

徐磊磊¹, 阮 灿¹, 方晓远¹, 邢 菲¹, 赵传亮²

(1. 厦门大学 航空系, 福建 厦门 361005; 2. 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要:研究了突扩扩压器中前置扩压器各参数与总压损失和静压恢复间的关系。采用实验与FLUENT计算结合的方法,通过水槽PIV实验得出扩压器内的流场信息,对照不同的湍流模型,得出最佳的计算方案。根据此计算方案计算不同的扩张角下前置扩压器性能的变化,得出各参数之间的规律。结果表明雷诺应力模型能够较好地预测扩压器内部流场;前置扩压器扩张角存在一个最佳值,大于最佳值前置扩压器会出现流动分离;结合理论分析和计算数据总结出计算前置扩压器总压损失系数和静压恢复系数的公式,利用此公式还可求出最佳的前置扩张角和前置扩压器长度,计算误差在5%左右。

关键词:突扩扩压器;扩张角;流动分离;数值模拟

中图分类号: V235.11 文献标识码: A 文章编号:1001-4055 (2015) 07-1054-08

DOI:10.13675/j. cnki. tjjs. 2015. 07. 013

Effects of Pre-Diffuser on Performance of Dump Diffuser

XU Lei-lei¹, RUAN Can¹, FANG Xiao-yuan¹, XING Fei¹, ZHAO Chuan-liang²,

(1. Department of Aeronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Shenyang Engine Design & Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Diffuser is one key component of the gas turbine combustor following the compressor. Its primary function is to slow down the air flow delivered by the compressor in order to promote efficient combustion and avoid large total pressure losses. An experimental and computational study of cold flow in the dump diffusers was presented. The main aims were to evaluate the influence of pre-diffuser wall angle and pre-diffuser length on the performance of dump diffusers, and to identify the pressure loss mechanisms. PIV experiments were conducted in a simplified test model to help choose of congruent turbulence model. It was observed that apparent flow separation occurred on pre-diffuser wall when pre-diffuser wall angle amplified to certain degree. The pre-diffuser exit flow was distorted, indicating that the uniform exit conditions typically assumed in the diffuser design were violated. Skew distribution of the pre-diffuser outlet flow can result in strong transverse mixing for liquid, the total pressure loss of pre-diffuser increases significantly. The formula of the total pressure loss coefficient and the pressure recovery coefficient was developed. The optimal pre-diffuser length and pre-diffuser wall angle can be conveniently obtained by this equation, the calculation error was less than 5%.

Key words: Dump diffuser; Pre-diffuser wall angle; Flow separation; Numerical simulation

* 收稿日期: 2014-06-06; 修订日期: 2014-09-01。

基金项目: 中央高校基本业务费(2013121019); 航空基金(20132268003)。

作者简介: 徐磊磊(1989—), 男, 硕士生, 研究领域为燃烧与流动。E-mail: xflyhigh@qq.com

通讯作者: 邢 菲(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为燃烧与流动。E-mail: f.xing@xmu.edu.cn

1 引言

航空发动机压气机出口的空气流速高达120~220m/s,在这样流动条件下,组织燃烧相当困难^[1],一般要求在旋流器前应减速到40~60m/s,才能保证稳定可靠的组织燃烧。过高的流速造成过大的压力损失。因此,各类燃烧室在结构上都要有一个减速扩压的扩压器。

国内外对扩压器做了大量的研究。1977年, Fishenden 和 Stevens^[2]研究了突扩扩压器在大范围内的性能,包括测量了压力恢复和总压损失,分析了前置扩压器几何形状的影响。结果表明该系统有很好的稳定性,总体性能也与“流线型”扩压器相当。文献[3~6]给出了相对突扩间隙与压力损失间的变化规律;2009年 Sanal Kumar V R^[7]等用 SST $k-\omega$ 模型计算研究了最佳的内外环流道参数。2013年 Prakash^[8]等研究了不同的燃烧室形状对扩压器性能的影响,测量了扩压器壁面的静压;国内南航赵坚行^[9,10]、何小民^[11~13]做了大量的研究,论述了扩压器数值模拟的方法,并用实验测量了扩压器的压力特性;2014年曾卓雄^[14]等将可控涡装置引入扩压器,有效改善了扩压器的性能。

实验表明短突扩扩压器的性能与前置扩压器的结构密切相关。增加前置扩压器扩张角度可以有效缩短扩压器长度,但前置扩压器扩张角度过大时流动会发生大范围分离,总压损失增大。文献^[15]通过实验和计算证实了这一点,但未能定量的给出临界角的计算方法,也没有系统的分析前置扩压器各参数之间的关系。本文以一个简单的突扩扩压器模型为研究对象,采用 PIV 水槽实验测量扩压器内部的流场信息,结合 Fluent 计算,研究前置扩压器扩各参数对扩压器性能的影响,总结出经验公式,利用此公式可以预估扩压器性能并给出扩压器合理的参数。

