

文章编号: 1000-8055(2009)01-0018-07

# 发散孔纵向波纹隔热屏气膜冷却特性

唐 婵<sup>1</sup>, 常海萍<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院 能源与动力工程学院, 南京 211167

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 对燃烧室内开有发散孔的纵向波纹隔热屏进行了数值模拟. 研究隔热屏的四种结构参数开孔率、波纹板高度、孔径和冷却通道高度的改变对隔热屏冷却效果的影响. 研究表明: 在气膜孔出流总量相同的情况下, 3% 开孔率比 6% 开孔率的隔热屏平均冷却效率较高; 波纹板高度对隔热屏冷却效果影响较大, 波纹板无量纲高度为 1% 比波纹板无量纲高度为 2% 和 3.33% 的隔热屏平均冷却效率高; 孔径和冷却通道高度的改变对隔热屏冷却效果几乎没有影响.

**关 键 词:** 波纹隔热屏; 冷却效率; 气膜冷却; 数值模拟; 发散孔

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

## Numerical simulation of effusion holes on the longitudinal ripple heat shield

TANG Chan<sup>1</sup>, CHANG Hai ping<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

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

**Abstract:** The numerical simulation was used to study the effusion holes on the longitudinal wavy liner in the combustor. The investigation focused on the parameters affecting cooling effectiveness, including: opening ratio, height of ripple board, diameter of holes and height of cooling passage. Given the same total flow effusion from holes, the results show that the heat shield gets a higher average cooling effectiveness when the opening ratio is 3% compared with 6%; cooling effectiveness is sensitive to the height of ripple board, the heat shield gets the highest cooling effectiveness when the dimensionless height of ripple board is 1% compared with 2% and 3.33%; but there is a little influence on the cooling effectiveness of the liner with the change of the diameter of holes and the height of cooling passage.

**Key words:** wavy liner; cooling effectiveness; film cooling; numerical simulation; effusion hole

隔热屏在燃烧室简体中直接接触高温燃气, 工作温度很高, 要保持稳定的几何形状必须有良好的冷却隔热性能. 隔热屏的多孔结构, 可以有效的防止高温热端部件如燃烧室的过热和振荡燃

烧. 隔热屏有圆筒、横向波纹板、纵向波纹板等结构形式. 与圆筒及横向波纹板结构相比, 纵向波纹板结构存在如下优势: 冷却通道的波动产生的湍流扰动可增强对流换热; 隔热屏迎风面上的气膜

收稿日期: 2007-11-21; 修订日期: 2008-05-19

作者简介: 唐婵(1982-), 女, 湖南邵阳人, 助教, 硕士, 主要从事传热学方面的研究.

孔可借助动压出气强化溢流换热; 隔热屏内壁面形成气膜可以相对稳定地驻留在纵向波纹板的波谷(即靠近燃烧室筒体处), 有效地防止了燃气对隔热屏的热冲蚀, 对隔热屏及燃烧室筒体起到了很好的保护作用. 国内、外都开展了对纵向波纹隔热屏的部分研究<sup>[1-6]</sup>, 但是均未讨论结构参数对隔热屏特性的影响.

本文针对密集发散气膜孔型的纵向波纹板隔热屏, 利用数值模拟的方法研究开孔率、波纹板高度、孔径、冷却通道高度等结构参数对隔热屏冷却效果的影响.

1 纵向波纹隔热屏的计算模型

纵向波纹板隔热屏的几何形状沿轴向变化很大, 但沿周向变化很小(除孔外). 而整个发动机燃烧室是轴对称的, 故可以把纵向波纹隔热屏简化为一个二维轴对称模型来讨论.

连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ruu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvu) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r\mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r\mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ruw) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvv) = & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r\mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \\ & \frac{1}{r\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r\mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{w^2}{r} \end{aligned} \tag{3}$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_i \left( E + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h \tag{4}$$

式中  $w$  是漩涡速度,  $u$  是轴向速度,  $v$  是径向速度,  $r$  是半径. 其中  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$ , 有效热传导系数  $k_{\text{eff}} = k + k_t$  ( $k_t$  是湍流传导系数, 根据所使用的湍流模型来定义). 方程右边的前三项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量运输,  $S_h$  为体积热源项.

