

文章编号: 1000-8055(2010)04-0786-08

针板结构内壁面的换热特性研究

张 斌, 朱惠人, 许都纯

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 应用瞬态液晶测温技术对一种层板(针板)内壁面进行了详细的换热特性研究, 实验分别测量了孔间距与冲击孔径比(S/D)为 3.2, 4.5 和 5.9, 冲击雷诺数 Re 范围为 10 000~40 000 下的内表面换热特性, 同时和传统层板换热特性进行了对比分析. 研究结果表明: 针板内壁面平均传热系数随着 Re 的增加而增大, 随着孔间距增大而减小; 同时给出了靶面和冲击面的平均努塞尔数 Nu 与冲击雷诺数 Re 及孔径比 S/D 的数学拟合准则式.

关 键 词: 针板; 冲击面/靶面; 瞬态液晶; 传热系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Investigation on heat transfer characteristics of spiculate lamilloy internal surfaces

ZHANG Bin, ZHU Hui ren, XU Du chun

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Experiment was carried out to analyze the heat transfer characteristics of the inner surfaces of a kind of lamilloy configuration by using narrow-band transient liquid crystal technique. In this research, the ratio of hole pitch to impingement hole diameter (S/D) is 3.2, 4.5, 5.9, and Reynolds numbers range from 10 000 to 40 000. This paper also compared with traditional lamilloy model to analyze the heat transfer mechanism. The result shows that: heat transfer coefficient of the surfaces increases when Re becomes greater, and gradually decreases when the holes pitch becomes wider. The mathematics fit formulas of the Nu with respect to Re and S/D has also been given.

Key words: spiculate lamilloy; impingement/target plate; transient liquid crystal; heat transfer coefficient

现代燃气轮机中高温部件燃烧室及涡轮的冷却一直是国际研究的热点^[1], 随着燃机性能的不断提高, 对高温部件的有效冷却显得尤为重要. 层板冷却作为目前新型冷却技术, 它既接近于发散冷却的效果, 而且充分利用了冲击冷却传热系数高的优点, 同时又发挥了内部丰富的扩展面积强化换热效果, 因此具有冷却介质消耗少, 冷却效果高的特点, 对其进行深入研究非常重要. 国外 Funazaki 等

人^[23]对传统结构层板的内部表面换热特性等做了一系列的研究和分析, 而且美英俄等发达国家已经对层板冷却技术进入实际应用阶段^[4]. 国内郁新华、全栋梁、陶智、孔满昭等人^[58]也对传统式层板的整体冷效及流阻等特性进行了系统的研究.

以往众多学者研究的层板结构为两边壁面, 中间铸有扰流柱, 三者合为一体的冷却结构, 鉴于这种结构在实际应用中存在不可忽视的工程问

收稿日期: 2009-04-06; 修订日期: 2009-07-14

基金项目: 国家 973 计划项目(2007CB707701)

作者简介: 张斌(1984-), 男, 陕西榆林人, 硕士生, 主要从事航空发动机高温部件的传热与冷却技术研究.

题:即由于层板的冷却性能非常好,导致结构在径向温度梯度很大,扰流柱受到的热应力也很大,因其两端和壁面铸为一体,使得层板在柱向方向产生的热应力不容易消除. 针对以上问题,文章提出一种非接触式层板(以下简称针板)冷却方案,这种结构主要特点就是层板中间的绕流柱与冲击板面没有直接接触,呈微小的缝隙状(如图 1),这样就有条件满足在工程应用中消除热应力的要求,目前国内还不多见对这种结构的换热研究,为了研究其具体的内部换热机理,本文初步对其进行了内表面换热实验研究,为以后针板整体性能(包括考虑扰流柱的导热作用等)的研究探索规律. 由于材料的选择不影响内表面传热系数的测量,因

此为了测量方便,本实验件材料选用有机玻璃.

1 测试方案及实验件

本文应用目前国际上较为成熟的非接触式瞬态液晶测温技术,分别研究了冲击雷诺数 Re 变化、冲击孔间距变化对针板结构内表面传热系数的影响. 在满足一维半无限大理论的前提下,针板内表面的传热系数 h 可由文献[3]计算方法得到,本文不做过多叙述. 由针板内表面初始温度 T_0 , 加热气流温度 T_g , 液晶变色温度 T_w , 实验经历时间 t , 即可求得传热系数 h . 以下为计算公式:

$$\frac{T_w - T_0}{T_g - T_0} = 1 - \exp\left[\frac{h^2 t}{\rho c k}\right] \operatorname{erfc}\left[h \sqrt{\frac{t}{\rho c k}}\right] \quad (1)$$

其中 ρ, c 和 k 为实验件材料(有机玻璃)的热物理特性,分别表示材料密度、比热容和导热系数. 通常我们选取流经针板气流的温度变化为逐渐上升过程,方程(1)便可写为以下形式:

$$T_w - T_0 = \sum_{i=1}^N U(t - \tau_i) \Delta T_g$$

而 $\Delta T_g = T_{g,i} - T_{g,i-1}$ (2)

$$U(t - \tau_i) = 1 - \exp\left[\frac{h^2}{\rho c k} (t - \tau_i)\right] \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{h \sqrt{(t - \tau_i)}}{\sqrt{\rho c k}}\right] \quad (3)$$

记录随时间而变化的气流温度 T_g , 将时间 τ 和 ΔT_g 的步长变化代入上述方程,传热系数就可求得.

