

逆向进气复合角发散冷却孔流量系数试验

陈江, 宋双文, 陈剑

(中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412000)

摘 要: 针对回流燃烧室外环壁面冷气与燃气流动方向相反的情况, 试验研究了发散孔进气方向与环腔通道气流流动方向相反的条件下, 复合角发散冷却孔流量系数随发散孔倾角($25^\circ \sim 55^\circ$)、偏角($90^\circ \sim 180^\circ$)及压降系数等参数的变化规律。研究表明: 复合角发散孔的流量系数随倾角的增大而增大, 随偏角的增大而减小; 随着压降系数的增大, 复合角发散孔的流量系数先呈近似线性增长, 当压降系数大于0.95后, 呈非线性增长且增长速度减缓。

关键词: 回流燃烧室; 逆向进气; 发散冷却; 复合角; 流量系数

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment of discharge coefficient of counter inlet effusion cooling holes with compound angle

CHEN Jiang, SONG Shuangwen, CHEN Jian

(Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: The flow direction of air in the outer annulus passage of reverse-flow combustors was opposite to the flow direction of gas. The discharge coefficient of compound angle effusion cooling holes was investigated under this condition. The investigation focused on how the discharge coefficient varied with inclined angles ($25^\circ - 55^\circ$), orientated angles ($90^\circ - 180^\circ$) and pressure drop coefficient. The results showed that the discharge coefficient of the effusion hole with compound angle increased with the increase of inclined angles, but decreased with the increase of the orientated angles. The discharge coefficient presented approximately linear rise with the increase of pressure drop coefficient first, and then grew nonlinearly when pressure drop coefficient was close to 0.95.

Key words: reverse-flow combustor; counter inlet; effusion cooling; compound angle; discharge coefficient

发散冷却是一种高效可靠的冷却方式, 目前已广泛应用于现代航空发动机燃烧室火焰筒的冷却, 长期受到广大传热和气动工作者的广泛关注。在应用发散冷却技术的过程中, 希望用尽可能少

的冷气量来满足发动机火焰筒冷却性能的要求, 这就要求必须确定火焰筒发散孔冷却孔的流量系数, 为此要深入细致地了解发散孔内气流的流动特性、流量系数的变化规律及其影响因素, 为工程

收稿日期: 2018-01-08

作者简介: 陈江(1992-), 男, 工程师, 硕士生, 主要从事航空发动机燃烧室冷却相关的研究。

引用格式: 陈江, 宋双文, 陈剑. 逆向进气复合角发散冷却孔流量系数试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 45-50. CHEN Jiang, SONG Shuangwen, CHEN Jian. Experiment of discharge coefficient of counter inlet effusion cooling holes with compound angle[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 45-50.

应用提供参考。文献[1]对圆柱形孔、簸箕形孔和圆锥形孔的流量系数进行了研究,研究表明,在相同的试验条件下,圆锥形孔的流量系数最大,簸箕形孔的次之,圆柱形孔的流量系数最小。文献[2]对发散孔进气方向与进口气流通道(简称环腔气流通道)方向相同的(同向进气)带复合角的发散孔板进行了流量系数研究,研究结果表明:孔偏角小于 40° 时,流量系数随偏角的增大而减小;孔偏角大于 40° 时,偏角的改变对流量系数影响不大。文献[3]研究了火焰筒壁面气膜冷却孔几何结构对流量系数的影响规律,并对气膜冷却孔的流量系数进行了试验研究,总结了长径比及孔排列形式对流量系数的影响。文献[4-6]等研究了多个参数对单个孔径为10 mm、具有复合角的多斜孔板流量系数的影响,指出发散孔进出口通道压比增大会增大流量系数,孔倾角和孔偏角增大会加大小孔进口处的损失,使得流量系数减小。文献[7-9]试验研究了气膜孔进口倒角、圆角对圆柱形气膜孔流量系数的影响,研究结果表明,适当的倒角、圆角可以减小气流进入孔时形成的分离区,流动损失减小,孔的实际流通面积也增大,流量系数相应增大。

