

文章编号:1000-8055(2011)08-1713-06

狭缝间距变化对冲击-多斜孔壁换热特性影响的数值与试验研究

张 勃¹, 李继保², 吉洪湖¹, 尚守堂², 程 明², 王艳丽²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 数值研究了冲击-多斜孔壁复合冷却方式中, 狭缝间距在 $1D^* \sim 4D^*$ (D^* 为当量直径) 范围内变化时对换热特性的影响, 并通过试验研究证明了数值模拟结果的正确性. 研究发现, 狭缝间距变化, 使得冲击射流的发展以及狭缝内的气流抽吸、涡旋的形成受到不同程度的影响, 换热效果随着间距的增大先增大后减小. 研究还发现, 流体微团在狭缝中的流动以平动形式为主, 在多斜孔和冲击孔孔内以及邻近区域表现为明显的转动特征. 微团转动的增强提高了换热效果.

关 键 词: 冲击-多斜孔; 冷却; 狭缝间距; 气流抽吸; 微团转动

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Numerical and experimental investigation on effect of distance between impingement and effusion plates on heat transfer characteristics of impingement-effusion composite cooling

ZHANG Bo¹, LI Ji-bao², JI Hong-hu¹, SHANG Shou-tang²,
CHENG Ming², WANG Yan-li²

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The influence of distance between impingement and effusion plates on heat transfer characteristics of impingement-effusion double wall was investigated numerically, and the validity was experimentally verified. Results show that, with the increase of gap distance, heat transfer characteristics increase firstly, and then decrease. The change of gap distance caused different developments of impinging jet and pumping effects, and also led to different heat transfer effects. It shows that fluid particles move in translational mode in most region, but in rotating mode near effusion hole and impinging hole. The stronger fluid particle rotating causes better heat transfer effect.

Key words: impingement-effusion; cooling; gap distance; pumping effect; fluid particle rotating

收稿日期: 2010-08-04; 修订日期: 2011-02-17

作者简介: 张勃(1976—), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 强化传热、红外隐身.

航空发动机的发展对高温升燃烧室技术提出了进一步要求,温升提高使得组织燃烧用气量不断增加,冷却空气量相应减少,给燃烧室冷却带来了一定的困难^[1-2]. 冲击-多斜孔壁是一种新型复合冷却技术,不同于常规的气膜冷却技术,具有冷却气耗量小,冷却效率高的特点,能够满足高温升燃烧室的壁面冷却要求.

冲击-多斜孔壁由冲击孔壁和多斜孔壁组成,如图1所示. 影响其换热效果的因素包括单一因素和复合因素,单一因素主要指多斜孔壁与冲击孔壁的孔排规律,相关研究比较详实,胡娅萍等^[3]研究发现多斜孔壁加强了冷却气流与多斜孔壁内部的对流换热,换热效果大大提高. Myers等^[4]则指出多斜孔壁增大了气流与壁面的对流换热,与冲击方式联合使用可以进一步强化冷却. Andrew等^[5-6]分别对多斜孔壁不同参数的影响进行了细致研究. 而关于复合因素(主要包括两壁相对位置与相对开孔位置关系)的研究则相对较少,张勃等^[7-8]研究了冲击壁和多斜孔壁开孔面积比和相对开孔位置对换热效果的影响. 林宇震等^[9]研究发现冲击加多斜孔复合冷却方式中,压降分配对多斜孔进口区的换热有较大影响,许全宏等^[10]研究表明多斜孔壁上的倾斜小孔抽吸气流对斜孔周围换热增强有明显的效果.

