

环状喷口对底排尾部流场影响的数值模拟

余文杰, 余永刚

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了增强底排尾部流场中增压减阻的效果, 提出一种环状喷口模型。采用有限体积法编程求解二维轴对称 Navier-Stokes 方程, 对底排尾部流场进行数值模拟。数值模拟和底排实验进行对比验证, 结果较吻合。在此基础上, 数值研究环状喷口对底排尾部流场的影响。结果表明, 随排气参数增大, 环状喷口模型的底压始终高于圆孔喷口模型的底压。和圆孔喷口相比, 环状喷口能削弱环状回流区, 使底排气体更容易流入剪切层, 避免引射现象的发生。环状喷口越靠近底部边缘, 底排的增压减阻效果越好。

关键词: 流体力学; 底部排气; 尾部流场; 数值模拟; 环状回流区; 环状喷口

中图分类号: TJ55; V211.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.009

1 引言

弹箭在超音速飞行时, 由于底部存在低压回流区, 会遇到较大的底部阻力。向低压回流区内排气, 可以增大底部压力, 有效减小底部阻力^[1]。

Bowman 等^[2]对底排单喷口模型和多喷口模型进行了冷排气实验研究, 发现多孔排气时底部压力明显增加。陈少松等^[3-4]对多种单喷口模型进行了冷排气和热排气实验研究, 发现冷排气时排气口尺寸对底压影响较大, 热排气时排气口尺寸对底压无明显影响。Dutton 等^[5-6]对底排尾部流场进行了可视化, 实验研究了圆孔喷口底排模型的尾部流场。Sahu 等^[7]最先运用冷排气的方法对底排尾部流场进行数值研究, 发现随排气参数的变化底压先增加再减小。Choi 等^[8]根据端羟基聚丁二烯 (HTPB) 和高氯酸铵 (AP) 的燃烧特性, 建立氢气和一氧化碳的燃烧模型, 对底排弹全流场进行了数值模拟。陆中兵等^[9]对底部排气弹三维湍流流场进行了数值模拟。陈新虹等^[10]数值研究了排气能量对底排弹气动特性的影响。Shin 等分别采用大涡模拟^[11]和直接模拟^[12]的方法对底排尾部流场进行了数值模拟, 研究尾部回流区的大小和形状。

收稿日期: 2013-10-22; 修回日期: 2014-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51176076)

作者简介: 余文杰 (1986-), 男, 博士研究生, 主要从事底排装置尾部流场数值模拟相关研究。e-mail: spacecow@sina.com

通信联系人: 余永刚 (1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事含能材料推进理论及技术相关研究。

目前, 关于环状喷口底排模型的实验研究和数值模拟未见文献报道。

向尾部低压区域排入气体, 气体经过环状回流区和主回流区之间的狭缝进入剪切层。流入剪切层的底排气体改变了剪切层的结构, 使得分离流线变得平直, 从而削弱外部的膨胀波和激波强度。外部的变化又进一步影响到内部, 最终使模型底部压力增大。外部剪切层和底排射流剪切层之间的环状回流区的存在, 使得底排气体不能立即有效的流入剪切层, 对底排减阻具有不利影响。另外当排气参数较大时, 会出现引射现象, 使底压迅速下降。如果能够削弱或消除环状回流区, 使底排气体更容易流入剪切层, 并且减缓引射现象的出现, 那么底部压力将明显增大。基于以上观点, 本研究提出一种环状喷口模型, 并对模型的尾部流场进行数值研究。

2 控制方程

假设尾部流场轴对称, 湍流模型选用 SST 模型。微分形式的二维轴对称 Navier-Stokes 方程如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial r} - \frac{\partial F_v}{\partial x} - \frac{\partial G_v}{\partial r} = Q + W \quad (1)$$

$$U = [\rho, \rho u, \rho v, e, \rho k, \rho \omega] \quad (2)$$

$$F = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (e+p)u, \rho ku, \rho \omega u] \quad (3)$$

$$G = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (e+p)v, \rho kv, \rho \omega v] \quad (4)$$

$$F_v = \left[0, \tau_{xx}, \tau_{xr}, q_x, (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x}, (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] \quad (5)$$

$$G_v = \left[0, \tau_{xr}, \tau_{rr}, q_r, (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial r}, (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial r} \right] \quad (6)$$