综上所述,国内外学者从开孔率、孔形状、孔口倒角、壁厚、孔径、孔间距、孔排距、排布方式及复合角等方面对发散冷却孔的流量系数开展了大量的研究^[10-14],却鲜有研究发散孔进气方向与环腔气流通道方向相反(逆向进气)复合角发散冷却孔的流量系数。本文试验研究逆向进气复合角发散冷却孔的流量系数随倾角、偏角及压降系数的变化规律,并在计算流量系数时考虑发散孔孔径加工精度的影响,为回流燃烧室外环壁面发散冷却开孔角度设计提供参考。

1 试验件及试验系统

1.1 试验件

加工了20个平板试验件研究几何参数对复合角发散孔流量系数的影响,由连续方程、伯努利方程和质量流量计量程估算每个平板的开孔数量,最后确定每个平板上开孔数为200个,分为5排,每排40个,孔间距为4 mm,孔排距为30 mm。图1为复合角结构参数示意图, α 为发散孔倾角(发散孔与壁面夹角), β 为发散孔偏角(环腔通道气流方向与发散孔进气方向夹角)。小孔直径 D 设计为0.6 mm,板厚设计为1.5 mm,具体结构参数见表1。

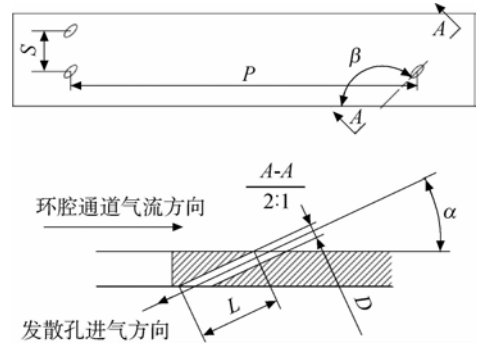


图1 复合角结构参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric parameters

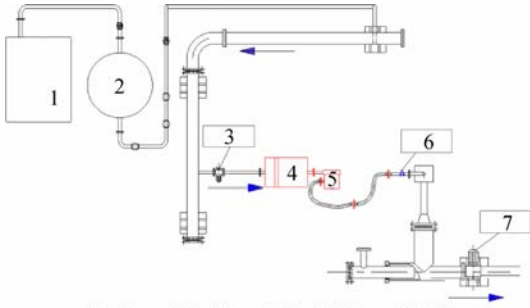
表1 平板试验件结构参数

Table 1 Geometric parameters of the plate

倾角 $\alpha/(^\circ)$	偏角 $\beta/(^\circ)$	P/D	S/D	L/D
	(90, 112.5、			
25	135、157.5、	50	5.83	5.73
	180)			
35	同上	50	5.83	4.09
45	同上	50	5.83	3.18
55	同上	50	5.83	2.61

1.2 试验系统

图2为试验系统示意图,试验器由主管路系统、排气系统、鼓风机系统、测试系统、操纵系统、电气系统等组成。空气经一台空压机压缩后进入环腔气流通道,通过涡街流量计测量其流量。根据方韧、林宇震等人的研究成果,主流流动对流量系数影响甚微,而环腔流动与小孔内气流流动状态对流量系数影响较大^[15],文献[16]研究了有无外部横流(主流)对涡轮叶片气膜孔流量系数的影响,并给出了两种不同试验条件下,流量系数与主次流压比的关系,在主流马赫数较小,主次流压比接近1时,有无外部横流(主流)发散孔的流量系数差别不大。一般燃烧室的压损通常在1%~6%,火焰筒内燃气的马赫数也远远小于涡轮叶片来流的马赫数,因此,本次试验不设主路流动,通过引射器抽负压的方式控制发散孔进出口通道的压差,使用质量流量计测量通过发散孔的气流流量,试验段气体的流动路径如图3所示。环腔气流通道的静压 p_{s1} 和总压 p_{t1} 、发散孔出口气流通道的静压 p_{s3} 和总压 p_{t3} 分别由一支探针测量,探针位置如图3所示。



