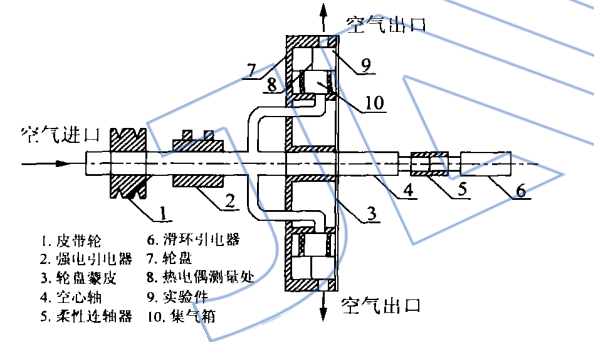


图1 旋转台和试验件安装示意图
Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

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1个外壳体,5个内壳体,2块端板。其中封闭通道中的多孔介质区域(孔隙率为98%)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。

将5个内壳体插入一块端板,放入外壳体中,再将泡沫金属放在内外壳体之间,盖上另一块端板,便形成了部分装有多孔介质的封闭循环通道,循环工质采用水。通道的宽度通过端板上加工的肋的宽度来控制,除了多孔介质区域通道的宽度为3 mm,其余通道宽度均为1 mm。整个试验件的

外形尺寸为50 mm×36 mm×38 mm。

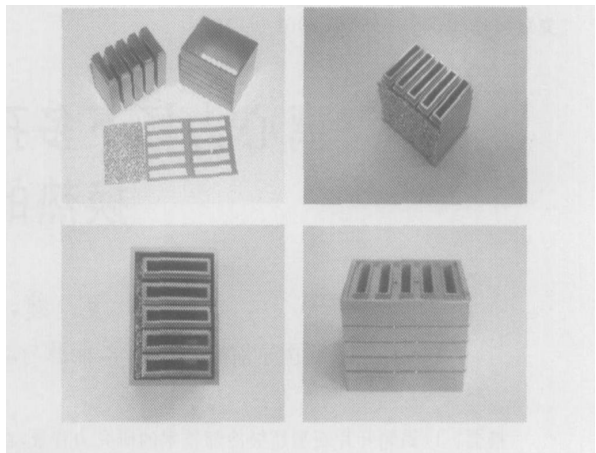


图2 试验件照片
Fig. 2 Photos of experimental model

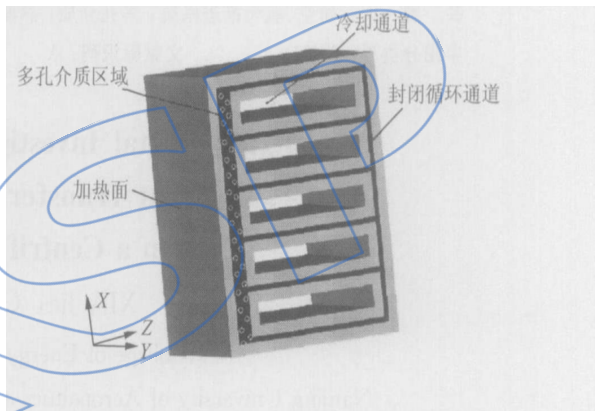


图3 试验件示意图
Fig. 3 Schematic of experimental model

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5 390~48 500 w/m²;冷空气进口速度从32.1~96.2 m/s;转速从300~1 380 r/min。实验结果的获得是通过加热面上埋热电偶(测量点的分布见图2)测量热电动势,然后经过铜—康铜热电偶分度表转换得到温度分布。

2 实验结果和分析

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,并与未加多孔介质的情况进行比较,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(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; 到达冷端后, 即与加热面相对的平面处, 流体释放热量, 温度降低, 密度增加, 流体将向 Y 正方向运动, 从而在通道内形成了循环流动), 封闭通道壁面上测得的最高和最低温度。

