

文章编号: 1000-8055(2007)03-0375-05

# 冲击加多斜孔双层壁对流与 冲击换热优化研究

唐庆如

(中国民航飞行学院, 广汉 618307)

**摘 要:** 对冲击加多斜孔双层壁孔内对流和冲击换热这两部分冷却达到最大进行了优化. 冲击加多斜孔双层壁结构中单位面积冲击孔数量和多斜孔数量比为 1:3, 多斜孔倾角为 30°. 本优化属于混合约束优化, 采用序列无约束极小化方法进行优化. 通过计算分析, 得出了在冲击加多斜孔双层壁在压力降和单位面积冷却气量一定条件下的优化结果, 存在冲击换热和多斜孔内换热的最佳分配, 该结果对指导冲击加多斜孔双层壁设计有指导意义.

**关 键 词:** 航空、航天推进系统; 航空发动机; 气膜冷却; 冲击加多斜孔冷却; 优化

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

## A study of optimization of convection and heat transfer of impingement/effusion double wall

TANG Qing ru

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The convection and heat transfer within the effusion holes of impingement/effusion double wall were optimized to get the maximum internal cooling effect. The ratio of the number of impingement holes to the number of effusion holes per unit area is 1:3, and the angel of effusion hole is 30 degree. As a hybrid restriction optimization approach, the sequential unconstrained minimization technique was applied for optimization. The optimal results of impingement/effusion double wall were obtained under the pressure drop and unit-area cooling air flow. The results indicate an optimal distribution between the impingement heat transfer and the convective heat transfer within the effusion holes, providing a basis for design of the impingement/effusion double wall for engineering applications.

**Key words:** aerospace propulsion system; aero-engine; film cooling; impingement/effusion cooling; optimization

民用低污染燃烧室和军用高温升燃烧室发展趋势,使得通过燃烧室的流量中,用于燃烧的空气分配比例大大增加,相应地,使用于冷却的气量分配减少.为此,出现了不少火焰筒的先进冷却方式以满足冷却气量减少并且保证火焰筒耐久性.

冲击加多斜孔双层壁冷却方式是一种典型的

先进冷却方式<sup>[1]</sup>.火焰筒的壁面被分为两层,外层是冲击层,内层是多斜孔层.这种冷却方式增强形成气膜之前的换热主要来源于冲击换热和多斜孔内部的换热.

国内对冲击多斜孔冷却的研究集中在对这种冷却方式的流量系数、冲击换热特性、多斜孔孔内

收稿日期: 2006-03-20; 修订日期: 2006-10-30

作者简介: 唐庆如(1965),男,四川省什邡市人,中国民航飞行学院副教授,工程硕士,研究方向为航空发动机.

对流换热特性以及在全环火焰筒的壁温验证上<sup>[1-5]</sup>,国际上主要对冲击加多直孔发散冷却的总换热效果进行了研究<sup>[6,7]</sup>.从燃烧室的工作特点来看,冷却气流量占燃烧室总进气量的比例以及通过火焰筒壁的气流压力降是固定的,增加了冲击换热,必然削弱了多斜孔壁的内部对流换热,反之亦然.因此这两部分换热存在一个优化的问题,即从燃烧室工作的特点出发,合理分配冷却气通过冲击壁及多斜孔壁的压力降,实质上就是分配冲击换热与孔内对流换热的比例,使总的冷却效率最高.但是,在冲击加多斜孔双层壁中,冲击壁的压力降分配高,由于总压降一定,则多斜孔的压降低.因此,这两部分的换热效果从理论上讲,应存在一个优化的比例,即以何种比例分配冲击和多斜孔壁的压力降,使得总冷却效果最好,这个问题是上述文献未涉及到的研究问题.

本文以上述文献发表的结果为基础,对冲击加多斜孔双层壁冷却方式的换热进行优化研究,得到了在压力降一定和有无孔径的约束条件下,形成气膜前的冲击换热加多斜孔内部对流最优换热效果时的优化结果.

1 冲击多斜孔换热优化模型

双层壁换热过程如图 1 所示.在燃气侧,由辐射和对流使热量在燃气与火焰筒复合壁的多斜孔壁之间交换,多斜孔壁内存在热传导,斜孔内存在强制对流换热,在双层壁夹层中多斜孔壁的冷侧存在冲击对流换热和多斜孔壁向冲击壁的辐射换热,冲击壁内存在热传导,在冷气侧,冲击壁与环腔通道中冷气存在对流换热,同时冲击壁又向燃烧室机匣辐射换热.