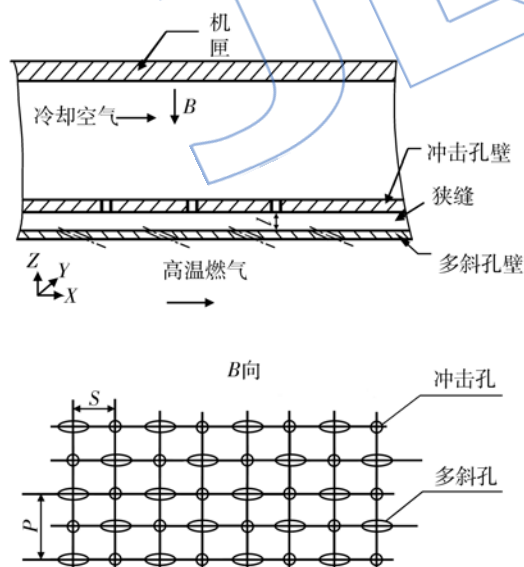


图1 模型多斜孔壁孔排示意图

Fig.1 Scheme of the effusion hole distribution

冲击-多斜孔壁中,冲击孔壁与多斜孔壁狭缝间距大小将对冲击射流的冲击效果以及两壁间气流的流动状态产生明显影响,从而改变换热效果.

本文通过狭缝间距在 $1D^* \sim 4D^*$ 之间的4组冲击多斜孔壁模型,研究了狭缝间距的变化对冲击射流冲击换热效果、流体流动状态的影响.

1 数值计算

1.1 物理模型

本文设计了4种不同多斜孔壁与冲击孔壁间距模型,如图1所示,模型沿流向为X向,展向为Y向,高度方向为Z向,多斜孔、冲击孔均为长菱形分布,孔径均为0.7 mm,孔间距P与孔排距S分别为6 mm和3.5 mm,多斜孔斜角为 20° ,冲击孔垂直壁面,位于两个多斜孔进口中间位置,多斜孔与冲击孔孔数相同. 冲击孔壁与多斜孔壁厚度分别为1.5, 1 mm,长度L为150 mm,宽度W为6.0 mm,如图2(a)所示. 模型参数见表1,冲击壁与多斜孔壁间距分别为 $1D^*$, $2D^*$, $3D^*$, $4D^*$ ($D^* = D_i$, D^* 为当量直径, D_i 为冲击孔直径).

表1 模型参数表

Table 1 Parameter of models

模型号	间距大小
1	$1D^*$
2	$2D^*$
3	$3D^*$
4	$4D^*$

1.2 网格划分

图2(a)中所示为冲击孔与多斜孔(分别如虚线和实线所示)的开孔位置. 图中选取多斜孔壁热侧面上两列孔中间线为特征线,通过同一列孔中心位置、垂直于XOY面的平面为周期面. 图2(b)给出了计算域周期面上局部网格,计算域可以分为冷流区、冲击孔壁、狭缝区、多斜孔壁和热流区,均采用结构化网格. 在流动参数变化剧烈的区域采用变间距网格,靠近壁面处网格加密, Y^+ 在43~87之间,文中利用采用不同网格数的算例(87万, 116万, 130万)进行网格独立性验证,结果证明网格数为116万时取得独立解.

1.3 湍流模型与边界条件

为了与试验结果相比较,算例均采用试验条件为边界条件. 热流的进口温度 $T_g = 735\text{ K}$, 压力 $p_g = 101\,400\text{ Pa}$; 冷气流的进口温度 $T_c = 300\text{ K}$, 压力 $p_c = 105\,000\text{ Pa}$. 热流的出口为环境压力, 冷却流体出口为固体壁面, 冷却流体通过冲击孔、多斜

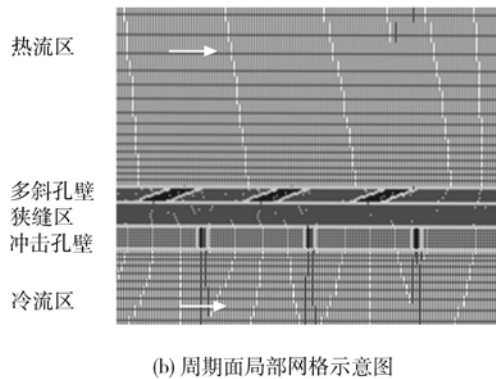
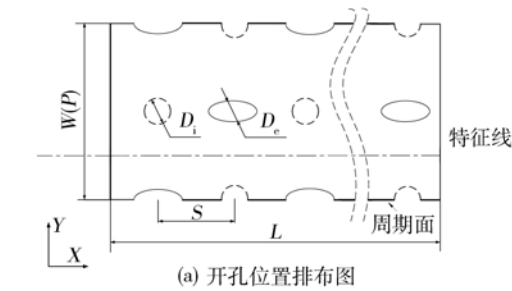