2 PIV 实验

2.1 实验设备

扩压器内部流动显示实验在厦门大学航空流体和 PIV 实验室的多功能流体力学实验平台上完成。该平台的主要设备精密循环水槽系统为水平回流开放式。实验采用的环流水泵由数字变频仪调节,频率为0~70Hz,水流流速控制在0~300mm/s。实验水深508mm,试验件顶部距离液面深度195mm,距离水槽底部161mm。

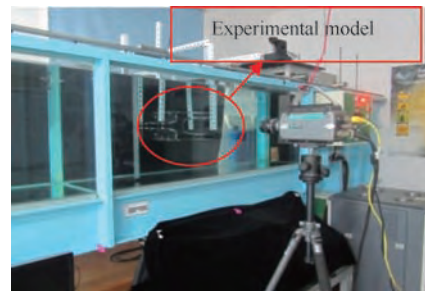


Fig. 1 PIV experimental device

2.2 实验方案

试验件采用全透明高透光的亚克力板,实验布置如图1中红圈所示。模型参数命名如图2所示,前置扩压器扩张角度 θ 为 9° ,突扩间隙比(D/H_2)为1.02,其他参数 $H_1=17\text{mm}$, $H_3=H_4=20.5\text{mm}$, $W=98\text{mm}$, $L_{pre}=60\text{mm}$ 。来流速度设为0.25m/s。

实验通过 PIV 粒子成像技术来获取扩压器内部瞬时流场结构,与不同的湍流模型计算的速度场作对比,确定合适的湍流模型。

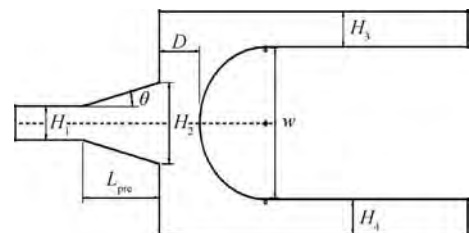


Fig. 2 Experimental model sketches

2.3 实验数据分析与湍流模型验证

为了能准确地反应扩压器内部整个流场的信息,选取试验件三个位置,位置1为前置扩压器出口,可以判断前置扩压器内部的流场;位置2距离前置扩压器出口的距离为燃烧室头部与前置扩压器出口距离的0.6倍,可以获得突扩区内的流场信息;位置3为燃烧室头部位置,可以获得内外流道的流动状况,三个位置可以有效的反应整个扩压器内部的流场。选取相对速度(以来流速度作为参考速度)和相对坐标为方便对比。图3为位置1,2,3绝对速度的实验值与不同湍流模型计算值对比图。

由实验数据可以看出,此时前置扩压器出口的速度型线是不对称的,向上壁面偏离,前置扩压器出口流线的偏离使突扩区的流体主要集中在扩压器上半部分。由位置2的速度型线可以看出,在突扩区形成内外两个回流区。 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型预测的流场虽然也略有偏离,但与实验误差较大。SST模型与雷诺应力模型能较准确地预测出前置扩压器速度型线

的偏离位置,不足之处在于其预测的速度值比真实值稍大。相比于 SST 模型,雷诺应力在突扩区更能准确预测其极值,拐点等关键位置。文献[16]研究入口流动对扩压器性能的影响时为了捕捉扩压器流场信息也采用了雷诺应力模型。结合文献和实验结果选取雷诺应力计算扩压器内部流场。