实验系统图由图 2 给出,气流从鼓风机出发

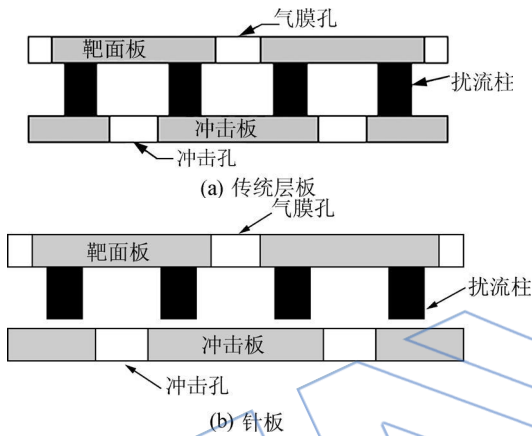


图 1 传统结构的层板和结构层板示意图

Fig. 1 Traditional lamilloy model and spiculate lamilloy model

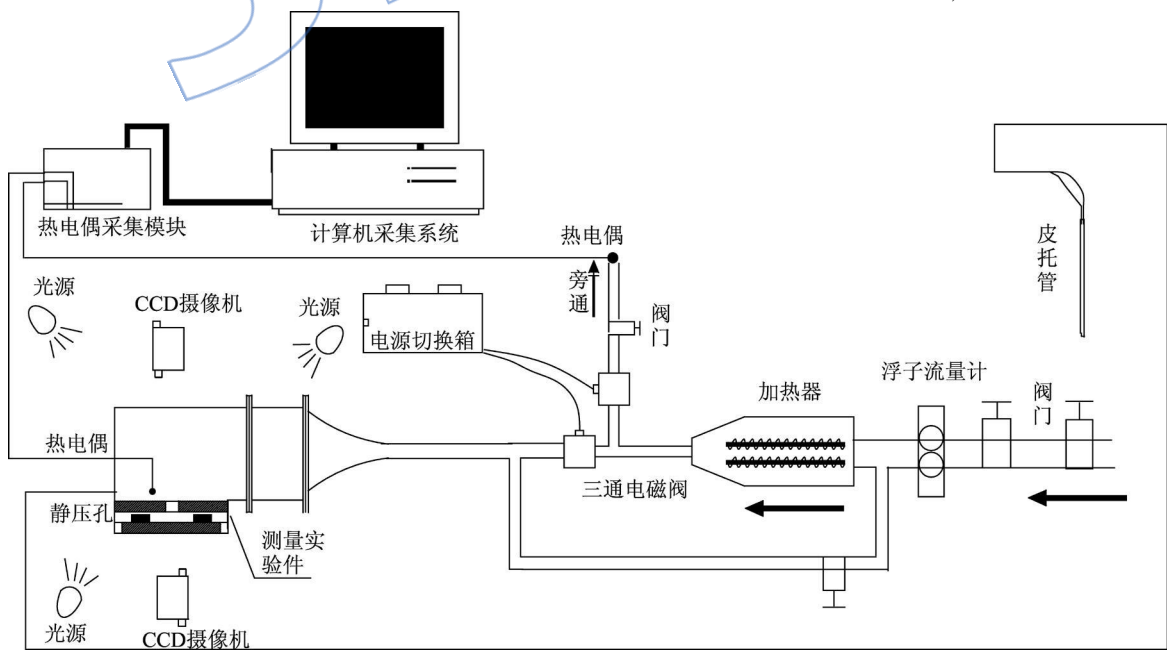


图 2 针板换热实验系统图

Fig. 2 Heat transfer experimental scheme of spiculate lamilloy

依次流经调节阀门、流量计和加热器;在瞬态换热实验开始前,气流由旁通管排出,旁通出口装有热电偶监控气流温度,当气流温度满足实验要求时,电磁阀开关切换(旁通关闭,气流切换至实验段),实验开始,温度数据采集系统以及 CCD (charge coupled device) 摄像机同步工作,待被测实验件表面液晶颜色变化完毕,实验数据采集工作结束.实验后的数据处理采用 Matlab 语言完成,最后得到传热系数云图.

图 3 给出了实验方案及实验件的平面结构示意图,测量的实验件选取一个几何冲击单元,即由一个冲击孔、4 个扰流柱以及 4 个 1/4 气膜孔组成.也就是图 2 中实验段的放大图.实验件具体尺寸在表 1 中给出,其中 D 为冲击孔直径、 D_{out} 为气膜孔直径、 H_p 为扰流柱高度、 D_p 为扰流柱直径、 S 为冲击孔间距.实验件由有机玻璃材料加工而成.