$$Q = -\frac{v}{r} [\rho, \rho u, \rho v, e + p, \rho k, \rho \omega] \quad (7)$$

$$W = [0, 0, 0, 0, S_k, S_w] \quad (8)$$

式中, U 为守恒向量; F, G 为对流矢量通量; F_v, G_v 为粘性矢量通量; Q 为轴对称源项; W 为湍流源项; u, v 分别为轴向速度和径向速度 $m \cdot s^{-1}$; ρ 为密度 $kg \cdot m^{-3}$; p 为压力 $N \cdot m^{-2}$; k 为湍动能 $m^2 \cdot s^{-2}$; ω 为湍动能耗散率 $m^2 \cdot s^{-3}$; τ 为粘性应力 $N \cdot m^{-2}$; e 为单位体积总能 $J \cdot m^{-3}$; μ, μ_t 分别为分子粘性系数和湍流粘性系数 $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$; q_x, q_r 为导热热流 $W \cdot m^{-2}$; 系数 σ_k, σ_ω 以及湍流源项中 S_k, S_w 的给定方法参见Menter的文献^[13]。

3 数值计算模型和方法

模型为圆柱体结构,其轴向及径向截面示意图如图1所示。其中, x, r 坐标方向分别表示轴向和径向, m ; R 为底部半径, m ; r_j 为圆孔喷口半径, m ; r_{j1}, r_{j2} 分别为环状喷口内、外壁半径, m ; Ma_∞ 为来流马赫数; ρ_∞ 为来流压力, $N \cdot m^{-2}$; T_∞ 为来流温度, K ; T_j 为排气温度, K ; I 为排气参数, 形式如下:

$$I = \frac{\dot{m}_j}{A_b \rho_\infty U_\infty} \quad (9)$$

式中, \dot{m}_j 为质量流率, $kg \cdot s^{-1}$; A_b 为底部面积, m^2 ; ρ_∞ 为来流密度, $kg \cdot m^{-3}$; U_∞ 为来流速度, $m \cdot s^{-1}$ 。数值计算时忽略加强筋对尾部流场的影响, 仍采用二维轴对称的方程求解。具体参数如表1所示, 两种喷口相对于底部的面积比均为16%。

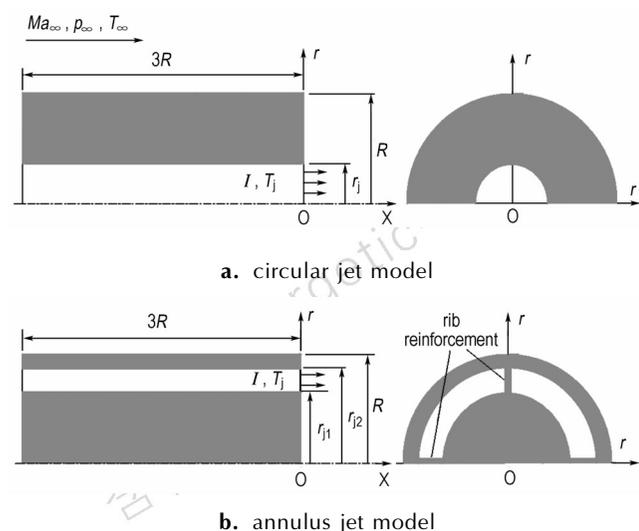


图1 底排模型示意图

Fig.1 Schematic of base bleed model

表1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

Ma_∞	T_∞ /K	p_∞ /Pa	T_j /K	I	R /mm	r_j /R	r_{j1} /R	r_{j2} /R
2.47	300	101325	293	0~0.0317	31.75	0.4	0.693	0.8

Note: Ma_∞ is free stream Mach number, T_∞ is free stream temperature, p_∞ is free stream pressure, T_j is injection temperature, I is injection parameter, R is the radius of the axisymmetric body, r_j is the radius of the circular jet, r_{j1} is the inner radius of the annulus jet, r_{j2} is the outer radius of the annulus jet.