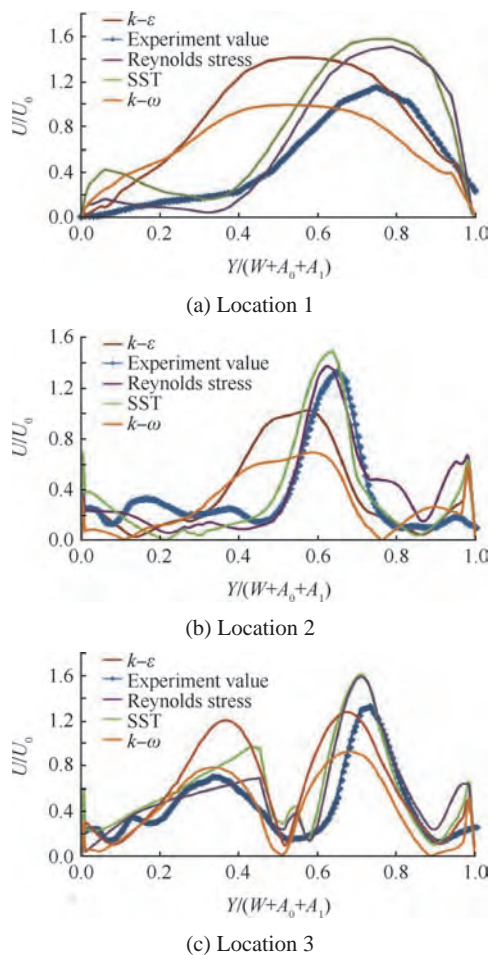


Fig. 3 Velocity curve in dump diffuser

3 数值计算

3.1 物理模型

本文数值计算对火焰筒采用了 Shyy W Heserrmann^[17]提到的方法,将火焰筒处理为不流通的区域。计算采用环形三维模型,模型尺寸为:入口高度 $H_0=21.7\text{mm}$,为了避免因为流道面积差所引起的流量不均,故计算时保证内外环通道面积与入口面积一致,经过计算外环通道 $A_0=17.4\text{mm}$,内环通道 $A_1=30\text{mm}$ 。前置扩压器长度 $L_{pre}=57\text{mm}$,距离中轴距离 R 为 235mm 。三维计算中截面绕中轴旋转 15° 。

3.2 数值计算方法

采用六面体网格,共 350 万网格。采用不可压

N-S 方程, SIMPLE 算法;湍流模型由实验可知选用雷诺应力模型,近壁面处用标准壁面函数法处理。

进口空气马赫数 0.26,压力 469kPa,温度为 512K。进口边界条件选用速度入口。出口在原模型的基础上延长出口当量直径的 5 倍以上,出口边界条件设为压力出口边界条件。

4 数值计算结果

文中定义分离点为沿着轴向方向的速度出现负值的起始位置与前置扩压器入口的距离除以前置扩压器总长度;外环流量占比定义为:流体流过外环的流量与总流量的比值。截面的静压和总压选取的是质量平均值,计算公式为

$$\bar{p} = \frac{1}{m} \int_0^A p dm \tag{1}$$

总压损失计算公式为

$$\Omega = \frac{\Delta p_t}{0.5\rho V^2} \tag{2}$$

静压恢复系数计算公式为

$$C_p = \frac{\Delta p}{0.5\rho V^2} \tag{3}$$

4.1 前置扩压器存在分离

当前置扩压器扩张角度过大时,前置扩压器出现分离。前置扩压器扩张角度为 9° 时,计算结果如表 1 所示,每间隔 10mm 选取一个截面,计算总压和静压,作图 4,观察总压和静压变化趋势。为方便对比,左坐标轴为总压坐标轴,右侧坐标轴为静压坐标轴,横坐标为各截面距离前置扩压器入口的距离。图中有标记线的为静压曲线,无标记的线为总压曲线(下文同)。

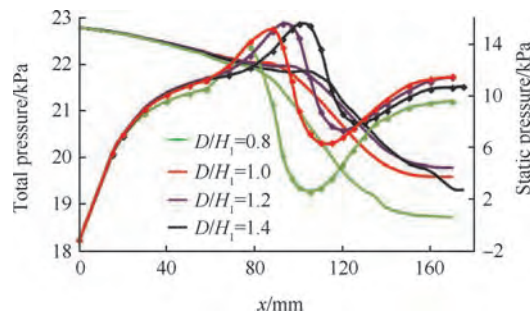


Fig. 4 Total pressure and static pressure curve of dump diffuser ($\theta=9^\circ$)

从图 5 可以看出,总压曲线在分离点前是重合的,与入口的距离近似成线性关系,随着流动分离,总压下降增多。从速度矢量图 6 看出,前置扩压器速

度分布不均匀,前置扩压器上壁面速度非常小,并产生一定的分离。从压强云图7也看出,前置扩压器出口的压强分布也是非常不均匀的,外壁面压力大,产生压力差,迫使流体偏向内环,造成内外流道流量分布不均匀,流体掺混造成总压损失增大。

由表1分离点的位置可以看出,当前置扩压器扩张角度为 9° 时,突扩间隙越小,前置扩压器内的分离发生的越早。比较突扩间隙比为1.2和1.4可以看出,突扩间隙比为1.2时分离点0.833,前置扩压器总压损失为2.18%,总的总压损失10.36%,而突扩间隙比为1.4时分离点0.891,其分离发生的更晚,但此时前置扩压器总压损失2.32%,总的总压损失12.25%,此时总压损失反而增大。由此可以推断出前置扩压器的分离未必是不利的,并不是分离发生的越晚总压损失越小,总压损失最小的时候在前置扩压器存

在一定程度的分离。

增加前置扩压器角度到 11° ,计算结果如表2所示。相比 9° 时,此时前置扩压器出现更大的分离,分离更早。所以增大前置扩压器扩张角度虽然会缩短扩压器长度,但会发生流动分离,增加总压损失。图8为总压和静压曲线。