图2 计算网格与孔排形式示意图

Fig. 2 Computing meshes and distribution of impinge and effusion holes

孔后与热流混合,全部从热流出口流出,多斜孔壁与冲击壁两侧壁面以及孔内壁面则为气固耦合面,计算中考虑了流体与固体之间耦合换热。

本文湍流模拟采用 standard $k-\epsilon$ 模型^[13]进行,在近壁区采用壁面函数法进行处理,计算中将热、冷流设为理想流体,方程均采用二阶迎风差分格式进行离散,利用耦合隐式求解器求解,求解过程中实施亚松弛,收敛的判断标准是相对残差小于 1×10^{-5} 。

2 试验模型与试验台架

本文首先对冲击-多斜孔壁的换热特性进行了试验研究。图3、图4分别给出了试验研究中采用的试验件之一与试验段照片,图3中,左侧带有热电偶引线的为多斜孔壁,右侧为冲击孔壁,两者装配后得到本文的试验件,图4则为试验台架总体照片,椭圆框内所示为试验段,试验段上方为采集温度场数据的红外热像仪,其温度采用热电偶进行标定。试验中只能得到多斜孔壁热侧的温度分布特性,无法获得其内部详细的流动特征分布。为了深入研究引起其换热特性变化的内在原因,本文在与试验进出口条件相同的条件下进行了数值研究,其结果为试验结果的有效补充与深化。

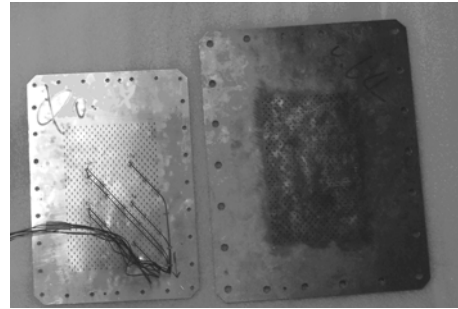


图3 冲击多斜孔壁试验件

Fig. 3 Photo of experimental model



图4 试验台总体照片

Fig. 4 Photo of experimental rig

3 结果与分析

3.1 冲击孔壁与多斜孔壁狭缝间气流速度矢量分布

图5中给出了模型1,2,3,4狭缝内的气流速度矢量分布,各图中矢量长度比例相同。模型1(图5(a))中,其狭缝间距仅为 $1D^*$,射流冲击到壁面时依然处于核心区范围内,射流扩散较小,使得高效换热的冲击靶区较小。同时,较小的狭缝间距使得流体涡旋的发展受到限制,削弱了流体与壁面之间的热量交换。

图5(b)中,狭缝间距增大至 $2D^*$,冲击射流得到一定的发展,在狭缝间,冲击孔射流流出后,在冲击孔两侧形成低压区,吸引周围流体汇集,形成了高湍流度的涡旋分布,与相邻射流之间掺混增强,提高了换热效果。图5(c),(d)中,狭缝间距增大至 $3D^*$, $4D^*$,冲击射流得到继续发展,冲击能力加强,同时,冲击孔两侧的低压区增大。相比之下,模型4中涡旋强度略小于模型3,掺混有所减弱。