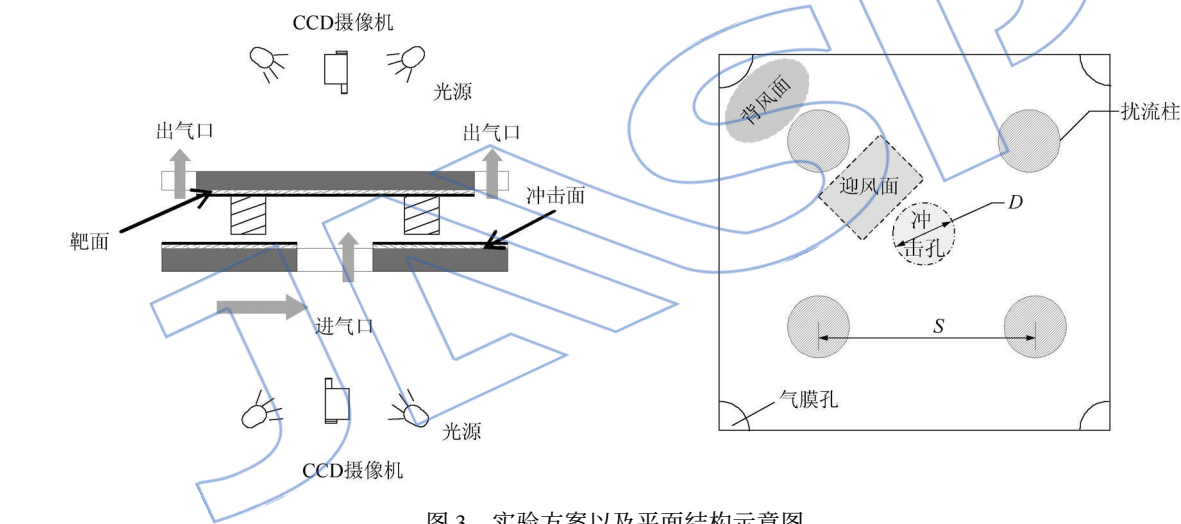


图 3 实验方案以及平面结构示意图

Fig. 3 Experimental scheme and plates ichnography

3 传热系数误差分析

对于瞬态液晶测量传热系数的实验误差分析,文献[9]对其进行详细的研究.在本实验中,不同工况下选取冲击气流温度范围为 $45\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,壁面初始温度范围为 $19\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,热电偶温度测量误差为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后根据文献中误差传递公式 $\left(p_w/h\right)=\Phi_h\left(p_t/\theta_{aw}\right)$,最后计算得到本实验测量传热系数的误差不超过 7.9% .

4 实验结果及分析

4.1 针板结构与传统层板结构换热机理对比

为了和传统层板的换热特性进行对比,在针板

2 实验工况

实验中通过改变流动参数冲击雷诺数 Re 和几何参数孔间距 S (表 1)、进行多次实验,然后对结果进行分析讨论.以冲击孔的直径为基准对冲击雷诺数 Re 进行定义: $Re=\rho u D/\mu$,其中 ρ 为气流密度, u 为冲击孔平均速度, μ 为动力黏性系数, D 为冲击孔径,实验雷诺数 Re 范围为 $10\,000\sim 40\,000$.

表 1 实验件几何参数

Table 1 Geometry parameters of lamilloy experimental model

D/mm	D_{out}/D	H_p/D	D_p/D	S/D
10.0	1.0	1.5	0.9	3.2, 4.5, 5.9

实验范围内任取一张实验云图($Re=20\,000, S/D=5.9$),同时给出了文献[10]中对应工况下的实验云图作对比分析(图 4).首先分析针板靶面的换热云图即图 4(a),很明显图中 1 区传热系数最高,这里为典型的层板强冲击区,主要是由于其黏性附面层最薄因此换热最强;分布最广的类环状 2 区传热系数较高,主要是区域内横流较为紊乱所致;图中 3 区为扰流柱根部,传热系数也比较高,由于气流冲刷扰流柱传热强烈,但气流很快就从柱体两侧分离,所以高传热区面积很小;值得注意的是,从图中也可以发现 4 个扰流柱根部的高传热区强度略有差异,可以解释为:第一是由于侧向补光使得扰流柱根部产生很小的投影导致此处

显色不成功,第二是由于扰流柱根部的热敏液晶在装配中难免受到微创,导致显色不完整;4 区是一个相对较为低的传热区域,是由于四周边界条件均为对称面,气流掺混强度有所降低导致;5 区则是靶面上一个比较典型的低换热区域,扰流柱的存在使得气流在其背风面产生分离,所以此处的传热系数较低;在气膜孔附近的 6 区,则由于气膜孔的抽吸作用,此处靶面的传热系数有所增大。

对比传统层板结构的靶面换热云图 4(c),可以发现两种结构的传热区域分布基本一致,即高热区为冲击核心区 1 区、扰流柱根部 3 区,较为低的传热区为扰流柱背风区 5 区等,说明这两种结构靶面的传热机理基本相近;

同样分析冲击面的换热云图. 首先分析针板结构冲击面的云图,如图 4(b) 所示,冲击气流首先由冲击孔冲到靶面,然后到达四周对称面,绝大部分气体沿对称面反卷向上冲到冲击面,对冲击面产生较强烈的冲击作用,如图中 1 区所示;随着反卷气流脱离壁面,冲击面 2 区环状低换热区形