4 模拟方法

采用有限体积法编程求解 Navier-Stokes 方程。对流项通过改进的 AUSM+格式加入 Van Leer 限制器离散^[14], 粘性项采用二阶中心差分格式离散, 时间离散采用 LU-SGS 隐式时间推进方法^[15], 湍流和 Navier-Stokes 方程之间采用全耦合方法求解。

图2为圆孔喷口模型尾部区域的网格图。图中远场采用无反射边界条件, 固壁采用无滑移边界条件, 中心轴线上采用对称边界条件, 底排喷口处给定排气温度和排气参数。

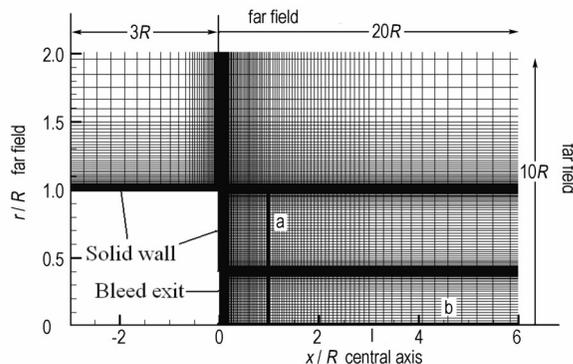


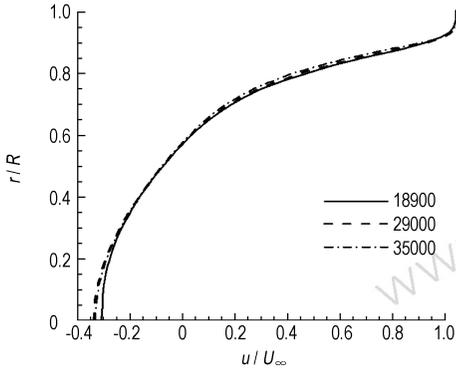
图2 圆孔喷口模型尾部区域网格(网格数为35000)

Fig.2 Grids of the base region for circular jet model with the number of grids of 35000

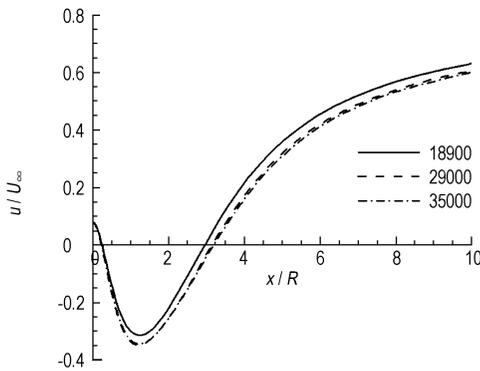
网格采用弧长法生成^[16]。选取了多套网格进行比较, 以减小流场计算对网格的依赖性。

对于圆孔喷口模型, 选取网格数分别为18900、29000、35000的3套网格进行比较, 对图2中a、b两处的轴向速度进行研究。得到的速度分布如图3所示, 其中 U_∞ 为来流速度。从图3a中可以看出, 网格数量对径向上靠近中轴线的流场有较大影响。由图3b中可以看出, 网格数量对出喷口之后不久的中轴线上整个流场都有较大的影响。当网格数量大于29000

后, 两图中轴向速度分布变化非常小, 认为此时流场计算不受网格的影响。考虑到不同排气参数时网格影响可能不同, 选用网格数为 35000 的这套网格作为计算网格。环状喷口模型采用相同的方法选用网格数为 38000 的一套网格作为计算网格。



a. axial velocity distributions along radial direction ($x/R=1.0$)



b. axial velocity distributions on central axis

图 3 不同的网格数量对圆孔喷口模型尾部流场的影响 ($I=0.0038$)

Fig. 3 Influence of grids number on the base flow of the circular jet model ($I=0.0038$)

5 数值模拟结果与分析

5.1 实验对比

选择 Dutton^[5] 的底部冷排气实验进行对比验证。实验模型为圆柱体结构, 排气口为口径 0.4 倍底部直径的圆孔, 来流马赫数为 2.47。针对实验模型及条件进行了数值模拟, 和实验进行了底压和尾部速度场的对比。

图 4 为底部平均压强随排气参数变化曲线。由图 4 可见, 随着排气参数的增加, 数值模拟的底部面积平均压强先增大再减小, 压力峰值出现的位置与实验值 ($I=0.0148$) 相近, 底压变化趋势和实验值较吻合。