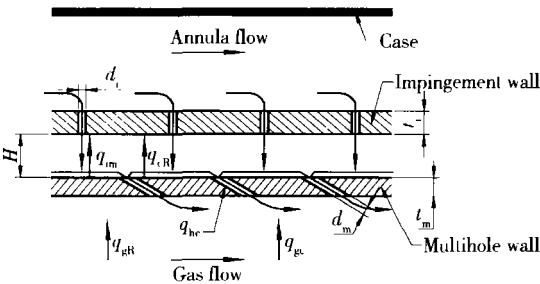


图 1 冲击/多斜孔复合壁气膜冷却传热

Fig. 1 Heat transfer of impingement/ multihole double wall film cooling

通过以上分析写出如下多斜孔壁的热平衡方程:

$$q_{gc} + q_{gR} = q_{rR} + q_{im} + q_{hc} \frac{\sum A_m}{A_{ane}} \quad (1)$$

式中:  $\sum A_m$  是所有小孔侧表面积和,  $A_{ane}$  是火焰筒壁有效换热表面积,此处忽略内外表面积差别,因为火焰筒型很薄,认为内外表面积皆为  $A_{ane}$ ,  $q_{gR}$  是燃气辐射热流,  $q_{gc}$  是燃气对流热流,  $q_{rR}$  是多斜孔壁向冲击壁辐射热流,  $q_{im}$  是冲击换热热流,  $q_{hc}$  是多斜孔内热流.

壁温主要由多斜孔壁冷侧冲击换热和小孔内对流换热量决定,故此取优化目标函数为:

$$F = h_{im} A_{ane} + h_{hc} \sum A_m \quad (2)$$

由于冲击换热系数  $h_{im}$  和孔内对流换热系数  $h_{hc}$  都与  $Re$  数有关,  $Re$  数越高,则  $h_{im}$  和  $h_{hc}$  越高,而  $Re$  数则取决于通过火焰筒壁的气流压降  $\Delta p$ ,通过火焰筒壁总的气流压降  $\Delta p$  是固定不变的,那么,增加通过冲击孔的压降  $\Delta p_i$ ,冲击换热增加,但通过多斜孔的压降  $\Delta p_m$  下降,孔内对流换热减少,反之亦然.因此,这两部分换热存在一个优化的问题,即从燃烧室工作的特点出发,合理分配冷却气通过冲击壁及多斜孔壁的压力降,实质上就是分配冲击换热与内对流换热的比例,使总冷却效率最高.

由于影响冲击换热系数和多斜孔内换热系数的双层壁结构参数很多,在进行优化设计时,如果都加以考虑的话,则问题将变得非常复杂,以至于无法求解.因此,从具体的结构出发,将问题作适当的简化,不失为一种有效的方法.基于这种思想,将各种因素综合考虑,给出如下几个前提条件:

冲击孔和多斜孔阵采用叉排方式,缝高固定为  $H/d_i = 1$ ,壁厚固定,取  $t_m$ .流量系数  $C_{di}$ 、 $C_{dm}$  不随压降变化,孔数比固定,取  $N_m/N_i = 3$  两种情况,多斜孔倾角固定为  $30^\circ$ ,单位面积上的冷却气流量固定,取  $G_p = 0.6499 \text{ kg/sm}^2$  标准大气压.见图 2.

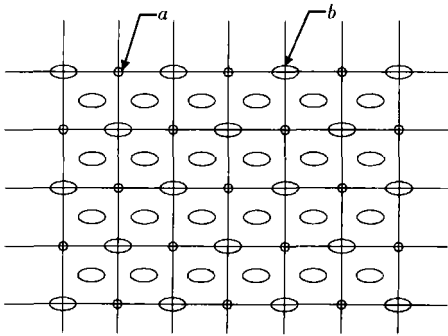


图 2 冲击加多斜孔冷却方式(孔数比  $N_m/N_i = 3$ )

Fig. 2 Configuration of impingement/ multihole wall (Hole number ratio  $N_m/N_i = 3$ )

公式(2)中的冲击换热系数和孔内换热系数见文献[1]和文献[6]。

取冲击孔的直径,多斜孔的直径,单位面积上冲击孔数和冲击压降占双层壁总压降的比例作为设计变量<sup>[8]</sup>,即:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_i \\ d_m \\ N_i \\ \Delta p_i\% \end{bmatrix} \quad (3)$$