成;图中 3 区的换热则是由于高速冲击气流在冲击孔附近产生很大的吸卷作用,使得边界层很薄,此处的换热也较强烈;在冲击面的其他区域,值得注意的是 4 个边界角处即图中 4 区,由于气流在气膜孔的抽吸下已经脱离冲击面,所以该区域传热系数较低。

对比传统层板的冲击面换热云图 4(d),可以看出两种结构的换热有很大差别。首先分析差异:由于传统结构下扰流柱和冲击板面连接在一起,导致气流在冲击面的流动受到很大限制,近壁面处紊流度很低,所以在此面产生很多低换热区,导致整个面的换热强度降低,当然由于扰流柱的存在,在其根部同样类似靶面传热系数也比较高如 3 区。至于相同之处为:在四周对称面处 1 区及背风区 4 区的换热和针板结构基本相似。

通过对比,可以看出针板与传统层板的换热机理基本相近,但是针板由于“缝隙”的存在,使得气流在针板内部横向流动受限相对减小,气流活动空间变大,更容易形成通道反卷大窝,即二次反

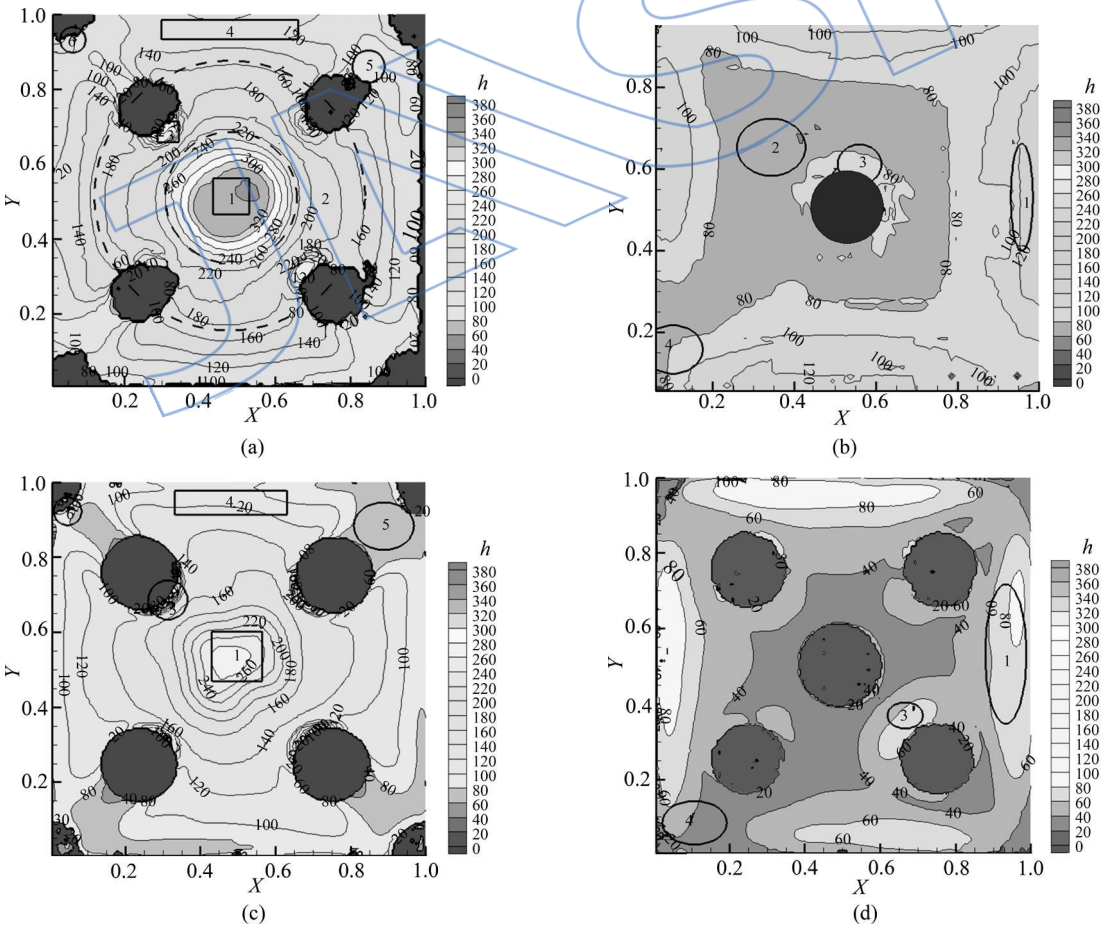


图 4 两种结构传热系数分布云图对比

Fig. 4 Comparison of two models heat transfer coefficient distribution

卷冲击更为广泛,使得整个通道中流动更加激烈,所以会使得换热强度要略高于同工况下的传统层板面,尤其是冲击面换热提高的更为明显,而且冲击面的换热均匀性更好一些.总体上讲针板的换热特性要略优于同工况下的传统层板.

