

预旋进气的盘腔系统内流场的数值研究*

白洛林, 冯 青, 刘松龄, 卜其龙

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 用 CFD 软件 (FLUENT6.0.12) 对预旋进气的盘腔进行了数值模拟, 计算中采用了多种湍流模型, 包括 Spalart-Allmaras 单方程、K-epsilon 和 K-omega 多种双方程模型, 结果表明 Spalart-Allmaras 模型与结果符合得较好; 通过计算研究了流场结构, 流场主要由两个参数旋转比 β_p 和湍流参数 λ_T 控制, λ_T 主要决定源区的大小, 计算结果验证了自由涡流的存在, 并且盘腔压力分布的计算值与理论曲线符合得很好。

关键词: 旋转盘腔; 涡轮盘; 湍流模型; 流动分布; 数值仿真

中图分类号: V232.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 02-0135-04

Numerical investigation on preswirl flow in rotating disc system

BAI Luo-lin, FENG Qing, LIU Song-ling, BU Qi-long

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: The flow in preswirl rotor-stator system was analyzed and simulated using a CFD code (FLUENT6.0.12). Different turbulence models were adopted in computation including Turbulence Spalart-Allmaras, K-epsilon, and K-omega. Among these, Spalart-Allmaras model stood out as a better solution. The flow structure was mainly controlled by two parameters swirl ratio β_p and turbulence parameter λ_T , by which the range of source region was determined. The results demonstrate the existence of free vortex. The distributions of pressure by computing agree well to the theory.

Key words: Rotating disk cavity; Turbine wheel; Turbulence model; Flow distribution; Numerical simulation

1 引言

在现代航空发动机中,从压气机引出的一小部分压缩空气,一部分用来冷却涡轮叶片和涡轮导向叶片,另一部分用来冷却和密封涡轮盘。空气冷却涡轮盘后,从静子-转子密封处流出,防止了主流燃气入侵到盘腔中。冷却空气还通过静止机匣上的预旋喷嘴冷却叶片,喷嘴使空气沿着盘的旋转方向旋转来降低相对于叶片的冷却空气的温度。本文对带有预旋进气的“盖板”盘腔进行了研究,分别从流体的结构、压力分布等方面对结果进行了讨论。

2 计算模型

2.1 控制方程

对于稳态的不可压流动,描述旋转盘腔流体流动的二维轴对称控制方程可以写成以下形式:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho W \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r U \phi) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi,z}) \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma_{\phi,r}) \frac{\partial \phi}{\partial r} + S_{\phi} \quad (1)$$

ϕ 表示总的因变量,分别取 l, u, v, w , 就可以得到连续方程和动量方程。方程中 $\Gamma_{\phi,z}$ 和 $\Gamma_{\phi,r}$ 分别表示沿轴向和沿径向的扩散率。

2.2 湍流模型

采用的 S-A 模型的方程具体形式如下:

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right\} - Y_v \quad (2)$$

式中 $\bar{v}$ 为湍流动力粘度, σ_v 和 C_{b2} 为常数, G_v 和 Y_v 是由于壁面的阻碍和粘性阻尼作用产生的对湍流粘度的产生和破坏项^[1]。

* 收稿日期: 2002-04-15; 修订日期: 2002-09-23。

作者简介: 白洛林 (1976—), 男, 博士, 研究领域为传热与传质。

2.3 网 格

本文计算采用了 FLUENT 软件,几何模型如图 1 所示,采用了文献[2]的模型尺寸,其中 $r_1 = 80\text{mm}$,预旋气体入口处 $r_2 = 90\text{mm}$, $r_3 = 100\text{mm}$,冷气出口处 $r_4 = 200\text{mm}$,转盘内径 $b = 207\text{mm}$, $S_1 = 10\text{mm}$, $S_2 = 10\text{mm}$,入口和出口处的面积采用了等效面积处理方法。在计算过程中采用了二维稳态轴对称模型,网格模型见图 2, Spalart-Allmaras 湍流模型对壁面网格要求比较高^[1],为了得到最好的计算结果, y^+ 最好在 1 左右。为了达到这个要求,径向和轴向网格分布为 255×135 个,并且在出口处网格加密。