1 空压机; 2 储气罐; 3 涡街流量计; 4 稳压筒;
5 试验段; 6 质量流量计; 7 引射器。

图2 试验系统

Fig. 2 Scheme of the test equipment

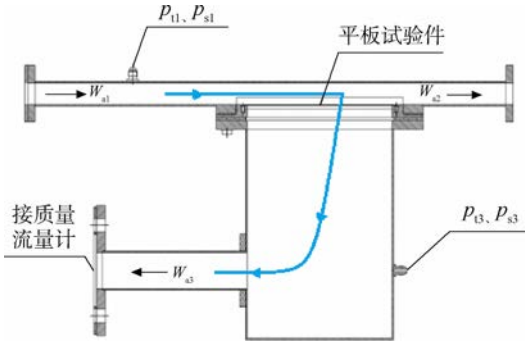


图3 试验安装段

Fig. 3 Test installation section

2 流量系数的确定

为了对参数无量纲化,定义压降系数 δ ,建立压降系数 δ 与发散孔进出口通道压力参数的关系。

$$\delta = \frac{p_{s3} - p_{s1}}{p_{t3} - p_{t1}} \quad (1)$$

式中 p_{t1} 、 p_{s1} 分别表示环腔气流通道的总压、静压; p_{t3} 、 p_{s3} 分别表示发散孔出口气流通道的总压、静压。

流量系数是通过发散孔的实际流量与理论流量之比,本试验中,由于气流速度不高,空气按不可压流体处理,流量系数由下式计算

$$C_d = \frac{W_{a3}}{A \sqrt{2\rho(p_{t1} - p_{s3})}} \quad (2)$$

式中 W_{a3} 为质量流量计测量的气流流量, A 为200个发散孔节流面积设计值之和。

在本文的试验系统中,发散孔出口气流通道足够大,通道内气流流动速度忽略不计。因此,在本文的流量系数计算过程中默认 $p_{s3} = p_{t3}$,将压降系数 δ 代入流量系数公式

$$C_d = \frac{W_{a3}}{\rho v A \sqrt{1 - \delta}} \quad (3)$$

式中 ρ 为环腔通道气流的密度; v 为环腔通道气流的速度。

考虑到发散孔的加工质量对流量系数的影响很大,因此,在试验前,测量了平板试验件发散孔的实际孔径,根据孔径的测量结果计算发散孔实际节流面积,定义发散孔节流面积误差 θ ,其中

$$\theta = \frac{A_s - A}{A} \quad (4)$$

式中 A_s 表示200个发散孔节流面积实际值之和。

因此,在本试验中,流量系数 C_d 可通过下式计算

$$C_d = \frac{W_{a3} A_1 (1 + \theta)}{W_{a1} A_s \sqrt{1 - \delta}} \quad (5)$$

式中 W_{a1} 为试验中涡街流量计测量的环腔气流通道的气流流量; A_1 为环腔气流通道截面面积。

由式(5)可知,在试验过程中,保持环腔气流流量 W_{a1} 为定值,通过控制引射器抽吸力度控制 p_{s3} ,计算不同 p_{s3} 条件下的压降系数 δ ,并测量不同 p_{s3} 条件下质量流量计所测得的通过发散孔的流量 W_{a3} ,就可以得到不同试验工况条件下逆向进气复合角发散孔的流量系数 C_d 。

3 试验误差分析

本试验中,发散孔的孔径已精密计量,并在流量系数的计算公式中考虑了发散孔孔径的加工误差,因此,流量系数的误差不考虑发散孔孔径的加工误差。本试验所用质量流量计的最大量程为30 g/s,相对误差为 $\pm 0.5\%$,其中通过发散孔的最大流量约为6.5 g/s,因此,质量流量计测得的实际质量流量的最大相对误差为2.3%。环腔气流通道入口处的总压 p_{t1} 和发散孔出口气流通道内静压 p_{s3} 均为压力扫描阀测量得到,试验时控制压力波动范围为 ± 20 Pa,由随机误差传递公式计算可得本试验流量系数的最大相对误差为3.22%。

4 试验结果及分析

4.1 压降系数 δ 对复合角发散孔流量系数的影响

图4给出了4种不同倾角、不同长径比的平板试验件复合角发散孔流量系数随压降系数 δ 变化的关系曲线,从图中可以看出,流量系数随压降系数 δ 增大而增大。由图5可知,在发散孔进出口压差 Δp 较小时, δ 的增长幅度较大,流量系数随 δ 增长的呈近似线性增长;当 Δp 增大至大于4000 Pa后, δ 增长幅度明显减小,流量系数随 δ 增