图 5 为 $I=0.0038$ 时底部压力沿径向分布曲线。图 5 中可以看出, 数值模拟的底部压力沿径向分布很平直, 和实验结果非常相似。

图 6 为 $I=0.0038$ 时尾部区域轴向速度等值线图, 其中轴向速度用来流速度 U_∞ 无量纲化, S_f 、 S_r 分别为前滞点和后滞点。由图 6 可见, 模拟的尾部回流区大小、形状以及前后滞点位置和实验值基本吻合。

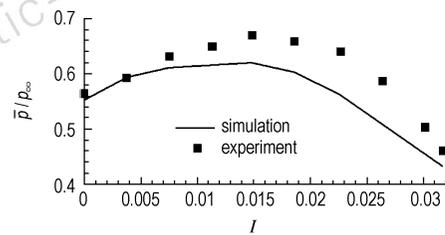


图 4 底部平均压强随排气参数变化曲线

Fig. 4 Curve of area-averaged base pressure with different injections

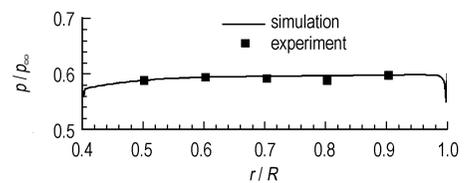
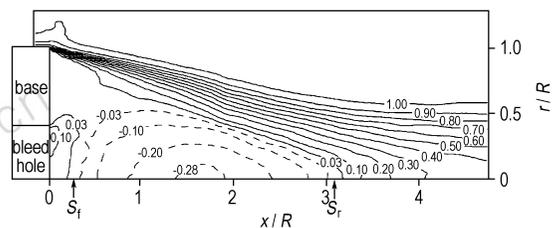
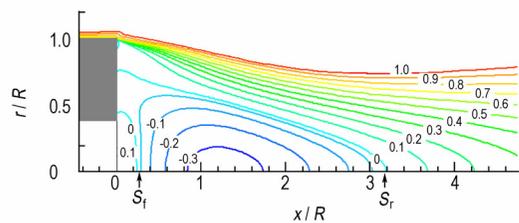


图 5 底部压力沿径向分布曲线 ($I=0.0038$)

Fig. 5 Base pressure distributions along radial direction ($I=0.0038$)



a. experiment



b. simulation

图 6 模型尾部区域轴向速度等值线的实验与模拟对比 ($I=0.0038$)

Fig. 6 Comparison of axial velocity isograms of base region between experimental and simulation ($I=0.0038$)

5.2 环状喷口模型和圆孔喷口模型的对比

根据表 1 中的数据对底排尾部流场进行数值预测,通过两种喷口模型的底部压力、尾部波系和尾部速度场的对比,研究环状喷口对底排尾部流场的影响。

图 7 为圆孔喷口模型和环状喷口模型底压随排气参数变化曲线的对比。图 7 中可以看出:环状喷口模型的底压分布曲线处于圆孔喷口模型底压分布曲线之上,并且环状喷口模型的底压分布曲线更加平直。在小排气参数时($I < 0.005$),环状喷口模型底部压力迅速增加。随排气参数的增加($0.005 < I < 0.02$),环状喷口模型底部压力保持比圆孔喷口模型的底部压力高出 3% ~ 12%。在大排气参数下($I > 0.02$),环状喷口模型底部压力几乎没有下降的趋势,远大于圆孔喷口模型底压。

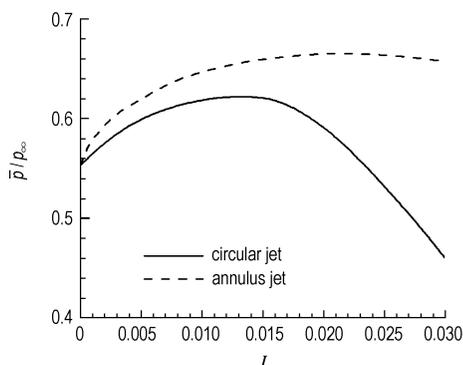


图 7 两种喷口模型底部平均压强随排气参数变化曲线
Fig.7 Curves of area-averaged base pressure with different injections parameters for two jet models