可以看出,冲击孔上游形成了逆时针涡旋,流体在多斜孔抽吸作用下,流入上游的多斜孔,而冲击孔下游涡旋则为顺时针方向,与多斜孔抽吸形成的流体流动方向相反。

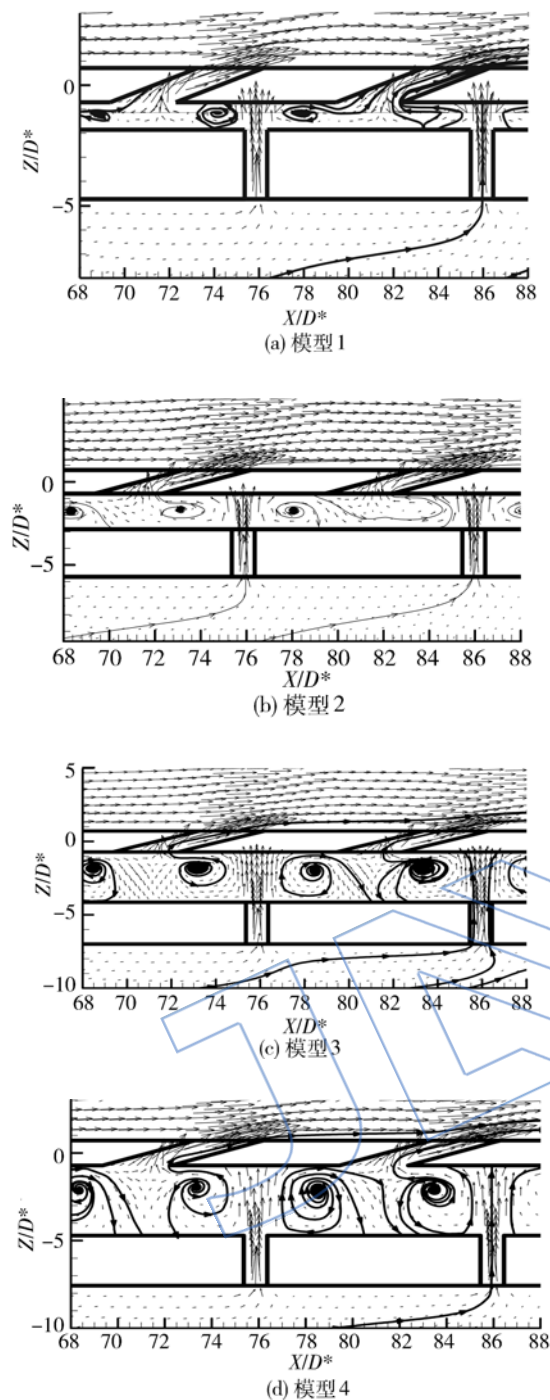


图5 不同模型狭缝局部速度矢量分布

Fig. 5 Distribution of local velocity in the gaps

冲击孔壁与多斜孔壁之间狭缝间距的大小会影响冲击射流的发展状态,其影响随间距大小并非单调变化,适当的狭缝间距大小会使得冲击射流得到必要发展,射流之间的掺混得到增强。

3.2 冲击壁与多斜孔壁狭缝间气流涡量分布

冲击-多斜孔壁中,狭缝中流动复杂,使得流体微团的运动规律发生一定变化,本文中定义XZ平面上微团涡量 $\omega_y = -\frac{1}{2}(\partial V_z / \partial X -$

$\partial V_x / \partial Z)$, 正值表示微团逆时针转动,负值表示顺时针转动。

图6中以模型1(图6(a))和模型4(图6(b))为代表,给出了周期面上局部区域内涡量分布。可以看出,在热流区、狭缝区和冷流区(含义参见图2(b)),涡量较小,流体微团运动以平动为主。而在多斜孔、冲击孔孔内以及孔进、出口附近,流通面积的变化使得流体微团的运动呈现出明显的转动特征。模型4(图6(b))中在多斜孔进、出口和冲击孔进、出口区域的涡量大于模型1(图6(a))。在多斜孔与冲击孔进口处,上游附近涡量为正,微团逆时针转动,气流不易形成附壁,下游附近,微团则呈顺时针转动,容易形成附壁;在孔出口处,也有相同规律。结合图5中速度矢量分布可以看出,狭缝中气流涡旋的发展状态、影响区域与微团涡量分布、数值大小有密切联系。