长的幅度逐渐变小,增长趋势减缓。这表明:在发散孔结构参数一定的条件下,发散孔流量系数随压降系数 δ 的变化关系呈近似线性增长,在压降系数 δ 大于0.95后呈非线性增长且趋势减缓。

4.2 偏角 β 对复合角发散孔流量系数的影响

图6给出了复合角发散孔流量系数随偏角 β 的变化规律。从图中可以看出,随着偏转角的增大,流量系数逐渐降低。这是因为:偏转角增大后,环腔通道气流流经气膜孔时的展向偏折更厉害,入口损失会增大。同时,偏转角增大会导致发

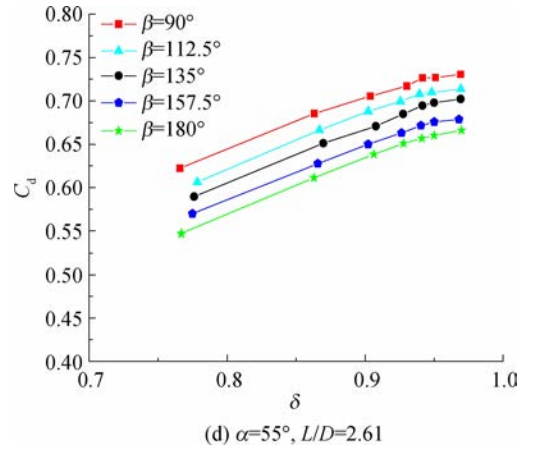


图4 压降系数对复合角发散孔流量系数的影响
Fig. 4 Effect of the pressure drop coefficient on discharge coefficient

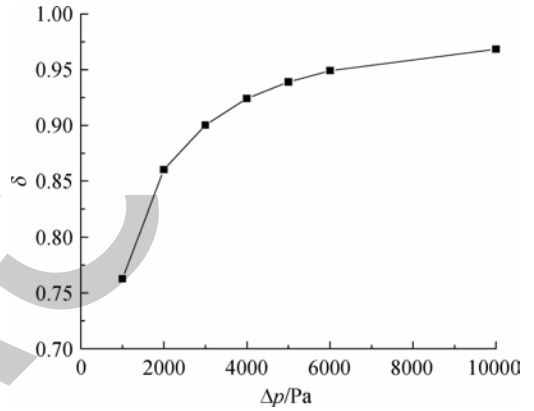
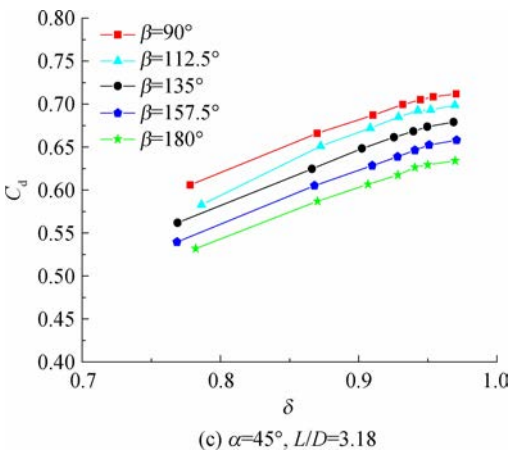
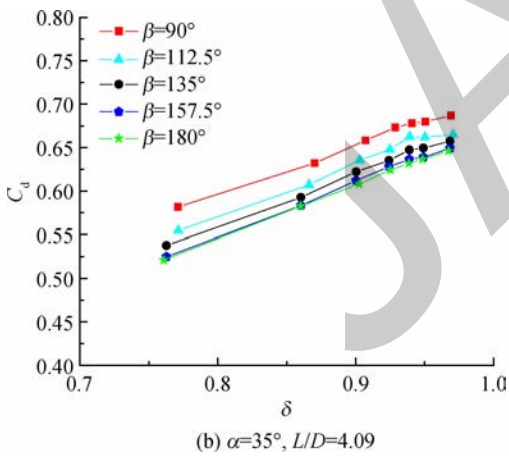
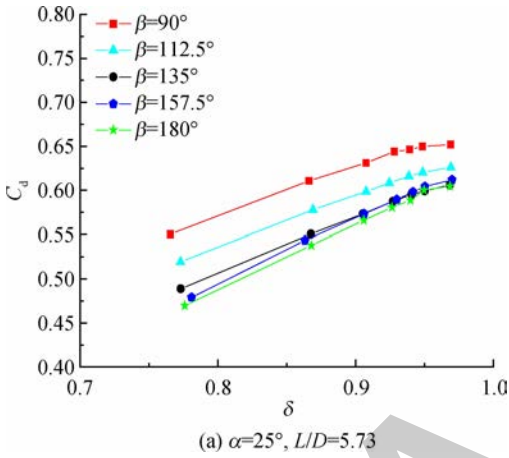