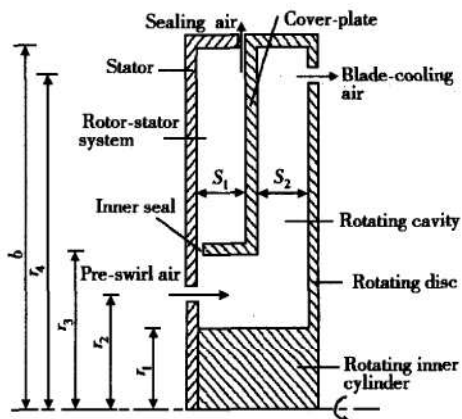


Fig.1 Schematic diagram of preswirl system

3 结果讨论

3.1 湍流模型的研究

计算中选用了多个湍流模型,包括 Spalart-Allmaras 单方程、K-epsilon 和 K-omega^[1]等。如图 3(质量流量 $C_w = m/\mu b$, 旋转雷诺数 $Re_\phi = \rho \Omega b^2/\mu$, 湍流参数 $\lambda_T = C_w/Re_\phi^{0.8}$, m 为进口质量流量, ρ 为密度, μ 为动力粘度, Ω 为旋转角速度)为 $z/S_2 = 0.5$ (z 表示轴线方向)截面的旋转比 $\beta = V_\phi/\Omega r$ 随 x^{-2} ($x = r/b$) 的变化曲线。按理想自由涡流理论,存在:

$$V_\phi/\Omega r = \beta (r_1/r)^2 = \beta_p (x_1/x)^2 \quad (3)$$

即 $V_\phi/\Omega r$ 和 x^{-2} 呈线性关系,考虑到入口和涡流损失,引入有效预旋系数 $\beta_{p,eff}$ (下标 p 表示入口):

$$V_\phi/\Omega r = \beta_{p,eff} (x_1/x)^2 \quad (4)$$

由文献[2]得到:

$$\beta_{p,eff} = 1.034\beta_p - 0.443\beta_p^2 \quad (5)$$

由图 3 可见,在入口处 (x^{-2} 大约为 4), 各种模型差别较大,而进入盘腔的中后部,差别变得很小,甚至

层流模型计算也相差不大。这是由于涡轮盘腔的核心区为无粘流,湍流模型的改变对这个区域的影响很小,而在入口处由于是流动发展段,壁面的影响较大,加上回流区的影响,粘性的影响比较大,不同模型对湍流粘度的处理不同,从而引起差别。而 Spalart-Allmaras 单方程模型同有效的自由涡流线比较吻合,此湍流模型特别适用于航空领域有壁面的流动和涡轮机械的应用。下面的计算中用此模型进行研究。

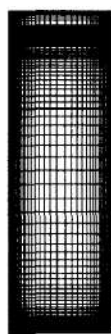


Fig.2 Grid distribution in computation

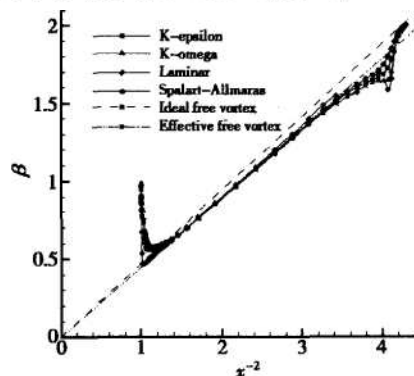


Fig.3 Computed variation of $V_\phi/\Omega r$ with x^{-2} for $C_w = 5.82 \times 10^3$, $\lambda_T = 0.1$, $\beta_p = 2$

3.2 计算流场结构

对于具有径向出流或入流的轴对称旋转盘流动, 1968 年 Hide^[3] 利用照片首先证明有出流的层流流动可分为四种类型的区域,对于入流流动也有相同的结构。进一步研究表明湍流流动(入流和出流)也有这样的结构。这四种区域包括:源区;附着在盘子上的埃克曼边界层,它的体积流量是常数;Sink layer,它重新把流体从埃克曼边界层分配到出口;核心区,此处流体的轴向和径向速度为零,而切向速度独立于径向坐标。

在有出流的旋转盘腔内存在着角动量守恒的一个源区,来流从此流入到盘面的埃克曼边界层中。如果来流比盘腔旋转得快 ($\beta > 1.0$),在边界层上就会有径向入流,如果来流比盘腔旋转得慢 ($\beta < 1.0$),那么在较大的半径处就会发生边界层径向出流。图 4 表示出湍流参数 $\lambda_T = 0.1$, $C_w = 5.82 \times 10^3$ 和 $Re_\phi = 9.1 \times 10^4$ 时旋转盘腔内的计算流线分布。从图 4 中可见,随着进口预旋比 β_p 的增加,盘腔中的源区逐渐增大并达到出口的位置,同时核心区和壁面两侧的埃克曼边界层逐渐变小并消失, Sink layer 出现并减小,位于出口上部和 Sink layer 后部的回流区出现并逐渐增

大充满盘腔的后部。 $\beta_p = 1.0$ 具有典型的四种区域结构。在 $\beta_p = 1.3$ 时,流线在进口处开始收缩,此时壁面两侧出现入口回流区。随着 β_p 的增大,入口回流区逐渐沿着壁面向出口扩展。图5中的虚线表示出了 β 的位置,随着 β_p 的增大, $\beta = 1.0$ 线向出口处移动,从图可见 $\beta = 1.0$ 线也表示出了回流区的终止位置。

