

文章编号: 1000-8055(2007)09-1430-05

密度差和速度比对单排孔气膜冷却效率的影响

李 丽, 彭晓峰, 王补宣

(清华大学 热能工程系 相变及界面传递实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用传热传质类比的方法研究主射流密度差和速度比对单排孔平板气膜冷却效率的影响. 密度比为1时射流为空气, 密度比为1.5和2.0射流为异质气体, 射流与主流的夹角为 35° , 孔间距为3倍的气膜孔直径. 结果表明: 当速度比较小时, 射流在被保护壁面上的铺展由扩散控制; 当速度比较大时, 铺展由对流控制. 在较低速度比条件下, 随着吹风比的增大, 横向和纵向的铺展都增加, 有效保护范围面积增加; 高速度比条件下, 射流的再附点随着动量比的增大而更向下游.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 气膜冷却; 传热传质类比; 绝热温比

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Influence of density ratio and velocity ratio upon the cooling effect of flat panel film

LI Li, PENG Xiao feng, WANG Bu xuan

(Laboratory of Phasechange and Interfacial Transport Phenomena,

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An investigation was conducted to explore the influence of density ratio and velocity ratio of mainstream/injectant upon the cooling effect of flat plane film using heat mass transfer analogy. The injectant is air in the case of density ratio of 1.0, or heterogeneous gas in the case of density ratio of 1.5 and 2.0. The inclined angle between injectant and mainstream is 35° and the hole spacing is 3 times film hole diameter. The results indicate that, the spreading of injectant is controlled through the protected wall surface for a low velocity ratio, and controlled by convection for a high velocity ratio. With the increase of mass flux ratio, the transverse and longitudinal spreading could be expanded, thus increasing effectively the protective range; the reattachment point will move towards the downstream with the increase of momentum ratio under high velocity ratio.

Key words: aerospace propulsion system; film cooling; heat mass transfer analogy; adiabatic film effectiveness

气膜冷却技术应解决航空发动机中燃烧室、涡轮叶片等部件温度过高问题而提出并迅速发展, 主要原理是在壁面附近沿切线方向或用一定的入射角射入一股冷却空气, 在高温气体与壁面之间形成冷气膜, 把二者隔离开, 避免高温气流对

壁面的直接冲击加热. 一直以来以实验和数值的研究都表明, 气膜冷却是众多的航空发动机部件冷却方式中比较简单有效的一种, 其应用也扩展到其它很多领域^[1].

影响气膜冷却的因素很多, 一般来说可以大

收稿日期: 2006-08-24; 修订日期: 2006-12-10

作者简介: 李丽(1978), 女, 河南汝南人, 博士生, 主要从事高效冷却方式的换热研究.

表 1 计算工况
Table 1 Computing cases

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
VR	0.195	0.195	0.195	0.292	0.39	0.707	1.0	1.0	1.0	1.333	1.414	1.633	1.885
DR	1.0	1.5	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	1.5
M	0.195	0.292	0.39	0.292	0.39	1.414	1.0	1.5	2.0	2.0	2.828	2.449	2.828
I	0.038	0.057	0.076	0.085	0.152	1.0	1.0	1.5	2.0	2.666	4.0	4.0	5.332

致分为两大类: (1) 几何因素, 包括气孔形状、气孔排列方式、开孔数目、喷射角、主射流通道结构等; (2) 主射流流动条件, 主射流流动条件中, 射流和主流的速度比 $VR=U_j/U_m$ 及和密度比 $DR=\rho_j/\rho_m$ 尤为重要, 这两个量通常又归结为吹风比 $M=\rho U_j/\rho_m U_m$ 和动量比 $I=\rho U_j^2/\rho_m U_m^2$ 等. 其中 U_j 是射流的速度, U_m 是主流的速度, ρ_j 是射流的密度, ρ_m 是主流的密度.

在气膜冷却中通常采用绝热温比来表示气膜的冷却能力, 定义如下

$$\eta = (T_{aw} - T_m)/(T_j - T_m)$$

式中 T_{aw} 是有气膜冷却的绝热壁面温度, T_m 是主流温度, T_j 是射流温度. 但是实验中绝热条件很难保证, 采用密度差的研究方法, 不但可以在避免非绝热条件引起的测量误差的情况下模拟大温差工况下的流动和换热, 而且使用异质气体作为示踪气体, 测量示踪气体分布就可以获得相应的流动和换热数据. 根据传热传质理论^[2], 在保证相似条件的前提下, 有 $\eta = (C_{aw} - C_m)/(C_j - C_m)$. 式中 C_{aw} 表示壁面上异质气体的质量浓度, C_m 为主流中异质气体的质量浓度, C_j 为射流中异质气体的质量浓度. 当主流和射流为完全不同的工质时, $C_m = 0$, 可以认为冷却效率 $\eta = C_{aw}$. 过去的传热传质类比研究^[3-6] 多为实验研究, 而且受测量手段的限制, 研究者多从壁面中心线的效率分布研究, 很少考虑各参数对射流宽度和整体分布的影响.