图5 压差对压降系数的影响
Fig. 5 Effect of pressure drop on the pressure drop coefficient

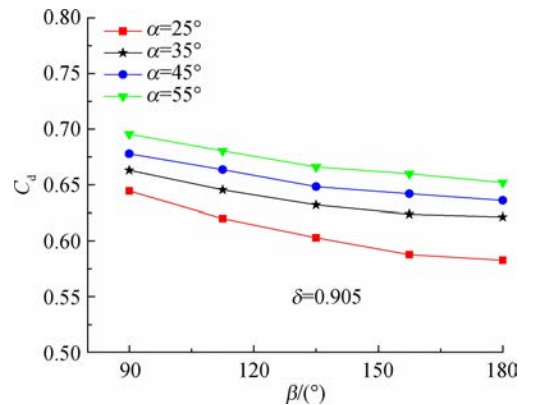


图6 偏角对复合角发散孔流量系数的影响
Fig. 6 Effect of the deflected angle on discharge coefficient

散孔内气流充满程度降低,即减小了发散孔内气流的实际有效流通面积。因此,偏转角增大后,发散孔流量系数下降。并且,发散孔流量系数在偏

角 β 处于 $90^\circ \sim 135^\circ$ 时变化较大,当偏角 β 大于 135° 之后,流量系数变化较小,偏角 β 为 157.5° 和 180° 时,流量系数相当,此现象在孔倾角较小时表现得更为明显。

4.3 倾角 α 对复合角发散孔流量系数的影响

图7给出了发散孔流量系数随倾角 α 的变化规律。从图中可以看出,随着发散孔倾角的增大,流量系数呈上升趋势,同时可以发现,在发散孔倾角较小时,流量系数的增加幅度较大。这是因为:发散孔倾角增大后,气流流过发散孔的路径会变短,沿程损失减小,发散孔流量系数随之上升。并且在发散孔倾角较小时,随着发散孔倾角的增大,发散孔孔长减小程度较大,而当发散孔倾角较大时,随着发散孔倾角继续增大,发散孔孔长减小的程度不再明显,因此,在发散孔倾角较小时,气流流经发散孔的沿程损失较大,即发散孔的流量系数在倾角较小时随倾角增大的幅度较大。另一方面,发散孔倾角的增大会减小气流进入发散孔的轴向偏转角度,流向偏转损失会减小,并且在发散孔进出口气流通道压差的作用下,气流流经发散孔时会冲击发散孔内壁,随着发散孔倾角的增大,冲击损失会减小。

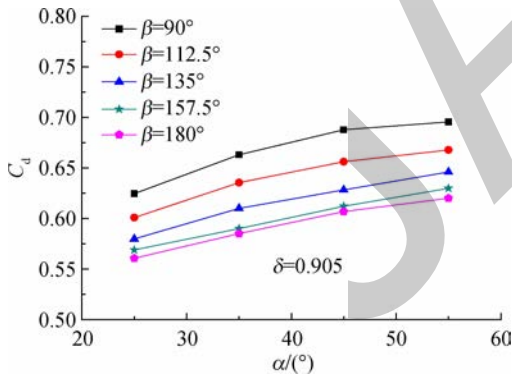


图7 倾角对复合角发散孔流量系数的影响

Fig.7 Effect of the inclined angle on discharge coefficient

5 结论

本文试验研究了逆向进气复合角发散孔的流量系数。在本文研究工况下,得到以下结论:

1) 随着发散孔倾角 α 的增大,气流流经发散孔的流向偏转损失及沿程损失都减小,复合角发散冷却孔的流量系数随着发散孔倾角的增大而增大;