取单位面积上冲击换热与多斜孔内换热之和对应的负数作为目标函数,其表达式为  $F(X) = -Q = -\overline{h_{im}}A_{imc} - \overline{h_{hc}} \sum A_m$ 。

约束条件如下:

冲击孔的直径范围:  $0.5\text{ mm} \leq d_i \leq 2\text{ mm}$ , 由此可得约束为:

$$g_1(X) = 0.5 - d_i =$$

$$0.5 - x_1 \leq 0, g_2(X) = d_i - 2 = x_1 - 2 \leq 0$$

多斜孔的直径范围:  $0.5\text{ mm} \leq d_m \leq 2\text{ mm}$ , 由此可得约束为:

$$g_3(X) = 0.5 - d_m = 0.5 - x_2 \leq 0,$$

$$g_4(X) = d_m - 2 = x_2 - 2 \leq 0$$

冲击压降的范围:  $0 < \Delta p_i\% < 1$ , 由此可得约束为:

$$g_5(X) = -\Delta p_i\% \leq 0,$$

$$g_6(X) = \Delta p_i\% - 1 \leq 0$$

总的压降约束: 冲击压降和发散压降之和为 1, 即  $\Delta p_i\% + \Delta p_m\% = 1$

考虑到柏努利方程和上述关系, 由此可得约束为:

$$h_1(X) = \Delta p_i\% + \Delta p_m\% - 1 = \frac{\rho(U_i^2 + U_m^2)}{2\Delta p \cdot p^*_{an}} - 1 \quad (4)$$

## 2 冲击加多斜孔壁换热优化的方法

为求解原目标函数的极小值:

$$\begin{aligned} \min_{X \in E^n} f(X) \\ \text{s.t. } g_u(X) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, m) \\ h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \dots, p) \end{aligned}$$

鉴于题目中既存在不等式约束, 又存在等式约束, 因此采用混合罚函数法求解。罚函数法(Penalty Function Method)是求解约束优化问题的一种间接方法, 其基本思想是用约束条件和目标函数构造一系列称之为惩罚函数的新目标函数, 从而将约束优化问题转化为一系列的无约束

优化问题, 然后用无约束优化方法求解。因此惩罚函数法亦称为序列无约束极小化方法, 简称 SUMT 法(Sequential Unconstrained Minimization Technique), 是目前较为成熟有效并得到广泛应用的一种方法<sup>[9]</sup>。

取  $M^{(k)} = \frac{1}{\sqrt{r^{(k)}}}$ , 将惩罚因子统一用  $r^{(k)}$  表示, 则混合法的惩罚函数又可表达为:

$$\Psi(X, r^{(k)}) = f(X) - r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(X)} + \frac{1}{\sqrt{r^{(k)}}} \sum_{v=1}^p [h_v(X)]^2$$
$$(r^{(0)} > r^{(1)} > r^{(2)} > \dots > 0, \lim_{k \rightarrow \infty} r^{(k)} \rightarrow 0) \quad (6)$$

$r^{(k)}$  是一个按线性关系递减的大于零的序列, 即:

$$\left. \begin{aligned} r^{(k+1)} &= cr^{(k)} \\ r^{(0)} &> r^{(1)} > r^{(2)} > \dots > r^{(k)} > 0 \\ \lim_{k \rightarrow \infty} r^{(k)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $c$  为缩减系数, 一般取  $c = 0.1 \sim 0.5$ , 当然, 这并不是一个严格的数, 一般需要根据目标函数和约束函数的性质, 在试算过程中作适当调整。采用惩罚函数进行迭代。随着惩罚因子  $r^{(k)}$  逐渐减小, 惩罚项的惩罚作用越来越小, 当  $r^{(k)} = 0$  时, 惩罚函数的最优点收敛于原问题的最优点。

本文采用混合惩罚函数法。在用混合惩罚函数法将约束优化问题转化为无约束优化问题后, 下一步工作就是无约束优化方法的选取。确定搜索方向的不同原则和方法形成了各种无约束优化方法, 本文选用改进的共轭方向法—Powell 法作为求解无约束优化问题的算法。