本文进行传热传质类比计算, 射流分别为空气和异质气体二氧化碳, 从射流的纵向扩展和横向扩展研究速度比和密度比的影响, 综合考虑在被保护壁面的二维冷却效率分布规律及有效保护面积.

1 物理模型及初边值条件

图 1 和 2 为计算几何模型和孔结构示意图, 计算区域分为气膜孔和主通道两部分, 与气膜孔出口相连的主通道下壁面为被保护壁面. 气膜孔为圆柱孔, 其直径 $D=1.5\text{ mm}$, 长度 $L=4D$, 与主

流方向的夹角 $\alpha=35^\circ$, 气膜孔出口的中心位于坐标原点, 主通道高度为 $H=8D$, 横向(y 向) 计算范围 $-1.5D\sim 1.5D$, 纵向(x 向) 计算范围 $-20D\sim 40D$.

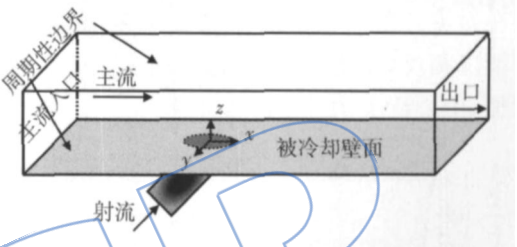


图 1 计算几何模型

Fig. 1 Scheme of computational domain

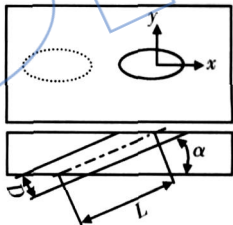


图 2 孔的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hole geometries

主流和射流进口均为速度进口边界条件. 主流进口工质为空气, 温度 $T_m=273\text{ K}$, 速度 $U_m=15.4\text{ m/s}$; 射流工质为空气或异质气体, 速度和温度根据表 1 中的计算工况而定, 出口给定为压力出口条件, 主通道两侧壁面为周期性边界条件.

2 结果及分析

2.1 沿中心线的效率分布

图 3 为壁面中心线的冷却效率分布与 Pedersen 等^[4] 传热传质类比实验结果的对比. 计算和实验的值差别在 5% 以内, 但计算值略低于实验值, 这和文献[7]中的情况相似, 原因可能在于计算使用的孔径比远小于实验值, 射流和主流夹角较小的情况, 由于气膜孔出口下游低动量区和上游喷射的影响, 短孔的效率要低于长孔. 当速度比较低时(图 3(a)), 射流动量较小, 被主流压迫向

壁面被铺展,壁面中心线的冷却效率随着 x 距离的增大平缓降低,大约在 $x=10D$ 处达到 0.2;随着密度比增大,横向扩散减小,射流/主射流的混合气更容易向下游运动,中心线上的相同 x 处的冷却效率也增大.速度比较高的情况(图 3(b)),主射流密度相同时,虽然抬升力使射流中心偏离壁面,但是射流柱没有脱离壁面,仍然可以在壁面上形成保护,壁面中心线上的无量纲温度或浓度分布随着 x 的增大很快降低,大约在 $x=5D$ 处达到 0.2,此后随着 x 的增大,冷却效率变化很小;密度比大,射流先脱离壁面,在下游处再附,表现在气膜孔出口下游的冷却效率先升高后降低,只在射流孔附近很小的区域有覆盖,和低速度比的情况相反,密度比增大,射流向主流的渗透的量增加,中心线上的效率降低很多.