2) 随着发散孔偏角 β 的增大,发散孔入口气流展向偏转损失增大,发散孔内实际流通面积降

低,复合角发散冷却孔的流量系数随偏角 β 的增大而减小;

3) 当发散孔进出口压差小于 4000 Pa 时,流量系数随压降系数 δ 的增长呈近似线性增长;当主次流压差大于 4000 Pa 后,流量系数随压降系数 δ 的增长呈非线性增长且增长趋势减缓。

参考文献:

- [1] 朱惠人,许都纯,刘松龄,等.气膜孔形状对流量系数影响的实验研究[J].推进技术,1998,19(1):41-45.
ZHU Huiren, XU Duchun, LIU Songling, et al. The experimental investigation in the effects of film cooling holes shape on discharge coefficient[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(1): 41-45. (in Chinese)
- [2] 曹宗华,何跃龙.具有复合角的多斜孔板流量系数研究[J].燃气涡轮试验与研究,2011,24(4):28-31.
CAO Zonghua, HE Yuelong. Research on the discharge coefficient of the inclined multi-hole plates with compound angle[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(4): 28-31. (in Chinese)
- [3] 杨卫华,马国锋,张靖周,等.气膜冷却孔几何结构对流量系数的影响[J].推进技术,2005,26(5):413-416.
YANG Weihua, MA Guofeng, ZHANG Jingzhou, et al. Influence of geometrical construction of film cooling hole on discharge coefficient[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(5): 413-416. (in Chinese)
- [4] DITTRICH R T, GRAVES C C. Discharge coefficient for combustor liner air entry holes: I circular holes with parallel flow[R]. NACA-TN-3663, 1956.
- [5] GRITSH M, SCHULZ A, WITTIG S. Method of correlating discharge coefficients of film cooling holes[R]. AIAA Journal, 1998, 36(6): 976-980.
- [6] GRITSH M, SCHULZ A, WITTIG S. Effect of crossflows on the discharge coefficient of film cooling holes with varying angles of inclination and orientation[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(10): 781-787.
- [7] HAY N, SPENCER A. Discharge coefficients of cooling holes with radiused and chamfered inlets[J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114(4): 701-706.
- [8] HAY N, LAMPARD D, BENMANSOUR S. Effect of crossflows on the discharge coefficient of film cooling holes[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1983, 105(2): 243-248.
- [9] BURD S W, SIMON T W. Measurements of discharge coefficients in film cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(2): 243-248.
- [10] BUNKER R S, BAILEY J C. Film cooling discharge coefficient measurements in a turbulated passage with internal crossflow[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(4): 774-780.
- [11] SAMIR R, ROBERT R, SAUGATA C. Imprinted effusion modeling and dynamic cd calculation in gas turbine com-

- bustors[R]. ASME Paper 2012-GT-68804, 2012.
- [12] 樊慧明, 朱惠人, 李广超. 主流逆压力梯度下气膜孔流量系数的实验[J]. 推进技术, 2009, 30(4): 405-410.
FAN Huiming, ZHU Hui ren, LI Guangchao. Experiments of discharge coefficient of film cooling holes under adverse pressure gradient[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(4): 405-410. (in Chinese)
- [13] 张弛, 赵梦梦, 林宇震, 等. 弯曲壁面上开孔倾角对气膜孔流量系数的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1127-1131.
ZHANG Chi, ZHAO Mengmeng, LIN Yuzhen, et al. Effect of inclined angle on discharge coefficient of the discrete holes in curved wall[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1127-1131. (in Chinese)
- [14] 张效伟, 朱惠人, 张霞, 等. 小尺度孔的流量系数试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2479-2485.
ZHANG Xiaowei, ZHU Hui ren, ZHANG Xia, et al. Experiment of discharge coefficients for small scale cylindrical holes[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2479-2485. (in Chinese)
- [15] 方韧, 林宇震, 李彬, 等. 燃烧室多斜孔壁流量系数研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(1): 61-64.
FANG Ren, LIN Yuzhen, LI Bin, et al. Discharge coefficients of inclined multi-hole wall cooling in a combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(1): 61-64. (in Chinese)
- [16] ROWBURY D A, OLDFIELD M L G, LOCK G D, et al. A method for correlating the influence of external crossflow on the discharge coefficients of film cooling holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 258-265.

(编辑: 李岩梅)