在进行优化计算的过程中, 需输入优化问题的维数, 不等式约束的数目, 等式约束的数目, 再输入惩罚因子的初始值, 惩罚因子的缩减系数, 初始步长, 计算精度及初始点, 经调试, 上述参数在本问题中可取为: 惩罚因子初始值  $R_0 = 10$  左右, 惩罚因子的缩减系数  $c = 0.1 \sim 0.5$ , 初始步长  $T_0 = 0.1$  左右, 计算精度  $\varepsilon = 10^{-4} \sim 10^{-7}$ , 也可以利用程序本身所给的子程序计算初始惩罚因子和初始可行点, 此时需要输入设计变量的边界值,  $0.5\text{ mm} \leq x_1 \leq 3\text{ mm}, 0.5\text{ mm} \leq x_2 \leq 3\text{ mm}$ 。在得出初始可行点和初始惩罚因子后, 构成惩罚函数, 然后对此惩罚函数进行无约束优化求解, 得出一系列极小值, 最终得出最优解。

通过给定不同的单位面积上的冲击孔数  $N_i$ , 可以得出一系列与之对应的最优冲击压降比

$\Delta p_i\%$ , 以及此状态下的单位面积多斜孔壁的总的冷却空气对流换热量.

3 优化结果分析

对多斜孔数量与冲击孔数量为  $N_m/N_i=3$  情况, 最优冲击压降比  $\Delta p_i\%$  随单位面积上的冲击孔数  $N_i$  的变化规律见图 3, 图 4, 这是无孔径约束情况下(即多斜孔的孔径可以尽量小)的最优冲击压降比  $\Delta p_i\%$  及相应的单位面积对流换热量随单位面积上的冲击孔数  $N_i$  的变化规律.

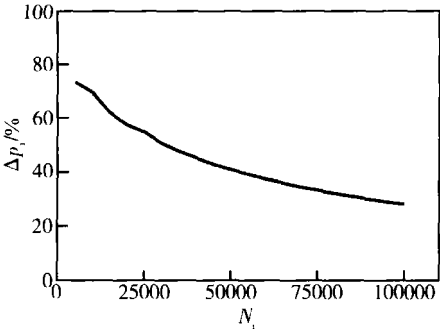


图 3  $\Delta p_i\%$  随  $N_i$  的变化规律  
(无孔径约束)

Fig. 3 Optimum  $\Delta p_i\%$  development trend with  $N_i$  (Without hole diameter restriction)

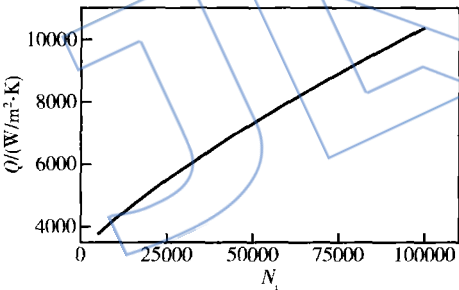


图 4 最优  $\Delta p_i\%$  下的单位面积对流换热量  
(无孔径约束)

Fig. 4 Convective heat flux of optimum  $\Delta p_i\%$   
(Without hole diameter restriction)

由图可知, 即随着  $N_i$  的增加, 最优冲击压降比  $\Delta p_i\%$  逐渐降低, 这说明, 在孔数增加, 孔径减小时, 整个形成气膜前的相应的单位面积上的对流换热量  $Q$  逐渐增加, 并且  $Q$  的增加与  $N_i$  之间的关系是: 在孔数少的时候, 增加幅度大, 孔数多的时候, 增加幅度小, 在单位面积孔数达到 100 000 时, 多斜孔的孔径为 0.28 mm.

图 5 和图 6 是  $N_m/N_i=3$ , 有孔径约束情况下的最优冲击压降比  $\Delta p_i\%$  及相应的单位面积对

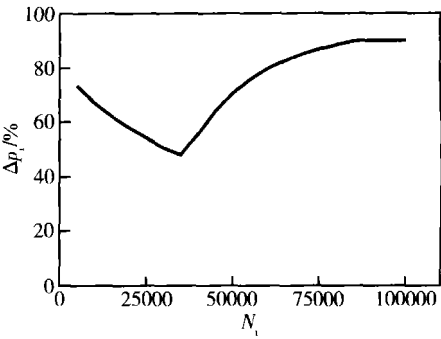


图 5  $\Delta p_i\%$  随  $N_i$  的变化规律  
(有孔径约束)

Fig. 5 Optimum  $\Delta p_i\%$  development trend with  $N_i$  (With hole diameter restriction)