计算模型见图 1. 沿着流动方向, 冷却通道的冷气经波纹板上气膜孔流进热燃气一侧, 在隔热

屏内壁面形成气膜, 对隔热屏进行冷却.

网格划分时, 全部使用四边形网格, 且在波纹板气膜孔附近及波纹板附近速度和温度梯度大的区域进行细化加密. 对于模型的网格进行过无关性验证, 最终得到最佳网格数. 所有模型的网格节点数在 10 万附近.

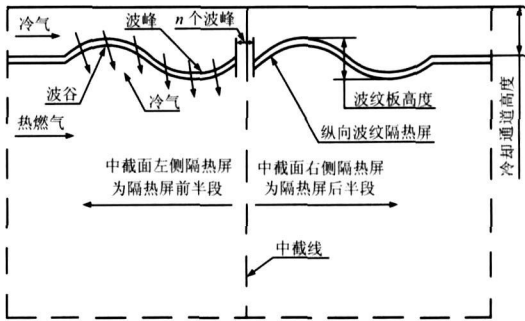


图 1 纵向波纹隔热屏计算模型

Fig. 1 Calculation model of the longitudinal ripple liner

边界条件参数设置见表 1. 此时没有考虑主燃气温度沿程的变化, 以最高温度作为进口, 算出的隔热屏壁面冷却效率可能偏低. 但在比较各种模型的冷却效果时, 只要边界条件相同, 主燃气温度对隔热屏壁面冷却效率的影响是等同的.

表 1 边界条件参数表

Table 1 Parameters of the boundary condition

|      | 进口流量占<br>总流量百分比/% | 出口流量占<br>总流量百分比/% |
|------|-------------------|-------------------|
| 冷气通道 | 15                | 5                 |
| 燃气通道 | 85                | 95                |

文献[7]中表明当壁面有分离流动存在时, 湍流模型 SST 同实验结果吻合较好. 故湍流模型选择对近壁自由流有广泛应用的 SST 剪切应力输运模型. 采用分离隐式求解器进行稳态计算, 离散方程采用二阶迎风格式. 相同条件下, 计算中加辐射模型后整个隔热屏温度提高的幅度大体相当, 故研究隔热屏冷却特性时, 没有考虑燃烧室高温燃气的辐射.

2 数值模拟结果及分析

研究过程中, 设计的多种纵向波纹隔热屏方案考虑了以下参数对隔热屏冷却效果的影响: 开孔率  $\alpha = 3\%$  和  $6\%$ ; 波纹板无量纲高度  $B = b/r$ , (波纹板高度  $b$ (见图 1)/燃烧室筒体半径  $r$ ), 为  $1\%$ ,  $2\%$  和  $3.33\%$ ; 发散气膜孔直径  $D = 0.5\text{ mm}$  和  $0.3\text{ mm}$ ; 冷却通道无量纲高度  $H = h/r$ , (冷却

通道高度  $h$  (见图 1)/ 燃烧室筒体半径  $r$ ), 为 5% 和 6.67%. 研究每种参数时都建立了多组不同尺寸的模型, 得到了关于这些算例的共同结论. 由于篇幅有限, 仅举其中一组进行说明.

2.1 开孔率对隔热屏冷却效果的影响分析

在冷气流量相同的条件下, 比较  $D = 0.5$  mm,  $B = 3.33\%$  时,  $\alpha = 3\%$  和  $\alpha = 6\%$  两种隔热屏冷却效果, 如图 2.