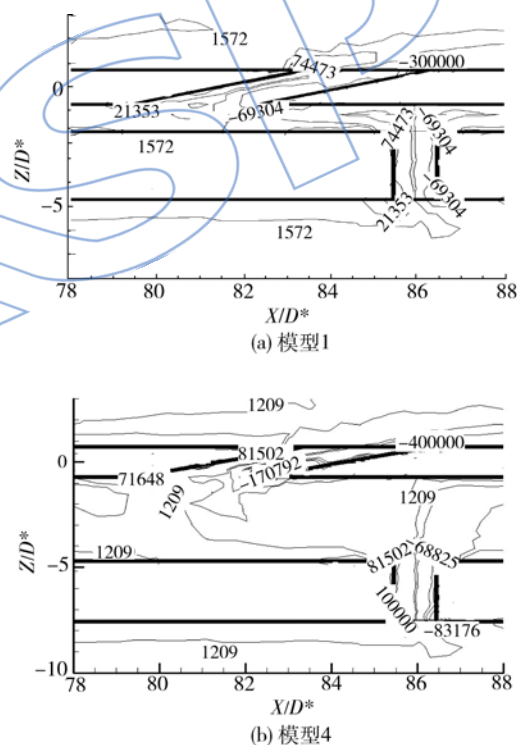


图6 不同模型狭缝局部涡量分布

Fig. 6 Distribution of local eddy in the gaps

3.3 多斜孔壁热侧壁面温度分布

图7给出了模型1,2,3,4多斜孔壁热侧壁面温度和等值线分布。可以看出,进口附近壁面温度较高,等值线密集,沿X方向温度梯度较大,这是由于此处尚没有形成气膜覆盖,热流掠过对其加热导致的。温度等值线在两列多斜孔之间区域略向下游弯曲,说明此处壁面温度略高于多斜孔下

游区域。

随着 X 的增大,气膜覆盖逐渐形成,壁面温度和沿 X 方向的温度梯度逐渐减小。模型 1,2,4 中,壁面前段温度均较高,温度梯度较大,而模型 3 中,壁面前段温度较低,对应区域的温度梯度较低,这是模型狭缝间距变化使得前端气流流动特征发生变化造成的。

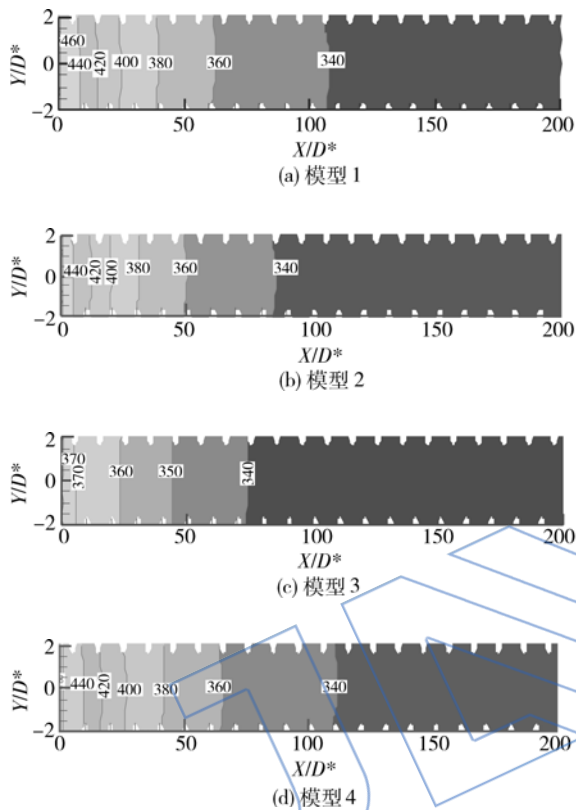


图 7 不同狭缝间距模型热侧壁面温度分布
Fig. 7 Distribution of local temperature on hot side of different models

3.4 试验与数值模拟结果比较

文中利用图 4 中给出的试验设备对模型(图 3)进行了试验研究。图 8 中对试验和数值模拟得到的多斜孔壁热侧中心线上的温度分布进行了比较。由于试验中壁面前端存在轴向导热,使得对应位置温度较低,数值模拟与试验得到的温度曲线变化趋势相同,模型后端最大误差为 10.1%,满足计算精度要求,说明数值模拟结果可靠,可以作为试验结果的有效补充,用以对其内部流动与换热特性进行解释。

3.5 有效温比分布

图 9 中给出了本文研究的模型中多斜孔壁热侧面有效温比 $\eta_{\text{eff}} = (T_g - T_{\text{wg}})/(T_g - T_c)$ 沿流