从总压和静压曲线看出,在流动未发生分离时,前置扩压器内的总压和静压与入口距离也是呈线性关系,流动发生分离后,总压曲线下降剧烈,静压增加的也比较平缓,由计算结果可以看出,此时前置扩压器总压损失在3%附近,相比于 9° 的前置扩压器总压损失2%左右,增幅高达50%左右。由此可见扩张角达到一定的值后,增大扩张角会使前置扩压器内出现大范围的分流,此时如不采取抑制分离的措施,总压损失会大幅增加,扩压器内的流动状况恶化,内

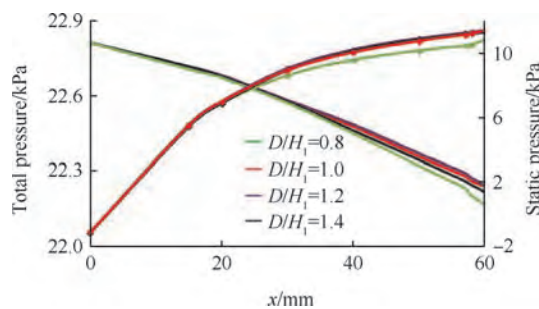


Fig. 5 Total pressure and static pressure curve of pre-diffuser ($\theta = 9^\circ$)

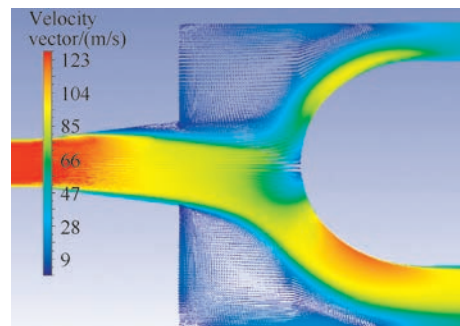


Fig. 6 Velocity vector of dump diffuser ($\theta = 9^\circ, D/H_1 = 1.2$)

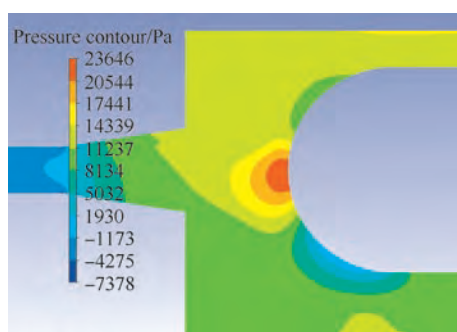


Fig. 7 Pressure contour of dump diffuser ($\theta = 9^\circ, D/H_1 = 1.2$)

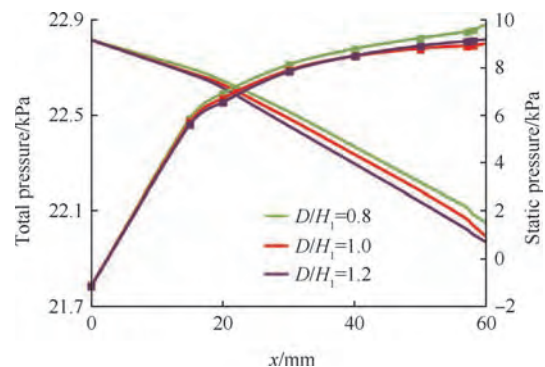


Fig. 8 Total pressure and static pressure curve of pre-diffuser ($\theta = 11^\circ$)

Table 1 Result of numerical calculation ($\theta = 9^\circ$)

| D/H_1 | Separation point (x/L) | Flow ratio of outer annulus/% | Ω of pre diffuser/% | Ω of dump region/% | Total Ω % | C_p of pre diffuser/% | C_p of dump region/% | Total C_p /% |
|---------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| 0.8 | 0.544 | 31.42 | 2.43 | 14.53 | 19.7 | 48.60 | -3.73 | 44.87 |
| 1.0 | 0.794 | 34.53 | 2.23 | 11.24 | 13.5 | 51.44 | 1.22 | 52.66 |
| 1.2 | 0.833 | 34.08 | 2.18 | 10.36 | 12.5 | 51.94 | 0.64 | 52.57 |
| 1.4 | 0.891 | 34.02 | 2.32 | 12.25 | 14.6 | 51.60 | -1.89 | 49.71 |

外环的流量将更加不均匀。

4.2 前置扩压器未出现分离

以上分析可知扩张角度较大时会出现流动分离,降低前置扩压器扩张角度到 7° ,计算结果如表3。由结果可看出,此时前置扩压器未出现流动分离。从图9总压和静压曲线可以看出,此时前置扩压器总压和静压曲线几乎完全重合,由表3也可以看出此时总压损失在1.5%左右,相比于存在分离时的3%,总压损失缩小了一半。