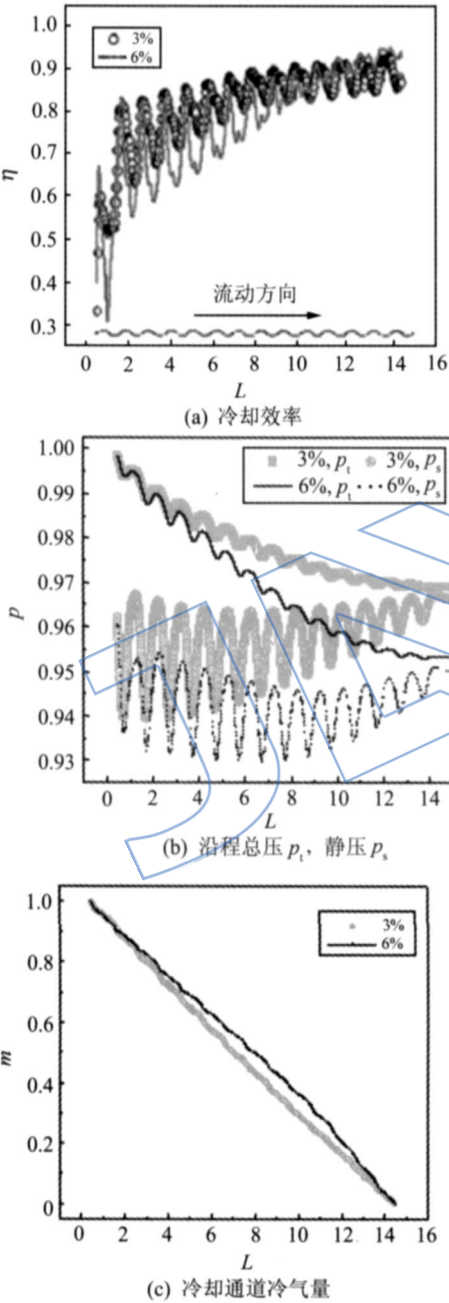


图 2  $\alpha = 3\%$  和 6% 隔热屏壁面冷却效率、冷却通道总静压和冷却通道冷气流程分布图  
Fig. 2 Cooling effectiveness of the liner, the total and static pressure and the amount of the cold air in the cooling passage when the open ratio is 3% compared with 6%

文中无量纲横坐标  $L =$  燃烧室长度/波纹板的波长. 无量纲纵坐标  $p$  表示对应的总压  $p_t$  或静压  $p_s$  与冷却通道进口总压的比值. 无量纲纵坐标  $m$  的定义为冷却通道内冷气的沿程流量与进口流量的比值. 纵坐标冷却效率  $\eta$  的定义表达式<sup>[8]</sup>:  $\eta = (T_{\infty} - T_{aw}) / (T_{\infty} - T_2)$ . 式中  $T_{\infty}$  为热燃气主流温度,  $T_{aw}$  为隔热屏壁面温度,  $T_2$  为冷气温度.

图 2(a) 中冷却效率沿程变化曲线随着隔热屏波纹板的波纹起伏而起伏. 冷却效率极大值处对应的是隔热屏的波谷部分(见图 1), 极小值处对应的是隔热屏的波峰部分(见图 1). 这是因为相对隔热屏波峰处, 冷气可以相对稳定的驻留在隔热屏波谷处. 故波谷处隔热屏得到了更好的保护, 冷却效率也较高.

图 2(b) 中冷却通道内静压变化较大, 静压沿程随波纹板的起伏而起伏. 波谷处, 冷却通道截面变窄, 流速变大, 则静压较小; 波峰处, 冷却通道截面变宽, 流速变小, 则静压较大. 故波谷处隔热屏冷却通道与热燃气通道之间静压差较小, 气膜孔出流较难, 特别是波谷顶部的气膜孔几乎不出流; 波峰处静压差较大, 气膜孔较易出流. 纵向波纹隔热屏这种特殊结构, 从波谷流出少量冷气就可以相对稳定的积聚在波谷下方, 而波峰由于靠近热燃气, 从波峰处流出的冷气容易被下方的热燃气席卷至下游. 这就导致了纵向波纹隔热屏波谷和波峰处冷却效果存在差异. 由图 2(b), 和  $\alpha = 6\%$  的隔热屏相比,  $\alpha = 3\%$  的隔热屏冷却通道内总压下降较缓慢, 沿程静压相对也较大. 静压分布不同直接影响隔热屏上气膜孔出流量的不同.