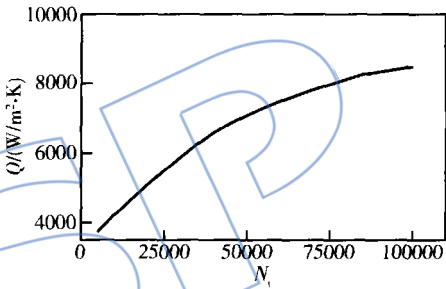


图 6 最优  $\Delta p_i\%$  下的单位面积对流换热量  
(有孔径约束)

Fig. 6 Convective heat flux of optimum  $\Delta p_i\%$   
(With hole diameter restriction)

流换热量随单位面积上的冲击孔数  $N_i$  的变化规律, 由图可知, 当  $N_i < 35\,000$  时, 其变化规律与无孔径约束情况下相同, 但当  $N_i > 35\,000$  时,  $\Delta p_i\%$  不再下降, 而是开始上升, 最终在  $N_i = 85\,000$  时达到 90%, 此后不再随  $N_i$  变化. 这同样是由于孔径的约束起了作用, 首先在  $N_i = 35\,000$  左右时, 多斜孔直径达到极小值, 即  $d_m = 0.5\text{ mm}$ , 当多斜孔孔径和冲击孔孔径都达到 0.5 mm 的给定最小值时,  $\Delta p_i\% = 90\%$  且不再随  $N_i$  变化. 由于受孔径约束的影响, 当  $N_i > 35\,000$  时, 相应的单位面积上的对流换热量  $Q$  随  $N_i$  增加的趋势减缓. 与无孔径约束的优化问题相比, 有孔径约束时, 压力降的分配呈现出更为复杂的规律

4 总 结

通过计算和分析, 可以确定, 对冲击加多斜孔双层壁火焰筒冷却结构而言, 确实存在冲击换热和多斜孔内换热的最佳分配问题, 也即存在一个最优的冲击压降比  $\Delta p_i\%$ , 并且得出了  $N_m/N_i=3$

情况下  $\Delta p_i\%$  随  $N_i$  的变化规律. 利用这一结果, 将可以指导双层壁结构的设计与选型, 得出非常有价值的结论.

总之, 冲击加多斜孔双层壁火焰筒冷却结构存在最优的冲击压降比  $\Delta p_i\%$ , 利用上述优化结果, 指导双层壁结构的设计与选型, 并同实验相结合, 将能更加快速有效地获得最佳的结构方案.

参考文献:

[1] 俞文利, 林宇震, 刘高恩. 冲击加多斜孔双层壁冷却方式多斜孔内换热研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 365-369.  
YU Wenli, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Investigation of heat transfer inside inclined multihole in the impingement/irclined multihole double wall [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(4): 365-369.

[2] 许全宏, 林宇震, 刘高恩. 冲击加多斜孔双层壁冷却方式流量系数研究[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 49-52.  
XU Quanhong, LIN Yuzhen, Liu Gaoen. Discharge coefficient of double wall with discrete hole and inclined multihole for combustor liner [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5): 49-52.

[3] 许全宏, 张宝华, 林宇震, 等. 冲击加多斜孔双层壁冷却方式绝热温比研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 387-390.  
XU Quanhong, ZHANG Baohua, LIN Yuzhen, et al. Adiabatic film effectiveness of the double wall with inclined multihole and discrete hole for combustor liner [J]. Journal of

Aerospace Power, 2000, 15(4): 387-390.

[4] 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.

[5] 赵清杰, 李彬, 陈志杰, 等. 浮动壁燃烧室试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(1): 17-19.  
ZHAO Qingjie, LI Bin, CHEN Zhijie, et al. An experimental study of floating wall combustor [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(1): 17-19.

[6] 许全宏, 林宇震, 刘高恩. 封闭空间内单孔冲击局部换热特性研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 341-343.  
XU Quanhong, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Investigation of impingement heat transfer of single hole in a limited space [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 341-343.

[7] Andrews G E, Aldabagh A M, Asere A A, et al. Impingement/effusion cooling, heat transfer and cooling in gas turbine [R]. AGARD CP 527, 1992: 30. 1-30. 10.

[8] Aldabagh A M, Andrews G E, Abdul Husain R A A, et al. Impingement/effusion cooling: the influence of the number of impingement holes and pressure loss on the heat transfer coefficient[R]. ASME Paper 89 GT-188.

[9] 何献忠, 李萍. 优化技术及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.