图 8 为模型尾部密度等值线对比图。其中图 8a 为两种喷口模型与无底排模型的尾部密度等值线对比,图 8b 为两种喷口模型在大排气参数下的尾部密度等值线对比。由图 8a 可以看出:无底排时,尾部拐角处膨胀角最大,下游喉部尺寸最小,再压缩激波最强。有底排时,两种喷口模型的尾部膨胀角都变小,分离流线都变得平直,再压缩激波强度都被减弱,都有利于底排增压减阻。由图 8b 可以看出:在大排气参数时,圆孔喷口模型的尾部膨胀角变大,再压缩激波位置向上游移动,强度增大。波系发生了明显变化,不利于底排增压减阻。而环状喷口模型尾部的波系没有发生明显的变化。

图 9 为模型尾部马赫数分布图,图中曲线为流线。图 9a 为无底排时的尾部流场图,由图 9a 可知,在模型底部和剪切层之间存在一个大的回流区。图 9b、图 9c 为两种喷口模型在小排气参数时的尾部流场图,从

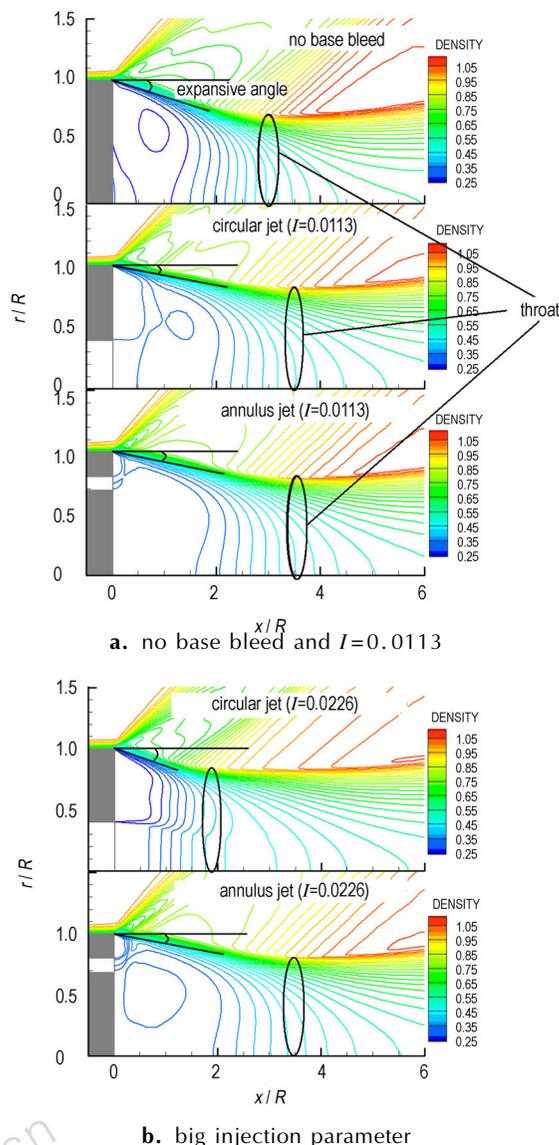


图 8 两种喷口模型尾部区域密度等值线
Fig.8 Density isograms of base region for two jet models

图 9b 和图 9c 可以看出,圆孔喷口模型尾部的底排气体出喷口后立即折转流入剪切层,没有形成环状回流区。反而环状喷口模型尾部出现了环状回流区,但是回流区尺寸很小,环状喷口又离剪切层很近,底排气体依然能比圆孔喷口模型的底排气体更迅速有效的流入剪切层。所以在小排气参数时,环状喷口排气对模型底部压力的增加更能起到立竿见影的作用。图 9d、图 9e 为两种喷口模型在 $I=0.0113$ 时的尾部流场图,从图 9d 和图 9e 可以看出,随着排气参数的增大,圆孔喷口模型尾部出现环状回流区,且其尺寸较大,使得底排气体不能直接有效的进入剪切层。而环状喷口由于能削弱环状回流区的强度,模型尾部的环状回流区只

是稍微增大,底排气体能很容易流入剪切层。图 9f、图 9g 为两种喷口模型在大排气参数时的尾部流场图,从图 9f 和图 9g 可以看出,圆孔喷口模型尾部的主回流区消失,出现了引射现象,这会使底压迅速下降。而环状喷口模型尾部的主回流区并没有变小,没有出现引射现象,并且环状回流区只是稍稍增大,底排气体仍能很容易的流入剪切层,这使得环状喷口模型在大排