图 2(c) 中两种开孔率下的隔热屏相比,  $\alpha = 3\%$  的隔热屏冷却通道内前半段的冷气流下降较快, 则隔热屏前半段上气膜孔出流较多; 而在隔热屏后半段, 情况则相反. 故  $\alpha = 3\%$  的隔热屏比  $\alpha = 6\%$  隔热屏的前半段冷却效果会较好, 而后半段冷却效果会较差. 如图 2(a) 中, 和  $\alpha = 6\%$  的隔热屏相比,  $\alpha = 3\%$  的隔热屏前半段平均冷却效率提高了 8.2%, 而后半段平均冷却效率降低了 3.0%. 而且在隔热屏前半段,  $\alpha = 6\%$  的隔热屏单个波段内的冷却效率起伏较大, 冷却效率极大值与  $\alpha = 3\%$  单个波段内极大值相当, 而极小值却小很多. 这是因为隔热屏波谷处冷却效果较好, 两种开孔率下隔热屏波谷处的冷却效率相差不大, 则两者的冷却效率极大值相当; 可是在波峰处, 开孔率较大的隔热屏单个气膜孔出流较少, 在隔热屏

内壁面形成的气膜较薄, 隔热屏在波峰处的冷却效率较低, 则  $\alpha = 6\%$  的隔热屏冷却效率极小值较小. 到隔热屏后部,  $\alpha = 6\%$  的隔热屏上气膜孔出流较多, 冷气层较厚, 使得其波峰及波谷处的冷却效果都比  $\alpha = 3\%$  的隔热屏好.

总体来看,  $\alpha = 3\%$  的隔热屏平均冷却效率较高, 整体平均冷却效率比  $\alpha = 6\%$  的隔热屏提高了 4.1%. 单个波段内,  $\alpha = 3\%$  冷却效率起伏较小, 最大的隔热屏冷却效率起伏在  $\alpha = 6\%$  的起始部分, 即此处隔热屏温度变化也较大, 这可能导致波纹板热应力过大. 但是就前后段而言,  $\alpha = 3\%$  的隔热屏前半段平均冷却效率较高,  $\alpha = 6\%$  的隔热屏后半段平均冷却效率较高.

2.2 波纹板高度对隔热屏冷却效果的影响分析

图 3 为  $D = 0.3\text{mm}$ ,  $\alpha = 3\%$  时,  $B = 1\%$ ,  $B = 2\%$  和  $B = 3.33\%$  三种隔热屏附近温度场和速度场.

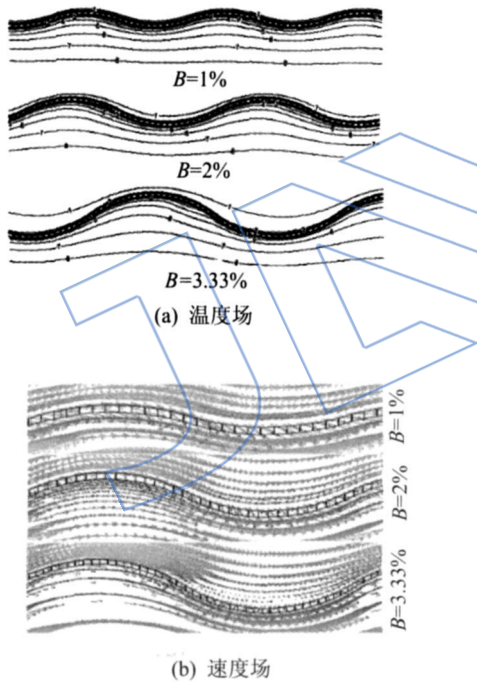


图 3  $B = 1\%$ ,  $2\%$  和  $3.33\%$  隔热屏附近温度场和速度场  
Fig. 3 Temperature and velocity field about the neighboring of the liner when the the dimensionless height of ripple board is 1% compared with 2% and 3.33% .

图 3 中波纹板高度越大, 隔热屏近壁面处的温度越高, 温度等值线起伏越大. 波纹板高度增大, 冷流体流过波谷处的速度增大, 静压出流会减少; 冷流体流过波峰处的速度减小, 静压出流会增多. 但是从波峰处流出的冷气容易被下方的高速热燃气带走, 故波峰处气膜孔出流量的增多并不能提高隔热屏的冷却效果.