当突扩间隙为1时,此时突扩扩压器静压恢复仅为39.41%,此时的流量比24.4%,内外环流量分布不均匀,造成突扩区产生负压区,突扩区的静压恢复系数为-7.67%,扩压器整体的性能降低。所以不能盲目地为了避免前置扩压器的分离,而减小扩张角,选取合适的扩张角度,搭配合适的突扩间隙,使内外环流量分布均匀,以提高扩压器整体性能。

为验证小角度前置扩压器不会发生分离流动分离以及是否此时对扩压器整体性能较好,计算扩压器扩张角度为 5° 和 3° 时的性能。计算结果如表3和

表4所示。

由总压和静压曲线图10和图11,可以看出 5° 和 3° 时前置扩压器都没有发生流动分离,前置扩压器总压和静压曲线完全重合,并不受突扩间隙大小的影响,总压曲线与入口距离呈线性关系,且斜率与其他无关,由计算可以看出,此时前置扩压器总压损失仅为1.3%左右,与存在分离时相比大幅度降低。但前置扩压器角度太小,其不能达到增压减速的效果,其前置扩压器静压恢复系数大幅度下降,突扩区内的总压损失急剧增大。当扩张角度为 3° ,突扩间隙比为1.2时,突扩区静压恢复系数为-23.7%,整体静压恢复系数为0.28%,此时扩压器已经完全丧失了其扩压减速的功能。所以前置扩压器的扩张角度和长度等参数,对扩压器的整体性能影响重大,合理的选取前置扩压器参数,可以有效提高扩压器工作效率。

5 经验公式归纳

5.1 前置扩压器总压损失系数

比较 $3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ$ 前置扩压器扩张角度,可

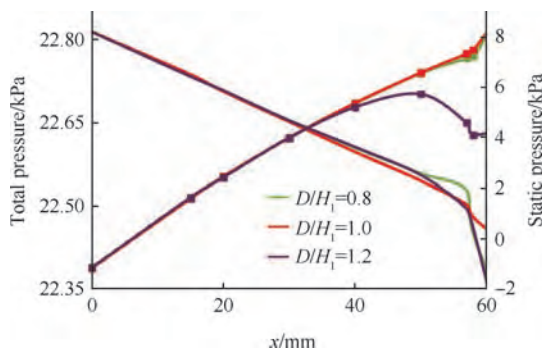


Fig. 9 Total pressure and static pressure curve of pre-diffuser ($\theta = 7^\circ$)

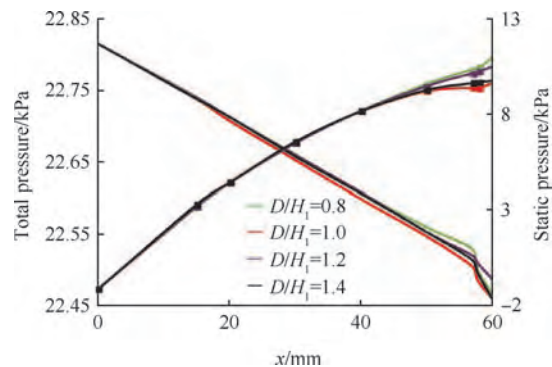


Fig. 10 Total pressure and static pressure curve of pre-diffuser ($\theta = 5^\circ$)

Table 2 Result of numerical calculation ($\theta = 11^\circ$)

| D/H_1 | Separation point (x/L) | Flow ratio of outer annulus/% | Ω of pre diffuser/% | Ω of dump region/% | Total Ω /% | C_p of pre diffuser/% | C_p of dump region/% | Total C_p /% |
|---------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| 0.8 | 0.54 | 31.42 | 2.93 | 14.76 | 17.7 | 44.62 | -3.51 | 41.11% |
| 1.0 | 0.36 | 23.36 | 3.13 | 12.45 | 15.6 | 42.03 | -0.80 | 41.23% |
| 1.2 | 0.254 | 29.47 | 3.31 | 12.73 | 16.0 | 42.83 | -0.01 | 42.82% |

Table 3 Result of numerical calculation ($\theta = 7^\circ$)

| D/H_1 | Separation point (x/L) | Flow ratio of outer annulus/% | Ω of pre diffuser/% | Ω of dump region/% | Total Ω /% | C_p of pre diffuser/% | C_p of dump region/% | Total C_p /% |
|---------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| 0.8 | — | 36.2 | 1.43 | 13.06 | 14.5 | 54.36 | -2.65 | 51.71 |
| 1.0 | — | 24.4 | 1.61 | 11.06 | 12.7 | 47.10 | -7.69 | 39.41 |
| 1.2 | — | 35.6 | 1.54 | 11.21 | 12.8 | 53.07 | 0.86 | 53.93 |