气参数下仍具有较好的增压减阻的效果。从图 9 中还可以看出,圆孔喷口模型尾部回流区的变化受排气参数的影响很大,而环状喷口模型尾部回流区的变化受排气参数的影响较小。正因为此,环状喷口模型的底压随排气参数的分布曲线才更加的平直。在底排工作期间,受到飞行环境的影响,排气参数会有所波动。环状喷口可以减小这种波动所带来的影响。

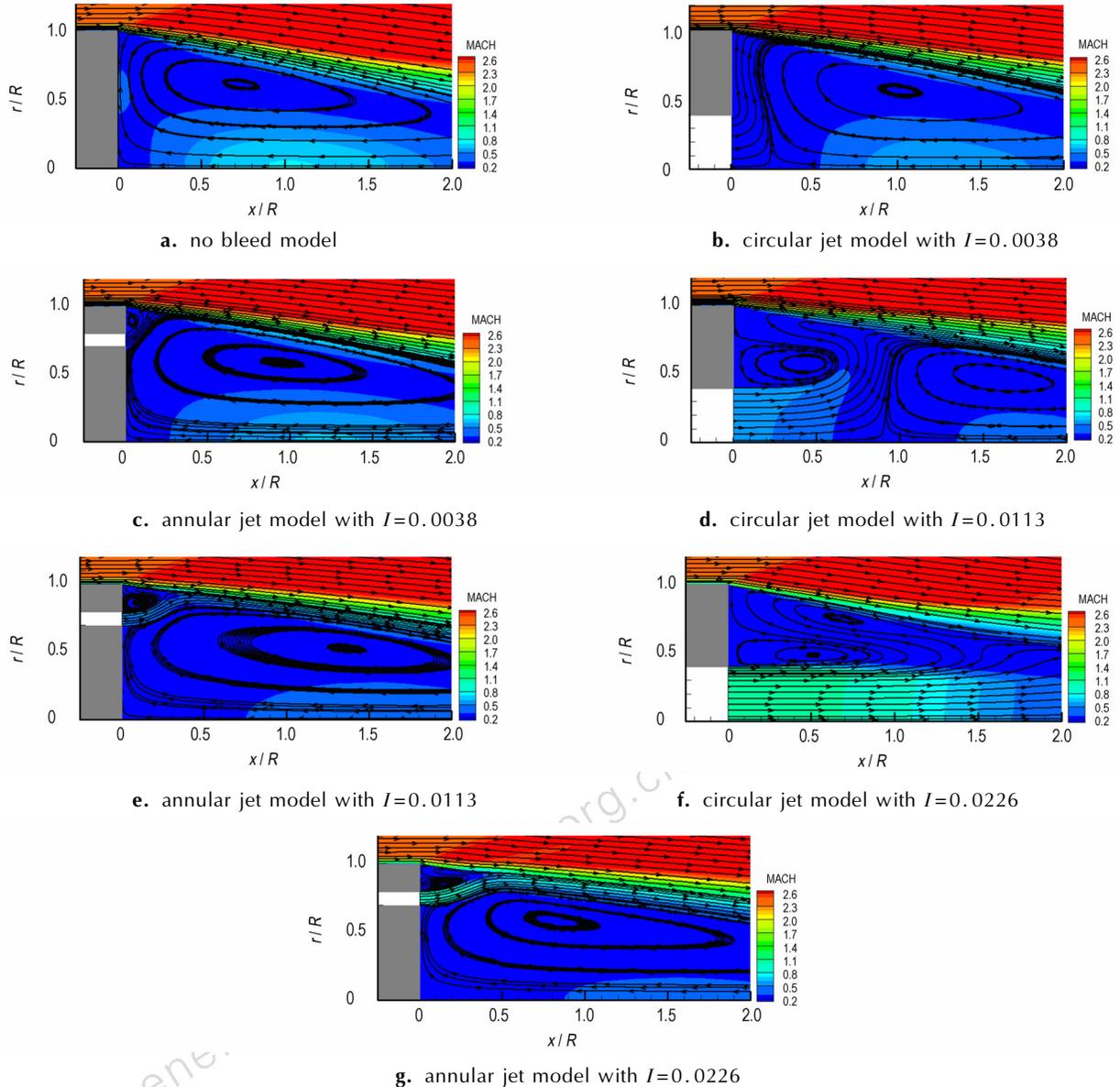


图 9 两种喷口模型尾部马赫数分布

Fig.9 Mach number contours of base region for two jet models

5.3 不同环状喷口模型的对比

对 A、B、C 3 种环状喷口模型进行对比,研究喷口位置对模型底部压力和尾部流场的影响。3 种喷口的位置分布如表 2 所示,其中喷口相对于底部的面积比都为 16%。