4 2 冲击雷诺数对针板内壁面换热的影响

图 5 给出了三种冲击 Re 同一孔间距下靶面的传热系数(单位为 $W/(m^2 \cdot K)$)分布云图.通过

前节对针板换热机理的分析,对比 $Re=10\,000$, $20\,000$ 和 $30\,000$ 的靶面传热系数分布云图,可以看出其换热分布特性基本一致,但差别也是显而易见:首先,随着 Re 的降低,即射流中心区冲击速度降低,1 区传热系数下降;其次,扰流柱内侧 2 区的范围随着 Re 的降低而缩小,主要由于冲击气流滞止以后横向流动速度减小,换热强度就降低,还有一个原因就是气流滞止、反卷、再冲击的强度下降导致换热降低;最后,同样由于冲击速度降低的缘故,腔内气流冲刷四周通道壁面的强度下降,致使 4 区的换热强度也随着 Re 的降低而减小.通过对比,可以得出冲击 Re 对靶面换热影响很大,提高雷诺数有利于换热.

图 6 为三种冲击 Re 下对应冲击面的换热分布云图.对比不同 Re 下分布云图,可以看出随着 Re 减小,整个面平均换热强度下降,尤其是四周壁面处即 1 区的传热系数明显下降,这主要是由于随着冲击气流速度的减小,反卷窝的反面冲击强度减弱,从而使得四周端壁传热系数减小;同时还可以看出,随着 Re 减小,低传热区 2 区的范围在增大,这也和反卷窝的强度减弱有关,可见 Re 的改变对冲击面亦有很大影响.

4 3 孔间距对针板内壁面换热的影响

图 7 给出了 $Re=20\,000$ 时,三种孔间距下靶面的传热系数分布云图.需要说明的一点是由于孔间距发生变化, Tecplot 软件处理的相对图形面积不变,所以图中扰流柱显得“增大”.首先分析 $S/D=5.9$ 的换热云图,可见冲击区和附近区域为高换热区,其他的地方为低传热区;对于 $S/D=4.5$ 的层板结构,由于随着孔间距的减小,气流在扰流柱之间的冲刷更为激烈,使得扰流柱根部也为高传热区,冲击区换热更为广泛;当孔间距进一步减小时,可以看到 $S/D=3.2$ 层板靶面换热特性和前者有很多不同之处.首先是相对整个面来说其高换热区分布较为均匀,整个靶面的传热系数都很高,这主要是由于气流流动空间减小,剧烈掺混导致整个靶面换热增强,尤其是在四周气流相互滞止作用的壁面处.总之,孔间距对靶面传热影响很大,随着孔间距的减小,靶面的传热系数增加.

图 8 给出了对应工况下冲击面的传热系数分布云图,从图中可以看出,冲击面基本也是四周传热系数要高一些,中间为低传热区,孔附近由于冲击气流的反卷作用而使得局部传热也有所增强.

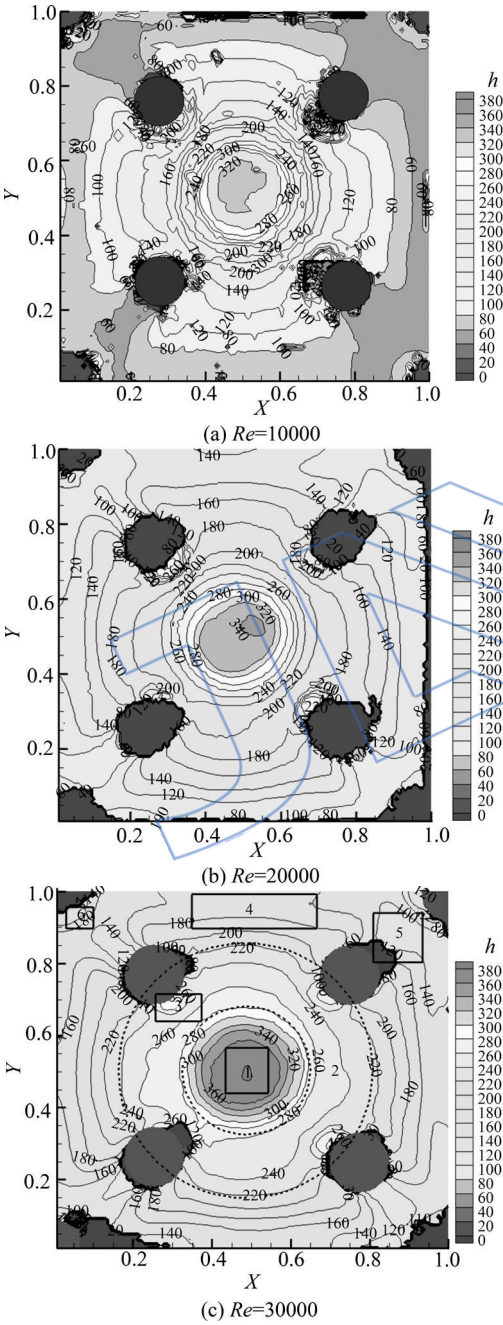


图 5 三种雷诺数 Re 下靶面传热系数分布云图
Fig. 5 Heat transfer coefficient distribution on target plates at three kinds of Re