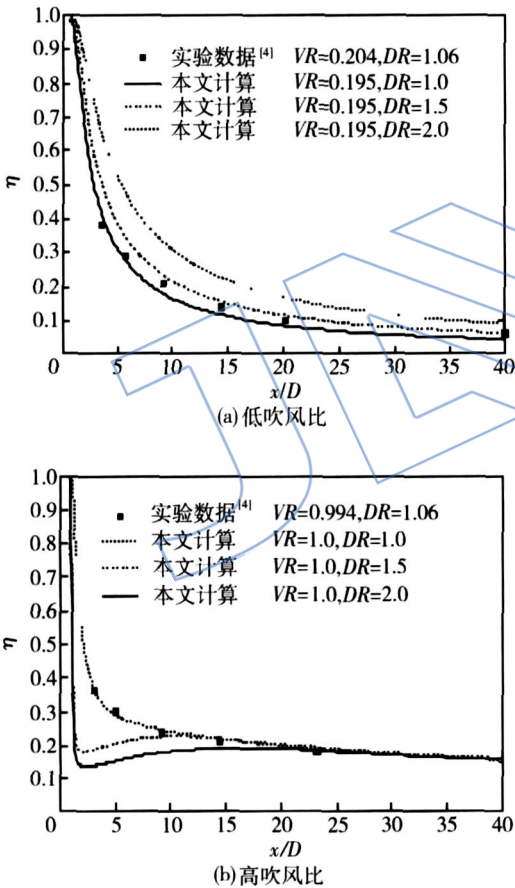


图 3 计算和实验结果的对比

Fig. 3 Comparison of cooling effectiveness with test result

由上可知,可控的参数中,速度比不能作为衡量射流在纵向扩展程度的特征量.下面考察吹风比用来衡量气膜冷却的能力.图 4(a)为在低吹风比条件下效率分布,相同吹风比的工况,中心线的效率分布几乎相同,随着吹风比增大,效率增大,

向下游更远处扩展,可以认为纵向扩展主要由吹风比控制.而中高吹风比条件下,图 4(b),沿中心线的效率分布不再由吹风比控制,即使吹风比相同,沿中心线的效率附壁也不同,速度比增大,再附出现的位置越向下游方向.

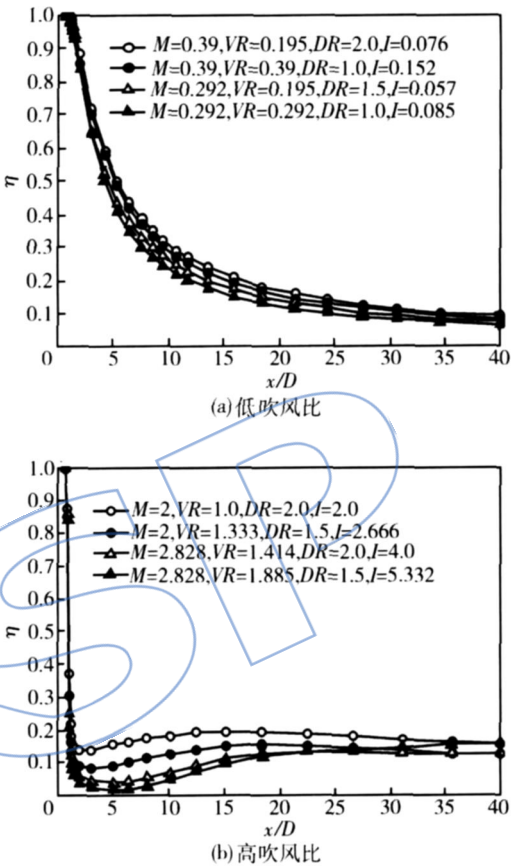


图 4 吹风比对中心线效率的影响

Fig. 4 Effect of blow ratio on center line effectiveness

图 5 给出较动量比下的中心线效率分布,当动量比较高时($I=4$),动量相等,沿中心线的效率分布基本相同,纵向扩展主要由动量比控制,这时射流被抬离壁面,在下游较远区,射流发生再附现象.而当 $I=1$ 时,动量相等,效率沿中心线的分布并不相同,流动和扩散相互竞争,使得密度比较小时类似低速度比的情况,密度比较大时类似高速度的情况.

2.2 横向效率分布

虽然图 6(a)中的分析表明,相同吹风比下的沿中心线的效率分布基本相同,但横向效率分布并不一致,密度比较大的横向扩展稍大,越向下游,密度差引起的横向扩展差异越大.随着吹风比的增大, $\eta > 0.2$ 的宽度也有所增加.