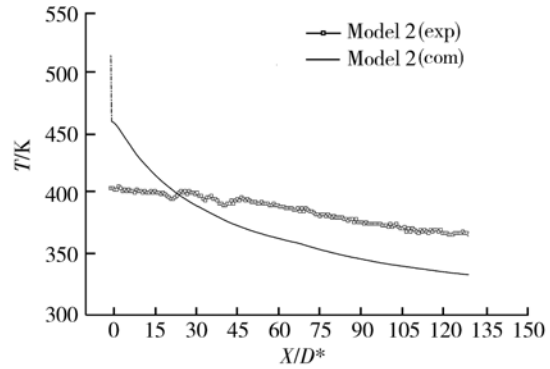


图 8 多斜孔壁热侧中心线上温度分布比较
Fig. 8 Comparison of centreline temperature on the hot side of effusion wall

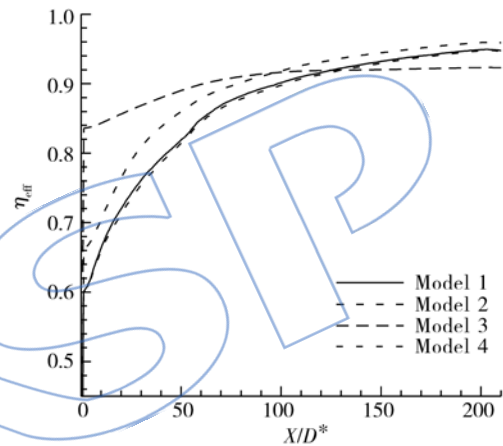


图 9 不同狭缝间距模型热侧有效温比分布
Fig. 9 Effective efficiency distribution on the hot side of different models

向分布。式中 T_{wg} 为热侧壁面局部壁温, T_g, T_c 分别为热流与冷流温度。在模型前端,气膜覆盖没有形成,有效温比较小,在第一排气膜孔附近,有效温比迅速上升,而后气膜随着轴向距离 X 的增大不断叠加,而增大幅度逐渐减小,与 Sellers^[12] 总结的有效温比公式吻合。模型 1,4 中,有效温比曲线基本一致,而模型 2 的有效温比曲线形状与模型 1,4 相同,但量值明显提高。模型 3 中,有效温比在模型前端达到 0.84,显著好于其他模型,但是随着轴向距离增大,增大速度较小,使得后端的有效温比略低。不同模型中有效温比随狭缝间距增大先增大后减小,与壁面温度分布规律相吻合。

3.6 传热系数沿程分布

为了研究狭缝间距大小对冲击冷却效果的影响,文中对不同模型多斜孔壁冷侧壁面的传热系数进行了研究。图 10 中给出了各个模型多斜孔壁冷侧壁面传热系数, $h_c = q/(T_{\text{wc}} - T_f)$ (q 为单

面积热流量(W/m^2), T_{wc} 为多斜孔壁冷侧局部壁温, T_i 为参考温度, 文中取为 300 K)沿流向的分布图. 可以看出, 传热系数 h_c 呈现出多峰分布的特点, 冲击靶区附近的传热系数较高, 与冷侧的多股冲击射流的特征吻合.

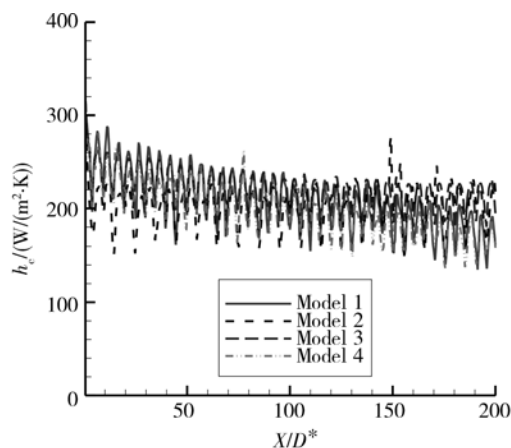


图 10 多斜孔壁冷侧传热系数比较

Fig. 10 Distribution of heat transfer efficiency on the cold side wall of different models

模型 2, 3 中传热系数沿轴向小幅波动, 量值变化较小; 而在模型 1, 4 中, 壁面前端传热系数较大, 高于模型 2, 3, 沿轴向逐渐下降, 在模型末端略小于模型 2, 3. 这一结果与温度、有效温比分布是吻合的.