Table 4 Result of numerical calculation ($\theta=5^\circ$)

| D/H_1 | Separation point(x/L) | Flow ratio of outer annulus/% | Ω of pre diffuser/% | Ω of dump region/% | Total Ω /% | C_p of pre diffuser/% | C_p of dump region/% | Total C_p /% |
|---------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| 0.8 | — | 37.2 | 1.20 | 18.07 | 19.3 | 47.99 | -2.22 | 45.77 |
| 1 | — | 39.6 | 1.30 | 14.55 | 15.9 | 43.91 | -5.49 | 38.42 |
| 1.2 | — | 36.4 | 1.24 | 13.73 | 15.0 | 47.17 | 4.17 | 51.34 |
| 1.4 | — | 27.0 | 1.26 | 12.38 | 13.6 | 44.99 | -2.98 | 42.01 |

Table 5 Result of numerical calculation ($\theta=3^\circ$)

| D/H_1 | Separation point(x/L) | Flow ratio of outer annulus/% | Ω of pre diffuser/% | Ω of dump region/% | Total Ω /% | C_p of pre diffuser/% | C_p of dump region/% | Total C_p /% |
|---------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| 0.8 | — | 37.2 | 1.19 | 29.15 | 30.34 | 34.62 | -3.35 | 31.27 |
| 1 | — | 34.7 | 1.25 | 21.89 | 23.15 | 35.54 | 7.11 | 42.65 |
| 1.2 | — | 36.4 | 1.33 | 26.44 | 27.44 | 23.99 | -23.7 | 0.28 |

以

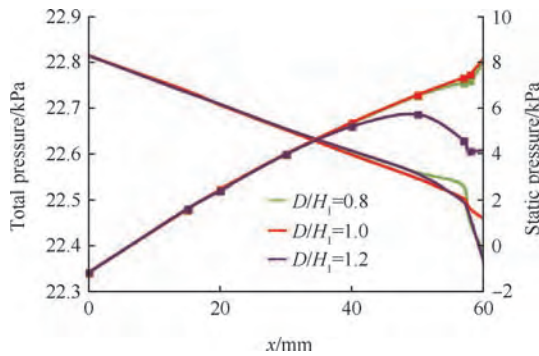


Fig. 11 Total pressure and static pressure curve of pre-diffuser ($\theta=3^\circ$)

发现当前置扩压器扩张角度低于 9° 时,在前置扩压器不会产生分离,此时,前置扩压器的总压损失是最小的,由计算结果和总压曲线可以看出,其总压曲线与前置扩压器的长度呈近似线型关系与突扩间隙几乎无关,如图12所示,前置扩压器总压损失拟合经验

公式为

$$\frac{P_t - P_{t0}}{0.5\rho V^2} = -0.24x \quad (4)$$

P_t 为各截面总压(质量平均), x 为截面到前置扩压器入口的距离,单位 m。

当前置扩压器出现分离时,前置扩压器的总压损失可采用以下近似公式计算

$$\frac{P_t - P_{t0}}{0.5\rho V^2} = -\frac{0.9 \tan \theta}{h_0} x^2 \quad (5)$$

5.2 前置扩压器静压恢复系数

静压曲线由图13可以看出,前置扩压器静压与突扩间隙关系不大(除出口部分外)。

前置扩压器简化图14,由质量守恒

$$\rho_0 V_0 A_0 = \rho_1 V_1 A_1 \quad (6)$$

忽略密度的变化,所以各个截面速度与面积成反比。对于环形扩压器,其面积与高度成正比即

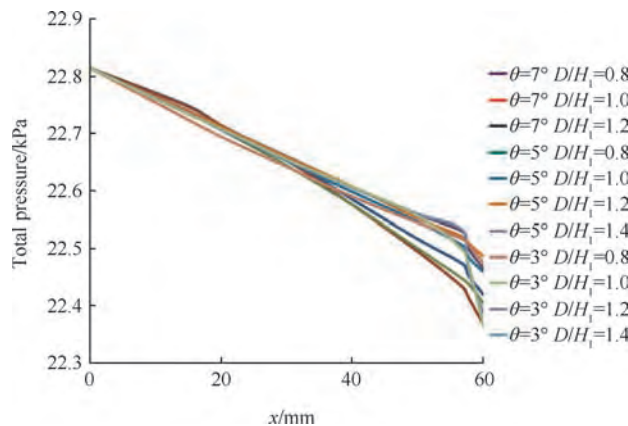


Fig. 12 Total pressure curve of pre-diffuser

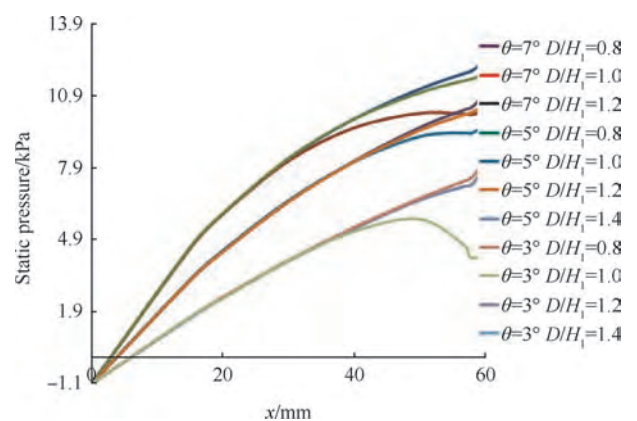


Fig. 13 Static pressure curve of pre-diffuser

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{A_0}{A_1} = \frac{h_0}{h_1} \quad (7)$$