中等速度比条件下(图 7),横向铺展比较窄,但还是能形成有效保护.高速度比下,相同动量比

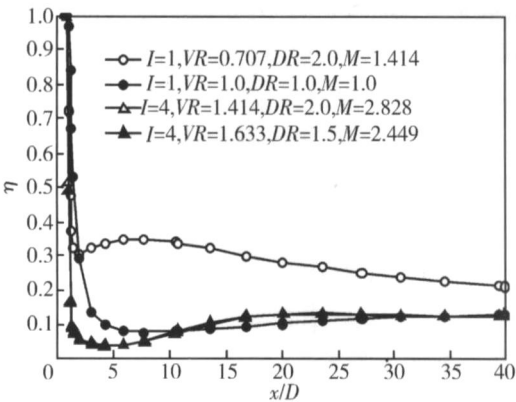


图 5 动量对中心线效率的影响

Fig.5 Effect of momentum ratio on center-line effectiveness

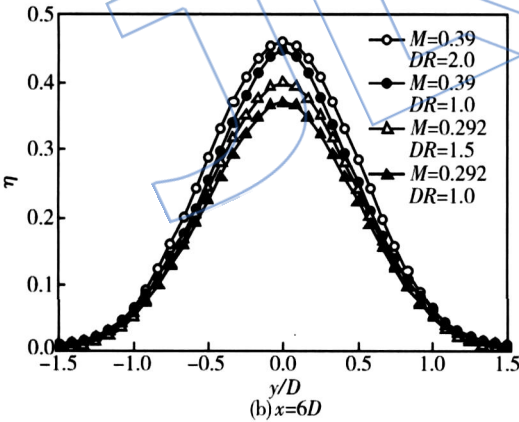
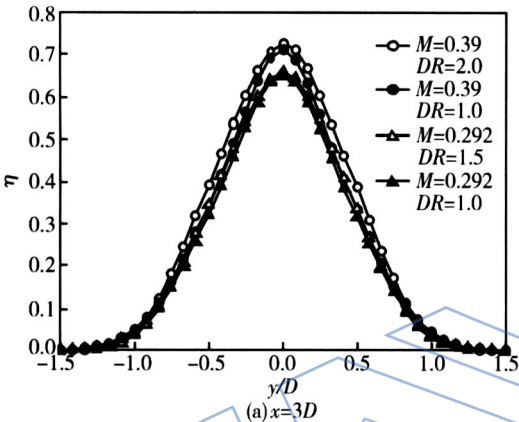


图 6 吹风比对横向效率的影响

Fig.6 Effect of blow ratio on lateral effectiveness

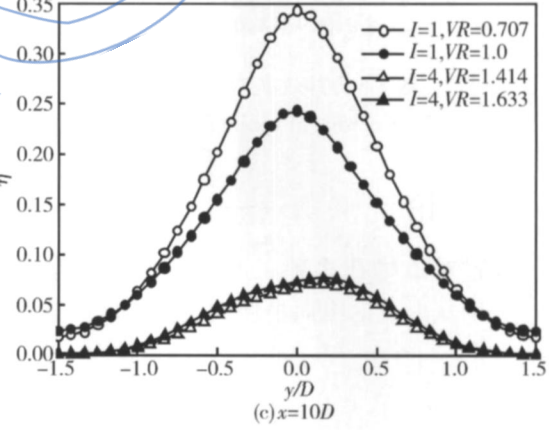
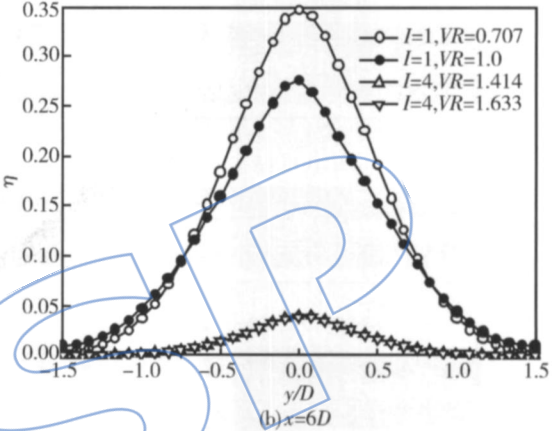
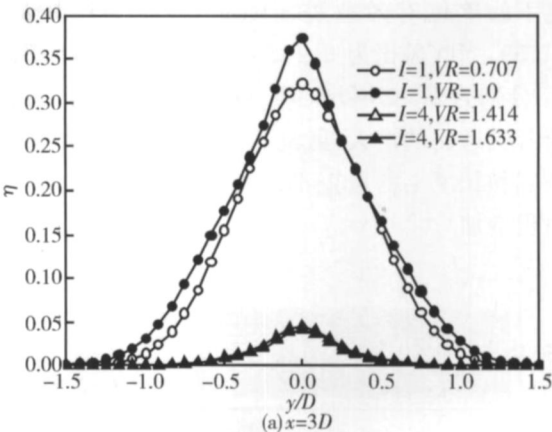


图 7 动量比对横向效率的影响

Fig.7 Effect of momentum ratio on laterally effectiveness

的情况下,宽度方向上分布也基本相同,可以认为其流动完全由动量控制,比较不同位置的横向效率,最大值先减小后增大,射流完全脱离壁面,然后再附,但是冷却效率远小于 0.2.