误差分析(方法见文献[8])表明, 热驱动换热能力参数 KH 的不确定度为 4.72%。

2.1 装有多孔介质的封闭腔体内热驱动换热的实验研究结果

实验获得的加热面的温度分布规律与理论分析的结果相一致。图4 和图5 分别为转速和冷气进口速度一定的情况下, 加热面的温度和热驱动

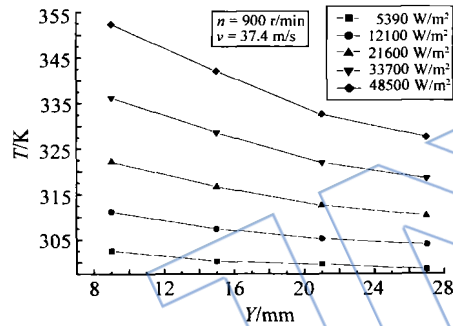


图4 加热面温度随热流密度变化曲线图
Fig.4 Curves of temperature varying with heat fluxes

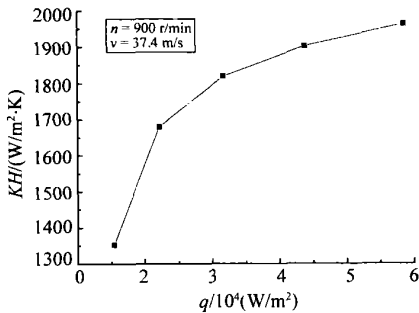


图5 KH 随热流密度变化曲线图
Fig.5 Curves of KH varying with heat fluxes

换热能力参数随着热流密度的变化曲线图。从图4 可以看出, 在相同热流密度下, 沿着 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, 从而进一步证明了我们的想法, 虽然流体流过多孔介质时流动阻力增加得很多, 但可以通过很大的浮升力来克服。从图4 还可以看出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。而且热流密度越高, 壁面上最高和最低测点的温差越大。由热驱动理论可知, 提高热驱动强度的主要两个方式为: (1) 提高彻体力场的强度, 即增加彻体力加速度; (2) 增加流体的密度差, 即提高流体的温度差。这样一来, 离心加速度不变时, 热流密度增大, 流体温度差增大, 于是热驱动能力增强, 从而热驱动换热能力不断提高。从图5 的热驱动换热能力参数随热流密度的变化可以更清楚地看到这一点。

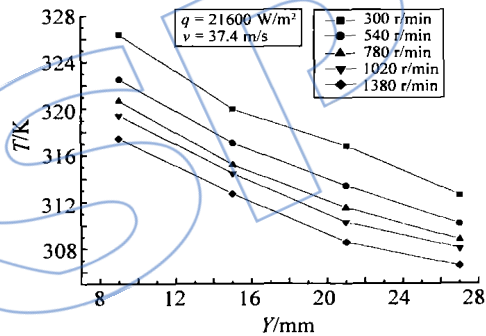


图6 加热面温度随转速变化曲线图
Fig.6 Curves of temperature varying with rotate speeds

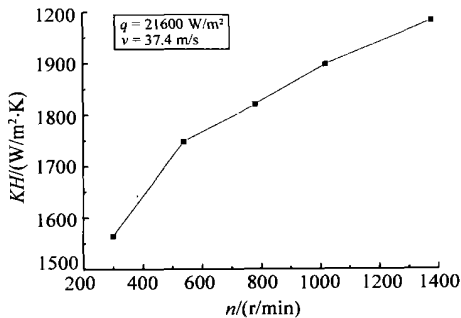


图7 KH 随转速变化曲线图
Fig.7 Curves of KH varying with rotate speeds

图6 和图7 分别为热流密度和冷气进口速度一定的情况下, 加热面的温度和热驱动换热能力参数随着转速的变化曲线图。从图中可以看出随着转速(离心加速度)的增加, 壁面上各测点的温

度降低,同时壁面上最高和最低测点的温差减小,热驱动换热能力参数不断增加,这主要是因为热流密度不变,离心加速度增大,于是热驱动能力增强,从而热驱动换热能力不断提高。

图 8 和图 9 分别为热流密度和转速一定的情况下,加热面的温度和热驱动换热能力参数随着冷气进口速度的变化曲线图。从图中可以看出随着冷气进口速度的增加,壁面上各测点的温度降低,同时壁面上最高和最低测点的温差减小,热驱动换热能力参数不断增加,这主要是因为热流密度不变,离心加速度不变,冷气进口速度增加,对冷端的冷却能力增强,冷端壁温下降,于是热驱动能力增强,从而热驱动换热能力不断提高。

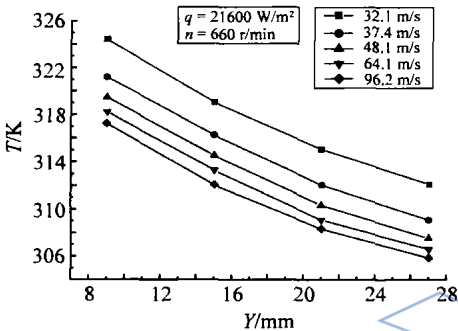


图 8 加热面温度随冷气进口速度变化曲线图
Fig. 8 Curves of temperature varying with cooling air speeds

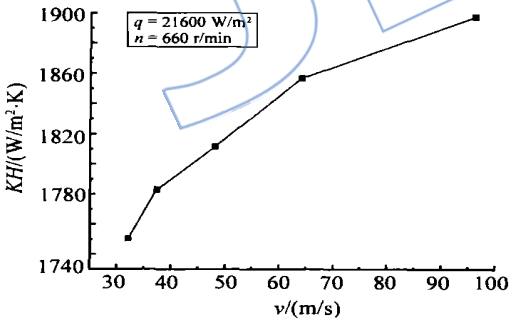


图 7 KH 随冷气进口速度变化曲线图
Fig. 9 Curves of KH varying with cooling air speeds

以上研究表明,热流密度、转速、冷气的进口速度的变化对装有多孔介质的封闭腔体内流体的热驱动换热均有影响。当热流密度、转速、冷气的进口速度增大时,热驱动换热能力均得到增强。

2.2 热驱动换热效果比较

本文在研究装有多孔介质的封闭腔体内流体

热驱动换热的同时,又与未加多孔介质的情况进行了比较。图 10 为转速和冷气进口速度一定的情况下,未加多孔介质时加热面的温度随着热流密度的变化曲线图。将图 4 和图 10 进行比较发现,在热流密度变化的情况下,封闭腔体内加与未加多孔介质均具有相同的换热规律。同样研究表明,