对比不同孔间距下靶面的传热系数分布云图, 可以发现随着孔间距的减小, 冲击面的传热更加杂乱, 流动更加复杂无态, 但纵观其传热强度, 孔间距的改变对冲击面的换热影响不是很明显, 随着孔间距变小, 换热略有所增强。

图 9 给出了不同孔间距下靶面和冲击面平均传热系数随着 Re 变化的趋势图, 可以看出, 靶面

的平均传热系数均随着孔间距的减小而增大, 且增幅明显, 同时平均传热系数随着 Re 增大而增大, 最后逐渐趋于平缓; 冲击面的换热强度随着孔间距的减小略有提高, 但增幅不明显, 同时随着 Re 的增大亦增加。

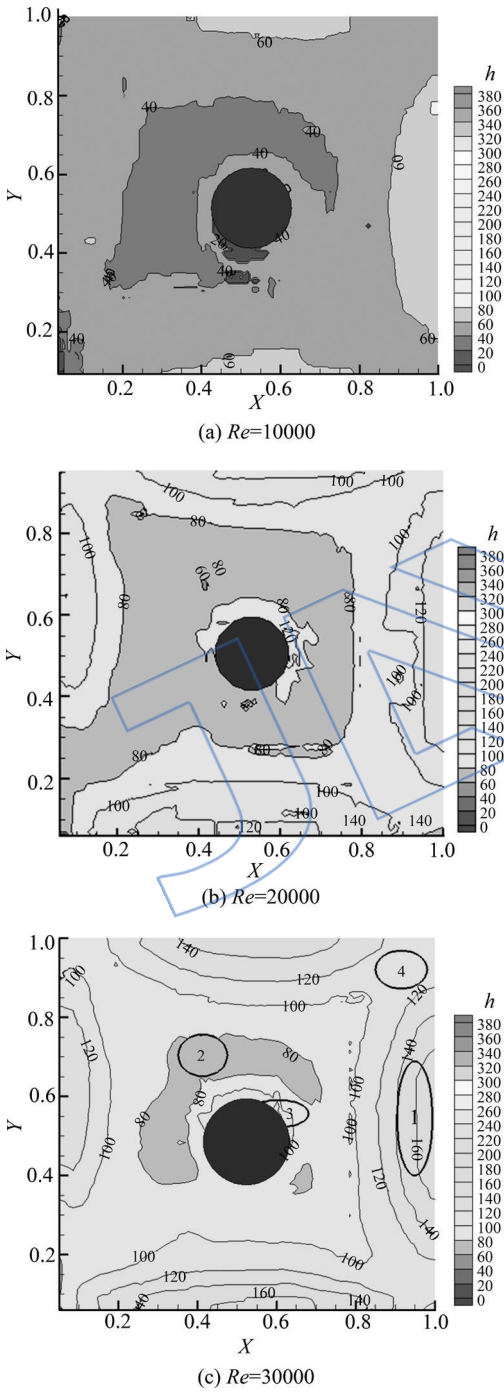


图 6 三种雷诺数 Re 下冲击面传热系数分布云图

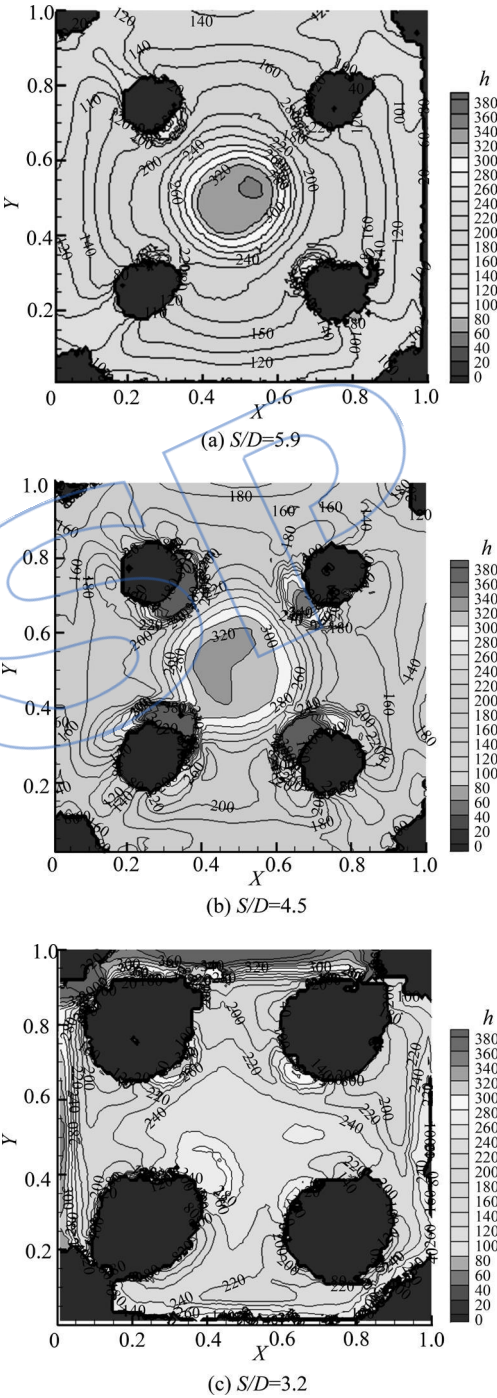


图 7 $Re=20000$ 三种孔间距下靶面传热系数分布云图

Fig.7 $Re=20000$, heat transfer coefficient distribution of target plates at three kinds of S/D