2.3 壁面上的二维温度分布及有效覆盖面积

定义有效覆盖面积 a_f 为冷却效率 η 大于一定值的区域(本文取 0.2),有效覆盖面积和射流孔出口面积 a_{he} 相比得到无量纲值 A_f ,即 $A_f = a_f/a_{he}$

a_{he} ,其意义为被冷却壁面上单位开口面积对应的有效覆盖区域.

通过 2.1 和 2.2 的分析知,当速度比较大时,射流被抬离壁面,只在射流孔附近有覆盖,面积很小,基本起不到保护壁面的作用,中等速度比,虽然纵向扩展较大,但是横向扩展很小,所以不考虑这两种情况下的覆盖.

图 8 为低速度比条件下壁面的有效冷却效率二维分布等值线.当吹风比为 0.39 时,两种密度

比下的单位有效覆盖面积 A_r 分别为 13.43 和 11.59, 当吹风比为 0.292 时, 单位有效覆盖面积 A_r 分别为 10.07 和 8.79. 可见当低速度较小时, 随着吹风比的增大, 射流的质量流量越大, 射流在宽度和长度上的覆盖都有所增加, 单位有效覆盖面积增加.

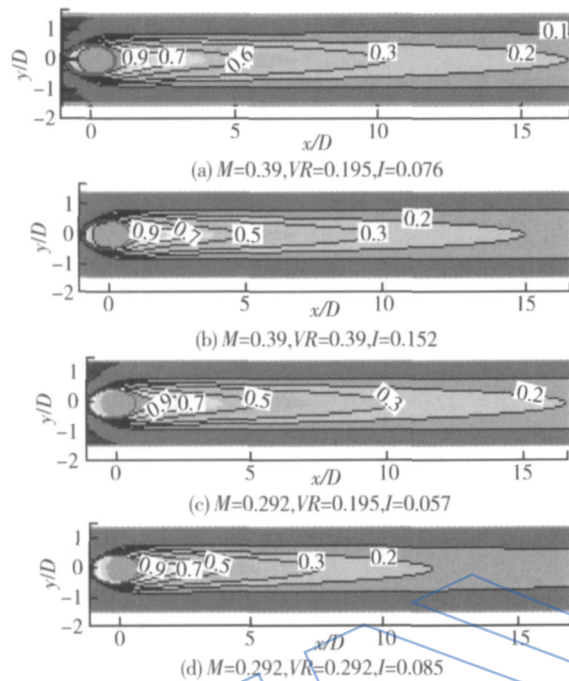


图 8 冷却效率等值线分布

Fig 8 Contour of cooling effectiveness

3 结 论

通过对单排孔多种工况的传热传质类比计算, 分别从射流的纵向扩展和横向扩展研究流动

参数的影响, 并综合考虑在被保护壁面的二维冷却效率分布规律及有效保护面积. 得到以下一些认识:

- (1) 当速度比较小时, 冷却效率分布由射流的质量百分比控制, 扩散作用占主导, 随着吹风比的增大, 射流的质量流量越大, 射流在宽度和长度上的扩展都有所增加, 有效保护范围面积增加.
- (2) 当速度比较大时, 冷却效率分布由流动控制, 对流占主导, 射流脱离壁面, 并在下游处发生再附, 动量比越大, 再附的位置越向下游.
- (3) 中等速度比时, 冷却效率分布由流动和扩散共同控制.

参考文献:

[1] 葛绍岩, 刘登瀛, 徐靖中, 等. 气膜冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

[2] Eckert E R G. Analogies to heat transfer processes[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corp. 1986.

[3] Goldstein R J, Eckert E R G. Effects of hole geometry and density on three dimensional film cooling[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1974, 17: 595-606.

[4] Pedersen D R, Eckert E R G, Goldstein R J. Film cooling with large density difference between the mainstream and the secondary fluid measured by the heat-mass transfer analogy[J]. J. Heat Transfer, Transaction of ASME, 1977, 4(99): 620-627.

[5] Ammari H D, Hay N, Lam par d D. The effect of density ratio on the heat transfer coefficient from a film cooled flat plate[J]. J. Turbomachin, 1990, 112: 444-450.

[6] Leontiev A I. Heat and mass transfer problems for film cooling[J]. J. Heat Transfer, 1999, 121(33): 509-527.

[7] Hale C A, Plesniak M W, Ramadhyani S. Film cooling effectiveness for short film cooling holes fed by a narrow plenum[J]. J. Turbomachin, 2000, 122: 553-557.