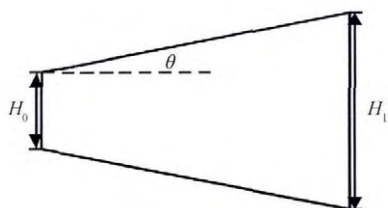


Fig. 14 A simplified graphic of pre-diffuser

由能量守恒

$$p_0 + 0.5\rho V_0^2 = p_1 + 0.5\rho V_1^2 + \Delta p_t \quad (8)$$

化简为

$$\frac{p_1 - p_0}{0.5\rho V_0^2} = 1 - \frac{V_1^2}{V_0^2} - \frac{\Delta p_t}{0.5\rho V_0^2} \quad (9)$$

可以看出静压恢复与速度的平方有关,即与扩压器面积有关,前置扩压器截面面积比为

$$\frac{A_1^2}{A_0^2} = \frac{h_1^2}{h_0^2} = \frac{(h_0 + 2x \tan \theta)^2}{h_0^2} = \quad (10)$$

$$\frac{4 \tan^2 \theta}{h_0^2} x^2 + \frac{4 \tan \theta}{h_0} x + 1$$

由静压恢复曲线也可以看出,前置扩压器静压恢复系数与突扩间隙无关,由线型拟合关系式也可以发现与前置扩压器长度呈现二次函数关系,结合拟合数据,和总压损失损失公式,可以得到如下近似公式

$$\frac{p - p_0}{0.5\rho V^2} = -\frac{4 \tan^2 \theta}{h_1^2} x^2 + \frac{2.95 \tan \theta}{h_1} x \quad (11)$$

由公式(11)可以发现,静压恢复与扩张角度有关,当前置扩压器长度和前置扩压器入口高度确定之后,静压恢复系数与 $\tan \theta$ 也是二次关系,静压恢复系数也是先增大后减小。由公式可以求出,当前置扩压器扩张角为 8° 时静压恢复系数最大,为 54.26%。当前置扩压器扩张角度大于 8° 时,前置扩压器壁面开始出现分离,这与仿真结果一致。

5.3 公式误差

前置扩压器扩张角为 $3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ$ 时用方程(11)计算出的静压恢复系数分别为 34.24%, 47.85%, 54.01%, 52.57%, 43.3% 与仿真结果的误差在 4% 以内。前置扩压器扩张角为 $3^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ 时,因为未发生分离,前置扩压器总压损失用方程 4 计算,结果为 1.37%, 与仿真结果的误差在 5% 以内。当扩张角为 $9^\circ, 11^\circ$ 时,前置扩压器出现分离,选用方程 5 计算前置扩压器总压损失,计算值为 2.24%, 2.75%, 与仿真值的误差在 5%。

5.4 公式应用

由方程(12)可知,当前置扩压器长度 L ,前置扩压器入口高度 h_0 已知时,前置扩压器的静压恢复系数与 $\tan \theta$ 成二次方关系。以 C_p 为 y 轴,前置扩压器扩张角度为 x 轴可以得到前置扩压器静压恢复系数与扩张角度趋势图 15,可以看出静压恢复系数随着扩张角度的增大呈现出先增加后降低的关系。当扩张角度过大时,出现大范围的回流区,计算误差增大,此时公式不再适用。由公式可以推出 8° 时出现最大值,其值为 54.36%。通过 Fluent 计算,当前置扩压器扩张角为 8° ,突扩间隙比为 1.2 时,此时前置扩压器没有分离,前置扩压器总压损失 1.1%,静压恢复系数为 53.52%,与计算值误差仅为 1.6%,总的总压损失系数 11.4%,静压恢复系数为 55.27%,与其他算例相比静压恢复系数是最大的,但总压损失相比 9° ,突扩间隙比 1.2 有所增大,进一步说明虽然前置扩压器不出现分离时,前置扩压器总压损失较小,但从全局来看,前置扩压器应该稍稍存在一定程度的分离,此时总压损失是最小的。