图5表示出 $Re_\phi = 9.1 \times 10^4$, $\lambda_T = 0.1$, $C_w = 5.82 \times 10^3$ 的 β 分布。可以看出从入口到出口 β 逐渐减小,最小值构成的等值线圈随着入口 β_p 的增加而向后移动,图中 $\beta = 1.0$ 的等值线也向后部移动。

λ_T 决定了源区的大小,从而决定了流场的结构。图6表示 $Re_\phi = 9.1 \times 10^4$, $\beta_p = 1.0$ 时旋转盘腔内的计算流线。可以看出 $\lambda_T = 0.31$ 时源区充满了整个腔体,这和Karabay H^[2]预测的 $\beta_p = 1.0$, $\lambda_T = 0.31$ 时源区充满整个腔体的结论是一致的。

3.3 自由涡流的分布

图7为盘腔中截面 $z/S_2 = 0.5$ 处的自由涡流曲线,计算结果同试验值^[4]符合得很好。图中可以看出自由涡流真实地存在于盘腔中,从入口处 $x^{-2} = 4.285$ 开始到 $x^{-2} = 1.2$ 结束。由于 $\lambda_T = 0.22$ 较大,

导致源区几乎充满整个盘腔,曲线在 $x^{-2} < 1.2$ 的范围逐渐上移而偏离线性,是由于壁面和出口的影响。

3.4 压力分布

图8表示出了盘腔中截面 $z/S_2 = 0.5$ 处核心区的压力分布。核心区可以认为是无粘流,按照无粘流理论,压力只和径向位置有关,和轴向位置无关。按照一维无粘流理论简化和推导可以得到:

$$C_p = \left\{ \beta_{p, \text{eff}}^2 + \left(\frac{\lambda_T}{2\pi G Re_\phi^{0.2}} \right)^2 \left(\frac{b}{r_1} \right)^4 \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

式中 $G = S_2/b$ 。从上式可以看出 C_p 主要由 $\beta_{p, \text{eff}}$ 决定。图8的计算压力系数只是在预旋比较小时在出口和理论值有些差别。

4 结论

(1)在计算中采用了Spalart-Allmaras模型,与结果符合得较好。流场主要由湍流参数 λ_T 和旋转比 β_p 控制, λ_T 主要决定源区的大小。

(2)得出预旋比在盘腔中的分布,从进口处开始,随着半径的增加,预旋比先减小后增加。

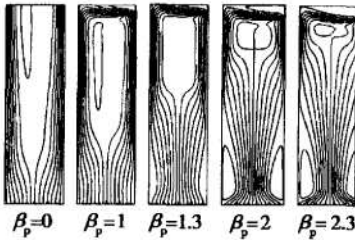


Fig.4 Effect of varying β_p on computed streamlines for $\lambda_T = 0.1$, $C_w = 5.82 \times 10^3$ and $Re_\phi = 9.1 \times 10^4$

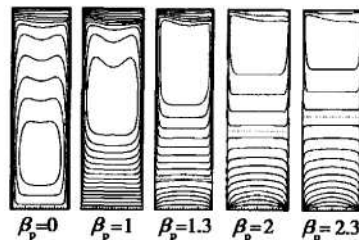


Fig.5 Effect of varying β_p on swirl ratio for $\lambda_T = 0.1$, $C_w = 5.82 \times 10^3$ and $Re_\phi = 9.1 \times 10^4$

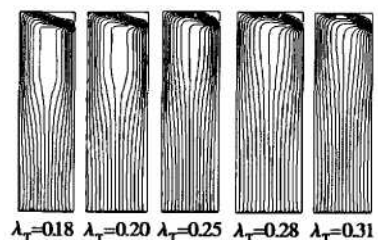


Fig.6 Effect of varying λ_T on computed streamlines for $\beta = 1.0$ and $Re_\phi = 9.1 \times 10^4$

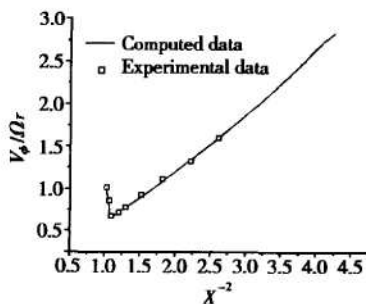


Fig.7 Comparison between computed and measured variation of with for $\beta = 4.535$, $\lambda_T = 0.22$ and $Re_\phi = 5.5 \times 10^5$