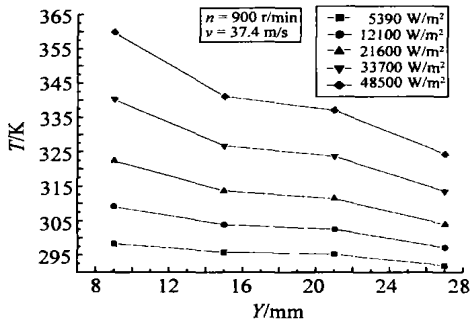


图 10 加热面温度随热流密度变化曲线图
Fig. 10 Curves of temperature varying with heat fluxes

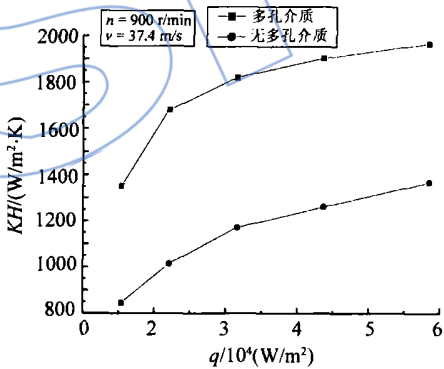


图 11 KH 随热流密度变化曲线图
Fig. 11 Curves of KH varying with heat fluxes

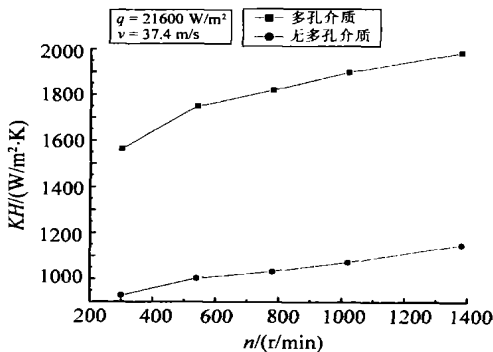


图 12 KH 随转速变化曲线图
Fig. 12 Curves of KH varying with rotate speeds

转速与冷气进口速度变化时两者也具有相同的换

热规律。图 11~图 13 分别为热流密度、转速和冷气进口速度变化时,两种情况下热驱动换热能力参数的比较。从图中可以看出,虽然封闭腔体中加入多孔介质后与未加时具有相同的换热规律,但热驱动换热效果却要比未加时有了明显的提高。

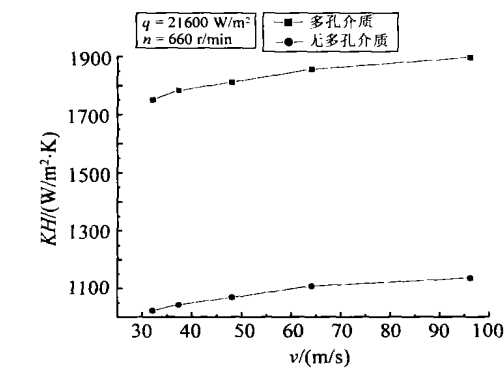


图 13 KH 随冷气进口速度变化曲线图
Fig. 13 Curves of KH varying with cooling air speeds

因为在相同工况下,加入多孔介质后的热驱动换热能力参数要比未加时提高了 60% 左右。由此可知,在新型冷却结构中加入多孔介质不但可以增加结构的强度,同时还能使换热得到显著的增强。

3 结 论

- (1) 在新型冷却结构中加入多孔介质后,封闭腔体中仍然发生了热驱动流动。
- (2) 热流密度、转速、冷气的进口速度的变化对装有多孔介质的封闭腔体内流体的热驱动换热均有影响。当热流密度、转速、冷气的进口速度增大时,热驱动换热能力均得到增强,这与未加多孔介质时具有相同的换热规律。
- (3) 封闭腔体中加入多孔介质后,热驱动换热效果要比未加时有了明显的提高。因此,在新型

冷却结构中加入多孔介质不但可以增加结构的强度,同时还能使换热得到显著的增强。

参考文献:

[1] 常海萍,过增元.一种燃气涡轮冷却技术[P].中国专利:ZL 01108222, 2001- 04.

[2] Varahasamy M, Fand R M. Heat Transfer by Forced Convection in Pipes Packed with Porous Media Whose Matrices are Composed of Spheres[J]. *Int. Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(18): 3931~3947.

[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, Bouhadef K, Lauriat G. Forced Convection Cooling Enhancement by Use of Porous Materials[J]. *Int. Heat and Fluid Flow*, 1998, 19(3): 251~258.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 杨敏,常海萍,毛军逵.离心力场下H₂O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.

[10] Yang Min, Chang Haiping, Mao Junkui. Experimental Investigation of Thermally Driving Heat Transfer Characteristics of H₂O and R12 in a Centrifugal Force Field[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(2): 302~304.

[11] 恽起麟.风洞实验数据的误差与修正[M].北京:国防工业出版社, 1996.