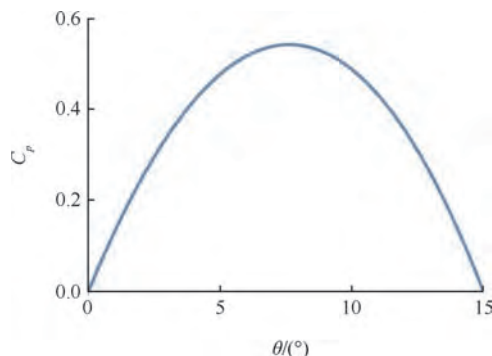


Fig. 15 C_p relationship with θ

6 结论

(1) 依据 PIV 水槽实验结果与不同的湍流模型计算结果的对比,发现雷诺应力模型在计算扩压器内部流场时与实验值吻合得较好。

(2) 前置扩压器扩张角度和突扩间隙对扩压器性能影响很大,静压恢复主要发生在前置扩压器,总压损失大多发生在突扩区域。

(3) 当前置扩压器长度一定时,前置扩压器静压恢复系数与 $\tan \theta$ 呈二次方关系,扩张角 θ 的最佳值为 $\arctan \frac{2.95 \tan \theta}{8h_1}$,当超过最佳值时前置扩压器开始出现分离,总压损失增大,静压恢复系数降低。

(4) 当前置扩压器未出现分离时,总压损失和前置扩压器长度呈线性变化关系;出现分离后,前置扩

压器总压损失在分离点之后开始增大,但由计算可知,前置扩压器内稍稍出现流动分离时,此时虽然前置扩压器总压损失不是最小值,但整体上扩压器总压损失最小。

致谢:感谢厦门大学航空流体和PIV实验室鲍峰老师、何意、杨锦文师兄、傅向向给予实验上的大力支持。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册第九册主燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.
- [2] Fishenden C R, Stevens S J. Performance of Annular Combustor-Dump Diffusers [J]. *Journal of Aircraft*, 1977, 14(1): 60-67.
- [3] Sanalkumar V R, Muraleedharan A, Khan Y, et al. Studies on Dump Diffusers for Modern Aircraft Engines [R]. *AIAA 2007-5161*.
- [4] Walker A D, Carrotte J F, McGuirk J J. The Influence of Dump Gap on External Combustor Aerodynamics at High Fuel Injector Flow Rates[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2009, 131 (3): 031506.
- [5] Dunn J J, Ricklick M. Flow Characterization of a Three-Dimensional Separated Annular Diffuser [R]. *ASME 2009-EC-10533*.
- [6] Klein A. Characteristics of Combustor Diffusers [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1995, 31(3): 171-271.
- [7] Kumar V R S, Sahoo S K, Raghunathan S. Internal Flow Simulation of Dump Diffusers for Modern Aircraft Engines[R]. *AIAA 2009-4832*.
- [8] Ghose P, Datta A, Mukhopadhyay A. Effect of Dome Shape on Static Pressure Recovery in a Dump Diffuser at Different Inlet Swirl[J]. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, 3: 465-471.
- [9] 赵坚行, 雷雨冰. 区域法数值模拟短突扩压器流场[J]. *南京航空航天大学学报*, 1997, 29(4): 439-443.
- [10] 赵坚行, 胡 劲, 丁万山, 等. 突扩区/火焰筒头部流动特性研究[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(1):79~82.
- [11] 何小民, 谈浩元. 短突扩扩压器与火焰筒匹配的实验研究[J]. *航空动力学报*, 2001, 16(2):115~118.
- [12] 何小民, 毛军逵. 短突扩扩压器压力特性的数值研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2002, 34(6): 527-530.
- [13] 何小民, 毛军逵, 谈海元. 突扩扩压器突扩间隙与压力损失间关系的研究[J]. *推进技术*, 2002, 23(2): 158-160. (HE Xiao-min, MAO Jun-kui, TAN Hai-yuan. Numerical Investigation on Pressure Characteristics of Dump Diffuser [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 323(2): 158-160.)
- [14] 曾卓雄, 陈超杰, 徐义华. 结构参数优化对可控涡扩压器性能的影响分析[J]. *推进技术*, 2014, 35(6): 742-748. (ZENG Zhuo-xiong, CHEN Chao-jie, XU Yi-hua. Effects of Structure Parameters Optimization on Vortex Controlled Diffuser Flow Field [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(6): 742-748.)
- [15] Bernier B C, Dunn J J, Ricklick M, et al. Performance of Three-Dimensional Annular Diffusers with Varying Dump Gap Ratios[R]. *AIAA 2011-745*.
- [16] Walker A D, Carrotte J F, Denman P A. Annular Diffusers with Large Downstream Blockage Effects for Gas Turbine Combustion Applications[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(6): 1218-1231.
- [17] Shyy W Heserrmann. Influence of Compressor Exit Conditions on Diffuser Performance [R]. *AIAA 85-1440*.

(编辑:史亚红)