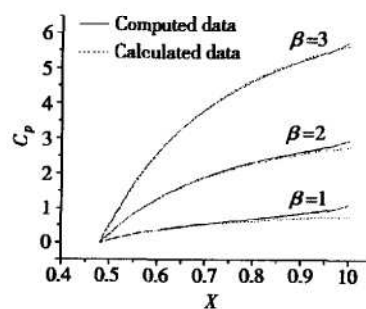


Fig.8 Distribution of C_p for $\lambda_T = 0.1$ and $C_w = 5.82 \times 10^3$

(下转第178页)

另外据化学反应动力学一般规律,化学反应是旧化学键的破坏和新化学键形成的一个过程,所需能量较大;而与化学反应有关的传质和扩散等物理过程,所需能量较少。当复杂反应受化学反应步骤控制时,表观活化能较大;而反应由物理过程所控制,则活化能较小^[7]。这就可以通过比较表观活化能的大小,来判断复杂反应的控制步骤,这一点对于推进剂的性能研究和配方调节是很重要的。所以只要通过研究——解析确定药浆动态条件下各参数是推进剂何种性能的结构指纹,就可通过流变学方法,分析和比较各种条件下有关性能变化的活化能大小,研究推进剂工艺性能和力学性能的本征规律,为控制和改进推进剂性能提供有效途径。

此外还可见,在相同动态条件下,粘合剂体系和相应药浆的动力学参数结果,并不相互对应。例如 9.5rad/s 下 G^* 求取的 ΔE_{η} 与 ΔE_{gel} ,粘合剂体系和药浆分别是 64.0kJ/(mol·K) 和 111.6kJ/(mol·K) 与 82.2kJ/(mol·K) 和 70.2kJ/(mol·K)。说明药浆固化反应确实要受到粘合剂固化体系外其它组分和条件的影响,粘合剂简单体系的固化动力学结果,一般不宜直接就用于推进剂性能研究,只能作为进一步的解析基础。这也表明,用药浆直接研究推进剂固化反应动力学,对深化推进剂性能研究将具十分有益的实际意义。

5 结 论

(1)提出的用动态流变法,直接对推进剂药浆进行固化反应研究的方法是可行的。测得了硝酸酯增塑聚醚的实验粘合剂体系和药浆样品固化的表观反应速率和表观凝胶化时间的动力学参数。

(2)推进剂药浆固化要受到其它组分和条件的影响,粘合剂简单体系和相应推进剂药浆的固化反应动力学参数并不等同,简单体系结果只可作为进一步解析药浆固化特征的基础。

(3)动态流变法研究的推进剂药浆固化反应表观动力学参数,有明显的结构指纹特征,通过研究推进剂性能和结构指纹的关系,即可对推进剂工艺性能和力学性能进行深入的理性化研究。

致 谢:王世英、郭翔和钱勛提供了实验药浆样品,对此作者深表谢忱。

参考文献:

- [1] Yee R Y, Adicoff A. Polymerization kinetics in propellants of the hydroxyl-terminated polybutadiene-isophorone diisocyanate system[J]. *J. of Appl. Polym. Sci.*, 1976, 20(4).
- [2] Nahlovsky B D. Catalysis of diol propellant binder cure reactions with isocyanates[C]. 18th ICT, 1987:39-1 ~ 39-12.
- [3] 田祥林. 三苯基铋系列对端羟基共聚酯的固化催化作用[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(4).
- [4] 罗善国, 谭惠民, 等. 聚氨酯反应体系中的相互作用[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(4).
- [5] Govindan G, Athithan S K. Studies on curing of polyurethane propellant binder system[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1994, 19(5):240 ~ 244.
- [6] 唐汉祥. 推进剂药浆粘弹性特征[J]. 推进技术, 1998, 19(4).
- [7] 孙 康编著. 宏观反应动力学及其解析方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 1998.

(编辑:朱立影)

(上接第 137 页)

(3)计算验证了自由涡流的存在, $V_{\theta}/\Omega r$ 随 x^{-2} 的分布呈直线关系,计算值与试验值符合得很好。

(4)盘腔的压力分布只和径向位置有关,和轴向位置无关。计算值与理论曲线符合得很好。

参考文献:

- [1] FLUENT 6.0 documentation[M]. *Fluent Inc*, 2001.
- [2] Karabay H, Michael Wilson, Michael J Owen. Predictions of effect of swirl on flow and heat transfer in a rotating cavity[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001, 22:143 ~

155.

- [3] Owen J M, Pincombe J R, Rogers R H. Source-sink flow inside a rotating cylindrical cavity[J]. *J. Fluid Mech*, 1985, 155:233 ~ 265.
- [4] Karabay H, Robert Pilbrow, Michael Wilson, et al. Performance of pre-swirl rotating-disc systems[J]. *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122:443.

(编辑:梅 瑛)