图 4 中, 三种隔热屏总长度相同, 因波纹曲率半径相同, 波纹板高度不同, 则对应的各隔热屏的波纹个数不同. 为了方便比较, 图 4 中三种隔热屏的横坐标都是以  $B = 3.33\%$  的波长作为基数.

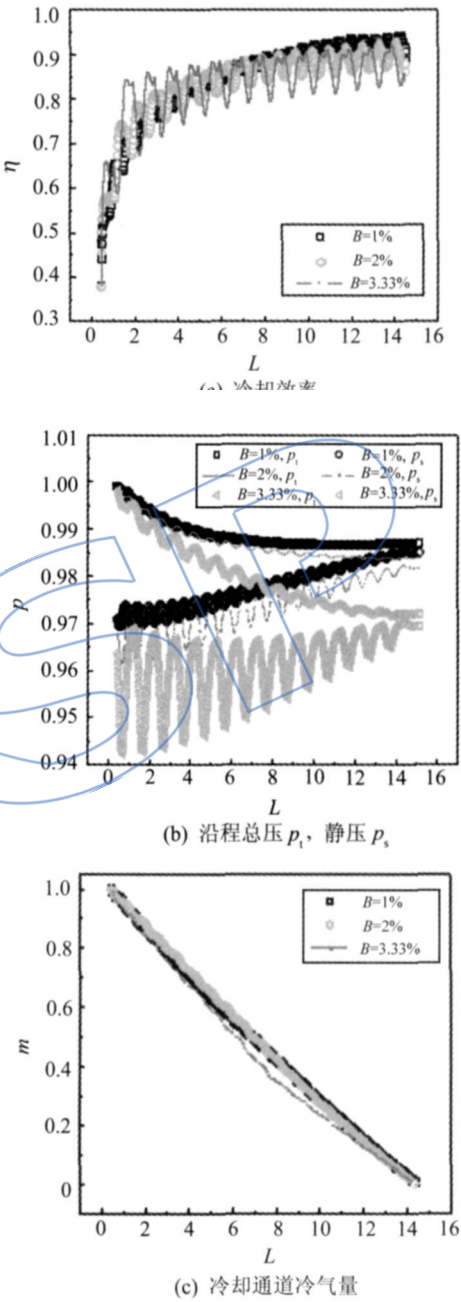


图 4  $B = 1\%$ ,  $2\%$  和  $3.33\%$  隔热屏壁面冷却效率、冷却通道总静压和冷却通道冷气流沿程分布图  
Fig. 4 Cooling effectiveness of the liner, the total and static pressure and the amount of the cold air in the cooling passage when the dimensionless height of ripple board is 1% compared with 2% and 3.33%

发散孔结构的气膜孔的轴向间距和周向间距相等, 开孔率一定时, 三种不同高度的隔热屏上总的孔排数相同. 隔热屏前半段,  $B = 3.33\%$  的冷却

通道较窄,可以在一定程度上提高冷气的进口段速度,由图 4(c), $B=3.33\%$  的冷却通道前半段的冷气量下降较快,隔热屏上气膜孔出流较多,故  $B=3.33\%$  的隔热屏前半段的冷却效率会出现局部较高,其平均效率比  $B=2\%$  的隔热屏高出了  $1\%$ ,比  $B=1\%$  的隔热屏高出了  $3.6\%$ . 但此时气膜孔出流还较少,隔热屏下方气膜覆盖还不是很好,波纹板高度越大则波峰部分越靠近热燃气,故波峰处的冷却效率会较低. 所以在隔热屏前半段,  $B=3.33\%$  的隔热屏单个波段内冷却效率呈波纹状变化最明显,其冷却效率的极大值比  $B=1\%$  和  $B=2\%$  高,但其极小值却比其他两者小.