4 结 论

本文对不同狭缝间距条件($1D^* \sim 4D^*$)下的 4 种冲击-多斜孔壁模型的换热特性进行了数值与试验研究, 得到如下结论:

1) 冲击孔壁与多斜孔壁狭缝中冲击射流的发展随狭缝间距的增大不是单调变化, 适合的间距大小能够使得射流得到必要的发展, 增强冲击效果, 强化换热;

2) 冲击孔壁与多斜孔壁狭缝中冲击射流之间的掺混随狭缝间距的增大不是单调变化, 适合的间距大小能够使得射流之间的掺混增强, 促进涡旋形成, 强化换热;

3) 冲击孔壁与多斜孔壁复合冷却中, 狭缝中流体微团主要以平动为主, 在多斜孔与冲击孔孔内与进、出口附近表现为明显的转动特征, 流体微团自转的增强使得换热得到强化.

参考文献:

[1] Mellor A M. Design of modern gas turbine combustor

[M]. New York: Academic Press, 1990.

- [2] 李继保, 胡正义. 高温升高热容燃烧室设计技术分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(4): 5-8.
- [3] 胡娅萍, 吉洪湖. 孔阵排列疏密度对致密多斜孔壁冷却效果的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(1): 28-33.
- HU Yaping, JI Honghu. Effect of porosity of holes array on cooling effectiveness of effusion cooling[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(1): 28-33. (in Chinese)
- [4] Myers G, Geest J V D. Comparison of advanced cooling concepts using color thermography[R]. AIAA 85-1289, 1985.
- [5] Andrews G E, Asere A A. Full coverage discrete hole film cooling; the influence of the number of holes and pressure loss[R]. ASME 90-GT-61, 1990.
- [6] Andrews G E, Bazdidi-Tehrani F. Small diameter film cooling heat transfer; the influence of the holes length[R]. ASME 91-GT-344, 1991.
- [7] 张勃, 李继保, 吉洪湖. 开孔面积比对冲击-多斜孔壁复合冷却形式冷却特性影响的数值模拟研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2235-2240.
- ZHANG Bo, LI Jibao, JI Honghu. Effect of area ratio of impingement hole to effusion hole on heat transfer characteristics of impingement-effusion composite cooling[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2235-2240. (in Chinese)
- [8] 张勃, 李继保, 吉洪湖. 冲击多斜孔壁中冲击孔与多斜孔相对开孔位置对换热特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(1): 25-29.
- ZHANG Bo, LI Jibao, JI Honghu. Effect of relative position of impinging hole to effusion hole on heat transfer characteristics of impinging/effusion composite cooling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 43(1): 25-29. (in Chinese)
- [9] 林宇震, 俞文利, 刘高恩, 等. 冲击加发散双层壁冷却方式压降分配对斜孔内对流换热影响的研究[J]. 航空学报, 2003, 24(2): 97-101.
- LIN Yuzhen, YU Wenli, LIU Gaoen, et al. Influence of pressure drop distribution on the convection heat transfer inside the inclined hole of impingement/effusion cooling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(2): 97-101. (in Chinese)
- [10] 许全宏, 林宇震, 刘高恩. 冲击加多斜孔双层壁冷却方式冲击传热系数[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 63-66.
- XU Quanhong, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Heat transfer coefficient of impingement/effusion double wall cooling method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(1): 63-66. (in Chinese)
- [11] Gerendas M, Hoeschler K, Schilling T. Development and modeling of angled effusion cooling for the BR715 low emission staged combustor core demonstrator[R]. ADA419282, 2001.
- [12] Sellers J P, Jr. Gaseous film cooling with multiple injection stations[J]. AIAA Journal, 1963, 1(9): 2154-2156.