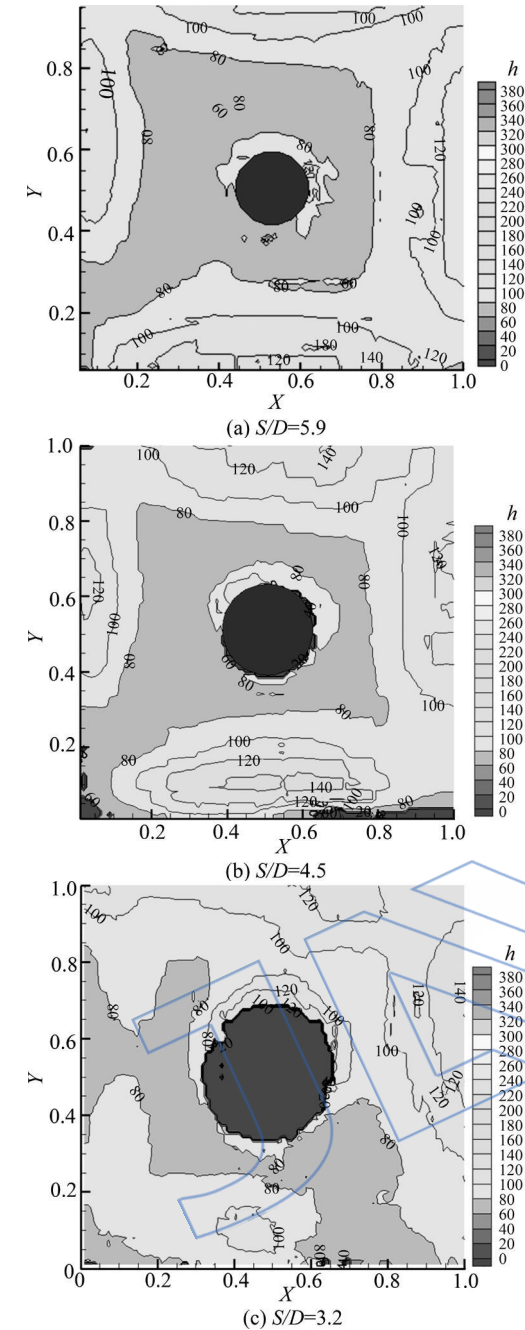


图 8 $Re=20000$ 三种孔间距下冲击面传热系数分布云图

Fig.8 $Re=20000$, heat transfer coefficient distribution of impingement plates at three kinds of S/D

4.4 经验关系式拟合

为了使实验结果对进一步科学研究或者工程应用有一定参考价值,我们对实验数据进行了数学拟合,形式为常见的指数形式.选取无量纲量 Nu 为因变量, Nu 的定义为 $Nu=(hD)/\lambda$, 其中 h 为传热系数, D 亦为冲击孔径, λ 为流体的导热系数;自变量选取 2 个无量纲量,分别为冲击雷诺数

Re 、孔间距与冲击孔径比 S/D ; (其他几何参数与本实验件尺寸对应).

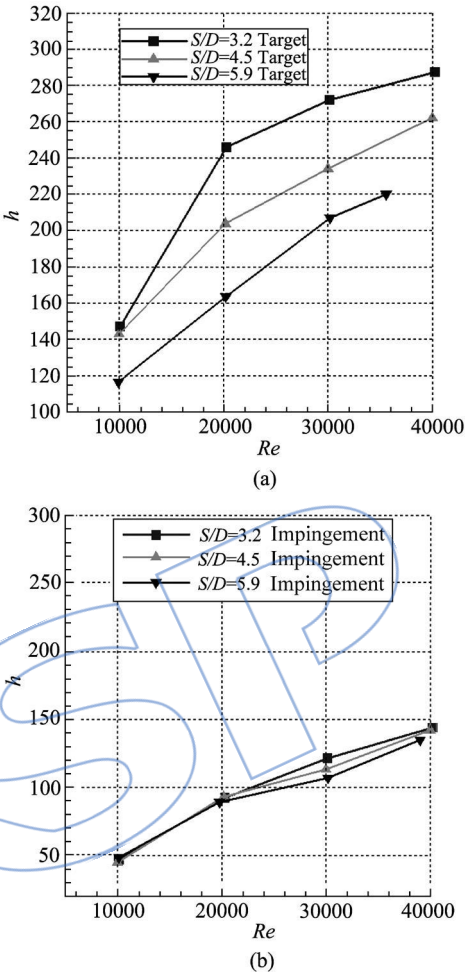


图 9 靶面与冲击面平均换热系数 h 随 Re 变化趋势图

Fig.9 Effect of Re on average h of target and impingement plates

靶面和冲击面的换热经验关系式分别为

$$Nu = 2.48Re^{0.46}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.74} \quad (\text{靶面})$$

$$Nu = 0.065Re^{0.71}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.52} \quad (\text{冲击面})$$

其中该经验关系式适用范围为:冲击雷诺数 $Re=10\,000\sim 40\,000$;孔间距与冲击孔径比 $S/D=3.2\sim 5.9$.