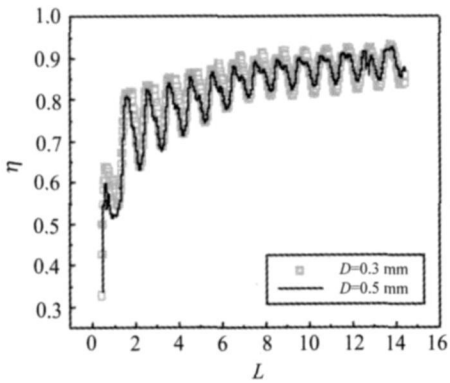
$B=2\%$  和  $B=1\%$  时,隔热屏冷却效率沿程变化曲线呈上升趋势,  $B=3.33\%$  的隔热屏的曲线到后半部则趋于平缓. 增大波纹板高度,冷却通道内的流阻增大,通道内的压力损失也随之增大. 由图 4(b) 可以看到,三种结构的进口动压头相差不大,但沿着流动方向,  $B=3.33\%$  的流动损失最大,其速度减小较快. 即使是相同的孔排数,  $B=3.33\%$  的隔热屏气膜孔出流也较困难. 由图 4(c),  $B=3.33\%$  的冷却通道的后半段冷气出流较  $B=2\%$  和  $B=1\%$  的少. 故  $B=2\%$  和  $B=1\%$  的隔热屏后半段冷却效率曲线在  $B=3.33\%$  的上方,  $B=2\%$  和  $B=1\%$  隔热屏后半段的平均冷却效率比  $B=3.33\%$  的隔热屏后半段平均冷却效率高出了  $2.3\%$  和  $4.6\%$ . 对于整体折合的平均冷却效率,  $B=3.33\%$  最低,  $B=2\%$  居中,  $B=1\%$  最高.

综上所述,隔热屏冷却效果受波纹板高度  $B$  的变化较大. 针对  $B=1\%$ ,  $B=2\%$  和  $B=3.33\%$  三种情况,  $B=1\%$  时,隔热屏壁面平均冷却效率较高,隔热屏壁面冷却效果较好;且单个波段内隔热屏温度起伏较小,可以降低对隔热屏的选材要求. 波纹板高度较大使得隔热屏单个波段温度波动较大,会影响的材料稳定性. 波纹高度增加可增加其刚性,但高度过大,在冷却通道内流过波峰和波谷的冷气流动情况相差很大,这样就使隔热屏波峰与波谷部分及相应的筒体外壁处的壁温差增高.

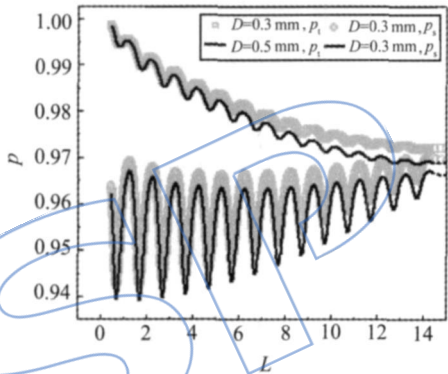
2.3 孔径对隔热屏冷却效果的影响分析

图 5 为  $B=3.33\%$ ,  $\alpha=3\%$  时,  $D=0.3\text{ mm}$  和  $0.5\text{ mm}$  两种隔热屏冷却效率、冷却通道总静压和冷却通道冷气量沿程分布图. 图 5(b) 中,相对  $D=0.3\text{ mm}$ ,  $D=0.5\text{ mm}$  的隔热屏总压下降稍快,静压也稍小. 但是总的来看,两者相差不大,特别是在隔热屏前半段,两者的总压沿程变化曲线