图 10 为 3 种环状喷口模型底压随排气参数变化曲线对比图。从图 10 中可以看出:环状喷口的位置变化对底压的增加有明显影响,且随着排气参数的增加影响不断增大。喷口位置越靠近底部边缘,底排的

增压效果越好。

图 11 为环状喷口模型尾部马赫数分布图,图中曲线为流线,排气参数为 0.0148。从图 11 中可以看出:环状喷口越靠近底部边缘,尾部的环状回流区越小,底排气体越容易流入剪切层。对于 A 模型,尾部的环状回流区非常小,底排气体几乎直接流入剪切层,它的底排增压效果最好。

表 2 环状喷口尺寸

Table 2 Size of annulus jet

$A(r_{j1}/R)$	$A(r_{j2}/R)$	$B(r_{j1}/R)$	$B(r_{j2}/R)$	$C(r_{j1}/R)$	$C(r_{j2}/R)$
0.862	0.95	0.693	0.8	0.512	0.65

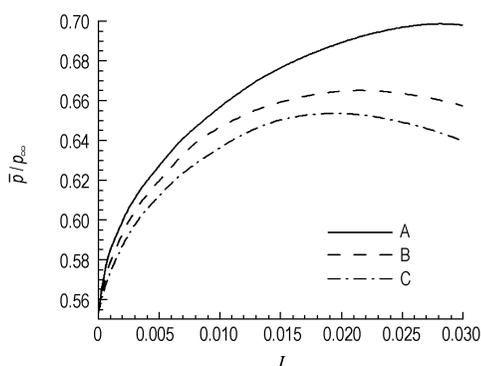


图 10 环状喷口模型底部平均压强随排气参数变化曲线图

Fig. 10 Curves of area-averaged base pressure with different injections parameters for annular jet model

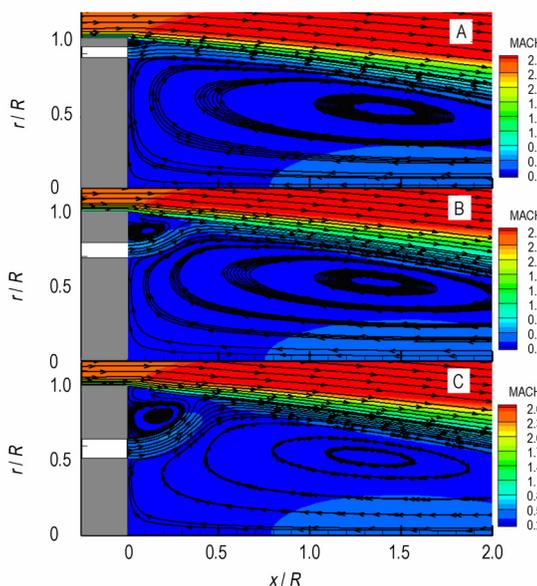


图 11 环状喷口模型尾部马赫数分布 ($I=0.0148$)

Fig. 11 Mach number contours of base region for annular jet model ($I=0.0148$)

6 结 论

(1) 随排气参数变化,环状喷口模型的底压始终高于圆孔喷口模型的底压,并且环状喷口模型的底压分布曲线更加平直。在大排气参数下,环状喷口模型仍具有很好的底排增压减阻效果。

(2) 与圆孔喷口相比,环状喷口能削弱环状回流区,使底排气体更容易流入剪切层,避免引射现象的发生,有效降低排气参数的波动对尾部流场的影响。

(3) 环状喷口的位置变化对底压的增加有明显影响,且随着排气参数的增加影响不断增大。喷口位置越靠近底部边缘,尾部的环状回流区越小,底排气体越容易流入剪切层,底排的增压效果越好。

参考文献:

- [1] 郭锡福. 底部排气弹外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
GUO Xi-fu. Exterior ballistics of base bleed projectiles[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995.
- [2] Bowman J E, Clayden W A. Cylindrical afterbodies in supersonic flow with gas ejection[J]. *AIAA Journal*, 1967, 5(6): 1524-1525.
- [3] 丁则胜, 邱光纯, 刘亚飞, 等. 固体燃料底部排气空气动力学研究[J]. *空气动力学报*, 1991, 9(3): 300-307.
DING Ze-sheng, QIU Guang-chuen, LIU Ya-fei, et al. An aerodynamic investigation of base bleed by solid fuel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1991, 9(3): 300-307.
- [4] 陈少松, 丁则胜, 罗荣, 等. 底排冷空气排气参数对模型底部流场的影响[J]. *弹道学报*, 1994(2): 59-63.
CHEN Shao-song, DING Ze-sheng, LUO Rong, et al. The effect of bleed parameters on model base flow field of base bleed cold air[J]. *Journal of Ballistics*, 1994(2): 59-63.
- [5] Mathur T, Dutton J C. Base bleed experiments with a cylindrical afterbody in supersonic flow[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1996, 33(1): 30-37.
- [6] Bourdon C J and Dutton J C. Visualization of a central bleed jet in an axisymmetric compressible base flow[J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(2): 499-510.
- [7] Sahu J, Nietubicz C J, Steger J L. Navier-Stokes computations of projectile base flow with and without base injection[J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(9): 1348-1355.
- [8] Choi J Y, Shin E, Kim C K. Numerical study of base-bleed projectile with external combustion [C] // AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit. Tucson, Arizona: AIAA, 2005.
- [9] 陆中兵, 丁珏, 周彦煌, 等. 超声速飞行底部排气弹三维湍流流场数值模拟[J]. *南京理工大学学报*, 2007, 31(1): 27-30.
LU Zhong-bing, DING Jue, ZHOU Yan-huang, et al. Numerical investigation of 3-D turbulent flow fields for supersonic flying base bleed projectile[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007, 31(1): 27-30.
- [10] 陈新虹, 黄华, 周志超, 等. 排气能量对底部排气弹气动特性影响的数值模拟[J]. *兵工学报*, 2010, 31(4): 447-452.
CHEN Xin-hong, HUANG Hua, ZHOU Zhi-chao, et al. Nu-

- merical simulation of base bleed energy affecting aerodynamic performance of base bleed projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 447-452.
- [11] Shin J R, Cho D R, Won S H, et al. Hybrid RANS/LES study of base-bleed flows in supersonic mainstream [C] // AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Dayton, Ohio: AIAA, 2008.
- [12] Shin J R, Choi J Y. DES study of base and base-bleed flows with dynamic formulation of DES constant [C] // AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, Florida: AIAA, 2011.
- [13] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [14] 梁德旺, 王可. AUSM+格式的改进 [J]. *空气动力学学报*, 2004, 22(4): 404-409.
LIANG De-wang, WANG Ke. Improvement of AUSM+ scheme [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2004, 22(4): 404-409.
- [15] Yoon S, Jameson A. Lower-upper symmetric- gauss-seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations [J]. *AIAA Journal*, 1988, 26: 1025-1026.
- [16] 武频, 赵润祥, 郭锡福. 弧长网格生成法及其应用 [J]. *南京理工大学学报*. 2002, 26(5): 482-485.
WU Pin, ZHAO Ruen-xiang, GUO Xi-fu. Arc length method of grid generation and its application [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(5): 482-485.

Numerical Simulation on Effects of Annular Jet in Base Flow of Base Bleed

YU Wen-jie, YU Yong-gang

(Department of Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An annular jet model was proposed to improve the turbo-charge and anti-drag effect of base bleed in tail flow field. Two-dimensional axisymmetric Navier-Stokes equations was computed using a finite volume scheme, and the tail flow field of base bleed was simulated. The simulation results were validated with experimental data well. Based this, the influence annular jet upon the tail flow field of base bleed was investigated. Results show that the base pressure of annular jet model is always higher than that of circular jet model with the increase of the injection parameters. Compared with circular jet, annular jet can weaken the strength of annulus recirculation. It makes bleed gases flow into the shear layer more easily and can avoid the occurrence of the ejector. The smaller the distance between the annular jet and the base edge, the better the benefits of base bleed.

Key words: fluid mechanics; base bleed; tail flow field; numerical simulation; annulus recirculation; annulus jet

CLC number: TJ55; V211.3

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.009