从经验关系式中亦可以看出各个参数对换热的影响趋势与权重,此处不再重述.为了进一步直观显示拟合曲线与实验点的符合情况,图 10 给出了其中一工况中实验点与经验关系式函数之间的关系图像,可以看出曲线拟合的比较理想.

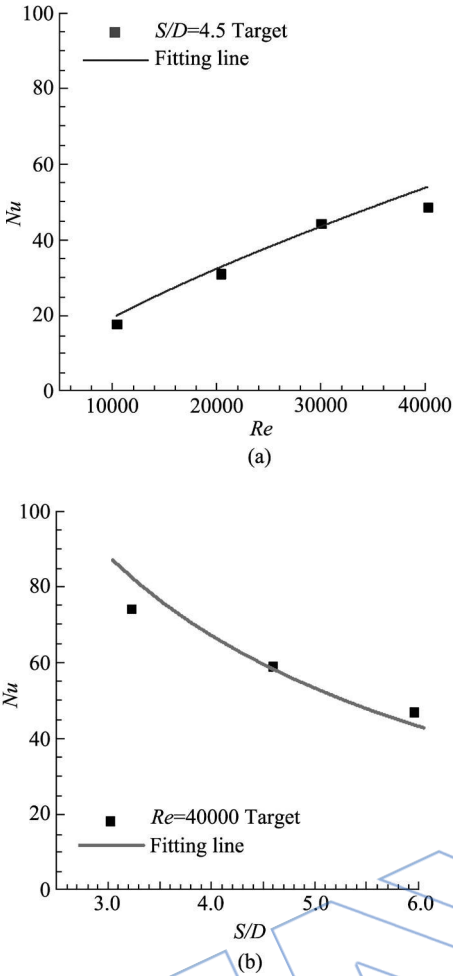


图 10 拟合函数曲线与实验点关系图
Fig 10 Relationship of fitting line and experimental points

5 结 论

通过对针板换热特性的实验结果分析, 得到如下结论:

- 1) 针板结构靶面与传统层板结构靶面的换热机理及强度基本相近, 针板结构冲击面的换热强度要高于传统层板的冲击面。
- 2) 针板内部流动和换热非常复杂, 整个内表面的高传热系数分布区域为冲击驻点处、冲击孔缘, 扰流柱根部, 出气孔附近; 总体来看靶面的换热强度要远高于冲击面。
- 3) 从整理出的经验关系式来看, 针板内表面平均传热系数随着雷诺数增加而增加, 随着孔间距增大而减小。

参考文献:

[1] Nealy D A, Relder S B. Evaluation of laminated porous wall material for combustor liner cooling[J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, 1980, 102: 268-276.

[2] Funazaki K, Tanikawa Y, Kudo T, et al. Heat transfer characteristics of an integrated cooling configuration of ultrahigh temperature turbine blades: experimental and numerical investigations[R]. ASME Paper 2001-GT-0148, 2001.

[3] Yan Y Y, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23: 29-35.

[4] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲, 等. 高效冷却单晶涡轮叶片制造技术的发展[J]. 航空工程与维修, 1998, 232(2): 11-13. GUI Zhonglou, ZHANG Xinhua, ZHONG Zhengang, et al. Manufacture technology development of the single crystal blades and vanes with highly effective cooling[J]. Aviation Engineering and Maintenance, 1998, 232(2): 11-13. (in Chinese)

[5] 郁新华, 全栋梁, 刘松龄. 层板结构冷却有效性的研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 615-622. YU Xinhua, QUAN Dongliang, LIU Songling. Investigation of the cooling effectiveness of lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 615-622. (in Chinese)

[6] 全栋梁, 刘松龄, 李江海. 层板冷却结构强化换热机理[J]. 航空动力学报, 2004, 19(6): 860-865. QUAN Dongliang, LIU Songling, LI Jianghai. Numerical investigation on mechanism of heat transfer augmentation in lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(6): 860-865. (in Chinese)

[7] 陶智, 吕东, 丁水汀, 等. 扰流柱直径对倾斜出气孔层板内流动和换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(4): 540-546. TAO Zhi, LÜ Dong, DING Shuiting, et al. Numerical study on the influences of pin fin diameter on the flow resistance and heat transfer of leaning vent hole lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4): 540-546. (in Chinese)

[8] KONG Manzhao, ZHU Hui ren, LIU Songling, et al. Investigation of internal heat transfer characteristics of lamilloy configurations[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21: 28-34.

[9] Yan Y Y, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23: 29-35.

[10] 孔满昭. 层板内部流动与换热特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2008. KONG Manzhao. Investigation of flow and heat transfer characteristics of inner surfaces of lamilloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008. (in Chinese)