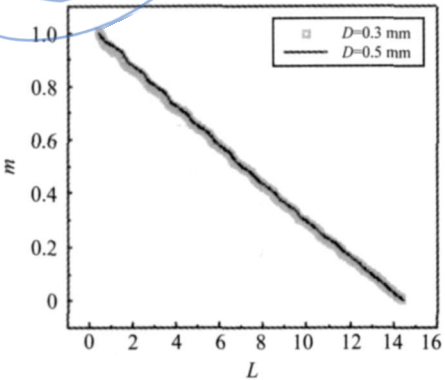
几乎重合. 图 5(c) 和 (a) 中两种结构的冷却通道



(a) 冷却效率



(b) 沿程总压  $p_t$ , 静压  $p_s$



(c) 冷却通道冷气量

图 5  $D=0.3\text{ mm}$  和  $0.5\text{ mm}$  隔热屏壁面冷却效率、冷却通道总静压和冷却通道冷气量沿程分布图

Fig. 5 Cooling effectiveness of the liner, the total and static pressure and the amount of the cold air in the cooling passage when the diameter of the holes is  $0.3\text{ mm}$  compared with  $0.5\text{ mm}$

冷气量沿程下降曲线几乎重合,隔热屏壁面冷却效率分布曲线也几乎重合.  $D=0.5\text{ mm}$  时气膜孔径大,从单个气膜孔流出的冷气量较多,但因为孔间距较大,故流出的这部分冷气需要覆盖的隔热屏壁面面积也较大. 故这两种情况下折合的隔热屏平均冷却效率相差不大. 隔热屏后半段,相对

$D=0.3\text{ mm}$ ,  $D=0.5\text{ mm}$  的隔热屏冷却效率曲线单个波段波动幅度稍小. 实际中, 燃烧室一般后部燃气温度很高, 故设计中对隔热屏后半段选取孔径较大的发散孔, 可稍微降低隔热屏单个波段的温度波动幅度.

2.4 冷却通道高度对隔热屏冷却效果的影响分析

图 6 为  $B=3.33\%$ ,  $\alpha=3\%$  时,  $D=0.3\text{ mm}$ ,  $H=6.67\%$  和  $H=5\%$  两种隔热屏冷却效率、冷

却通道总静压和冷却通道冷气量沿程分布图. 图 6(b) 中, 相对  $H=6.67\%$ ,  $H=5\%$  时总压下降幅度较大, 静压沿程都较小. 虽然冷却通道高度的改变对冷却通道内总、静压有影响, 但发散孔结构的气膜孔排布较紧密, 单个气膜孔出流较少, 特别在隔热屏前半段, 较易贴附在隔热屏下方, 形成稳定的气膜. 故通道内压力的变化对发散孔结构的隔热屏上气膜孔出流几乎没有影响. 如图 6(c) 和 (a), 两条冷气下降曲线几乎重合, 其冷却效率分布曲线也几乎重合. 故  $H=6.67\%$  和  $H=5\%$  两种冷却通道高度对发散孔型的纵向波纹隔热屏冷却效果影响不大.

3 结 论

- 1) 在气膜孔出流总量相同的情况下, 开孔率  $\alpha=3\%$  的隔热屏前半段平均冷却效率较高,  $\alpha=6\%$  的隔热屏后半段平均冷却效率较高;  $\alpha=3\%$  的隔热屏比  $\alpha=6\%$  的隔热屏平均冷却效果较好.
- 2) 波纹板高度的变化对纵向波纹隔热屏冷却效果影响很大, 相对  $B=3.33\%$  和  $B=2\%$ ,  $B=1\%$  的隔热屏平均冷却效果较好.  $B=3.33\%$  的纵向波纹隔热屏单个波段内冷却效率呈波纹状变化最为明显.
- 3) 开孔率相同情况下, 在隔热屏前半段,  $D=0.3\text{ mm}$  和  $0.5\text{ mm}$  两种结构的纵向波纹隔热屏冷却效果相差不大; 而隔热屏后半段,  $D=0.3\text{ mm}$  的隔热屏冷却效率曲线单个波段波动幅度较小.
- 4)  $H=6.67\%$  和  $5\%$  两种冷却通道高度对发散孔型的纵向波纹隔热屏冷却效果影响不大.

参考文献:

[ 1 ] 陆永华, 常海萍, 谈浩元. 纵向波纹隔热屏通道的换热研究[J]. 推进技术, 2002, 23( 3) 230~232.  
LU Yonghua, CHANG Haiping, TAN Haoyuan. Heat ing transfer of longitudinal ripple heat shield tunnel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23( 3) : 230~232. ( in Chinese )  
[ 2 ] 唐婵, 常海萍, 毛军逵. 离散孔纵向波纹隔热屏气膜冷却特性研究[J]. 工程热物理论, 2007, 28( 3) : 487~489.  
TANG Chan, CHA NG Haiping, MAO Junkui. Numerical simulation of discrete holes on the longitudinal ripple wavy liner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28 ( 3) : 487~489. ( in Chinese )  
[ 3 ] 陈健. 加力燃烧室纵向波纹隔热屏的实验和计算研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.  
CHEN Jian. Ex perim ental and numerical study of the lon gitudinal ripple heat shield for an afterburner [D]. Nar

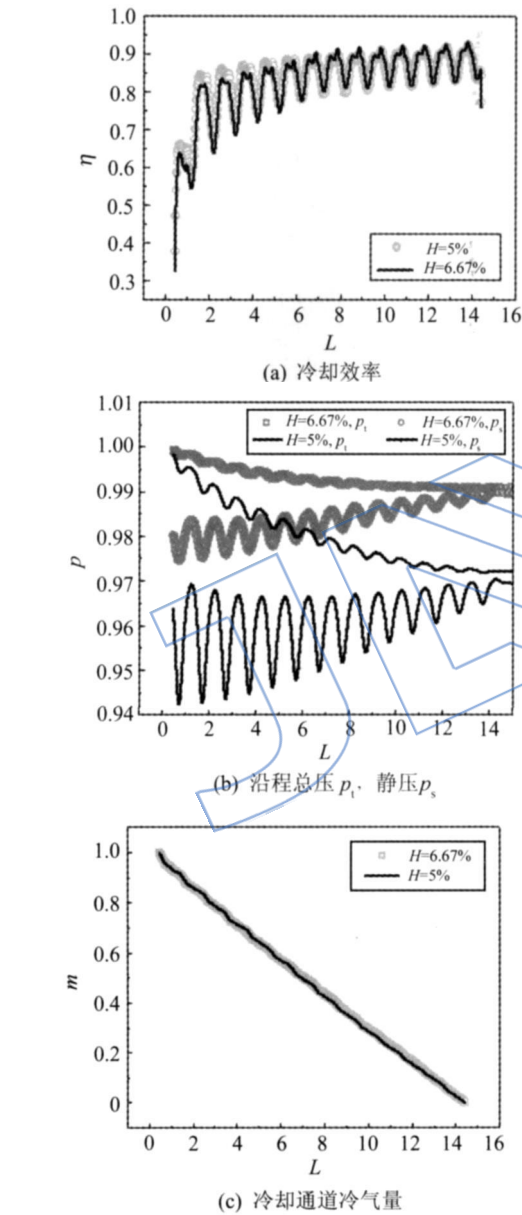


图 6  $H=6.67\%$  和  $5\%$  隔热屏壁面冷却效率、冷却通道总静压和冷却通道冷气量沿程分布图  
Fig. 6 Cooling effectiveness of the liner, the total and static pressure and the amount of the cold air in the cooling passage when the dimensionless height of cooling passage is 6.67% compared with 5%

- jing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000. (in Chinese)
- [ 4 ] Bailey J C, Intile J, Fric T FA. Experimental and numerical study of heat transfer in a gas turbine combustor liner [J]. Transactions of the ASME, 2003, 125:994-1002.
- [ 5 ] ShinBo K, KoiDe Y, Kashiwagi T. Research of heat transfer of a liner for an afterburner[ R]. 33rd AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE, Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1997: 1-10.
- [ 6 ] Jayant S, Hewitt G F. Hydrodynamics and heat transfer of wavy thin film flow [ J]. Heat Transfer, 1997, 40( 1): 179-190.
- [ 7 ] ANSYS. The CFX approach to turbulence modeling accuracy and effective turbulent flow simulations[ M ]// CFX Technical Brief. [ S. l. ]: ANSYS Inc. , 2003.
- [ 8 ] 葛绍岩. 气膜冷却[ M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- GE Shaoyan. Film Cooling[ M ]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)

JALSP