适于旋流杯下游流场的改进型半分析关系式

黄 勇 郭志辉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用典型(CFM-56 燃烧室)旋流杯结构下游的流场实验数据,参照经验关系式,提出了物理意义更明确、拟合更准确、且更便于对大量实验数据进行相关性研究的半经验关系式,并与旋流杯下游紧靠出口处附近的轴向速度及旋流速度测量数据进行了对比,发现各特征数据(如峰值位置、峰值衰减速度、回流区宽度及其沿下游的发展、回流速度及其衰减等)与实验数据非常相符,从而初步验证了提出的半经验关系式. 同时,给出了公式中不同的经验常数取值带来的变化,分析了与几何及工况参数之间可能的联系,为进一步验证该关系式打下基础. 分析表明,各经验常数的变化之间相互独立,且物理意义明确,可以方便地用于进一步验证.

关 键 词: 燃烧室; 旋流; 速度; 关系式方法

中图分类号: V 232.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0630-05

Improved semi-analytical correlation approach for the flowfield downstream of swirl cups

Huang Yong Guo Zhihui

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An improved semi-analytical correlation was proposed for the prediction of the flowfields downstream a typical swirl cup on the basis of previous correlations proposed by Rizk & Mongia. The improved correlation has clear physical definition and is adequate for its constants determination by large amount of experimental data. The comparison between the selected experimental data and the predictions by the correlation is quite well, especially about the characteristic data such as the peak velocity, the radial location of the peak velocity, the decay of the velocity, the size of the recirculation zone, and the development of the recirculation zone. Meanwhile, the influences of the constants in the correlation are shown quantitatively, and the possible reason has been analyzed briefly. The analysis showed that all the empirical constants were independent with each other, thus the semi-analytical correlation could be used easily as further validation for different data.

Key words: combustors; swirling flow; velocity; correlation methods

航空发动机燃烧室的性能主要由头部两相流场决定,因此,设计和优化头部结构,就成为各国研究者的重要课题. 经过 20 多年的潜心研究,目前各大发动机公司在新型燃烧室上基本采用所谓旋流杯结构——由离心喷嘴和两级涡流器组成的头部结构. 围绕旋流杯结构参数及流场特点,许多研究者进行了深入研究.

UCI 的 Samuelsen 小组早在 1992 年[1] 就对 CFM-56 燃烧室头部旋流杯结构下游的流场进行了研究,他们采用 3 倍放大模型进行实验测量;随后又在正常尺寸下研究了改变 1、2 级旋流角及旋转方向、是否加文氏管等对燃油分布、燃烧稳定性与排放等的影响[2];最后对各种基础研究数据进行了总结[3],给出放大结构与真实结构的差异、

收稿日期: 2005-06-15

作者简介: 黄 勇(1964-),男,湖南澧县人,教授, yhuang@buaa.edu.cn.

文氏管的作用、以及喷嘴/涡流器同心度的影响等. 与此同时,NASA Lewis 研究中心与 Wayne 州立大学合作[4],对旋流杯中文氏管角度、喉道长度、旋流角度、背压等参数的影响进行了研究;汉城国立大学[5]也对文氏管出口角度变化的影响进行了研究. 北京航空航天大学的冯守义等[6]、郎洪俭等[7]则分别对回流燃烧室头部旋流杯结构和双轴向涡流器头部结构与火焰筒匹配的流场进行了研究.

正如 Mongia 等人[8]所指出的那样,经验设计方法、半经验设计方法、以及纯分析方法,仍是目前发动机设计不同阶段的主要方法. 结合我国国情,半经验设计方法显得尤为重要. 针对旋流杯头部结构,美国在这方面作了许多努力. Rizk & Mongia[9-11]对典型旋流喷嘴下游的流场及液雾场提出了几个经验关系式,而 Mongia 等[12-13]甚至提出了气态污染物排放以及贫熄边界的经验关系式,这些都对燃烧室初步设计具有很大帮助.

遗憾的是,在 Rizk & Mongia 提出并采用多种喷嘴验证的流场经验关系式[9-11]中,各经验常数的物理意义并不是很明确,且经验常数的调节很困难,不利于大量实验数据的相关性调试. 更重要的是,他们所提出的经验关系式在离中心线较远处明显与实验结果不相符. 针对这些问题,本文选用 CFM-56 头部旋流杯的详细实验数据[3]作为调试依据,试图提出一套更为合理、物理意义更明确、且便于大量实验数据综合调试的经验关系式.

1　Rizk & Mongia 的拟合结果

若采用 Rizk & Mongia 的经验关系式,即

$$\frac{u}{u_{\mathrm{m}}}=\left(\frac{r}{r_0}\right)^{b-1}\exp\left\{-k_u\left[\left(\frac{r}{z+2.3d_0}\right)^{b}-\left(\frac{r_0}{z+2.3d_0}\right)^{b}\right]\right\}+A \tag{1}$$

$$\frac{u_{\mathrm{m}}}{u_{\mathrm{m0}}}=3.93S^{0.8}\left(\frac{d_0}{z+2.3d_0}\right)^{a_5} \tag{2}$$

式中,u 为轴向速度;r 为径向坐标;d_0 为 2 级涡流器出口直径;S 为总旋流数;u_{m} 为横截面上轴向速度的最大值;u_{m0}为旋流杯出口横截面上轴向速度的最大值;z 为轴向坐标;r_0 为速度分布峰值的径向位置. 且

$$A=\left[0.65-2s\left(\frac{r_0}{z+2.3d_0}\right)-\left(\frac{r}{z+2.3d_0}\right)\right]\cdot\left(1-\frac{r}{r_0}\right)$$

$$a_5=1.52\cdot S^{0.64}$$

$$b=2.5$$

$$r_0=0.7d_0$$

$$k_u=12.5\left(\frac{z}{d_0+2.3}\right)^{0.1}$$

则计算出的 u 分布如图 1 所示(图中 D 代表旋流杯出口直径).

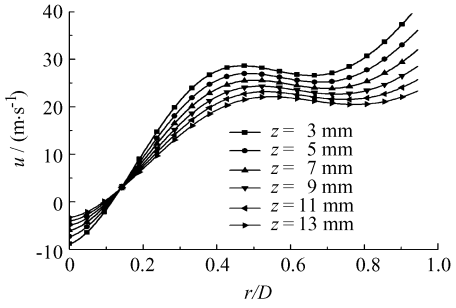


图 1　Rizk & Mongia 的经验计算结果

显然,从图 1 中可以看出,虽然该经验关系能拟合出中心回流区、速度峰值区、及其随下游距离的变化趋势,但在定量上,很难做到与实验数据相符. 尤其是在峰值区以外的区域,速度分布趋势显然与实验结果不相符. 更重要的是,由于该关系式中经验常数较少,因此取值的变化会带来一系列流场特征的变化,对其调整很难满足大量不同实验结果的要求. 比方说,如图 2 所示,常数 b 的变大同时导致峰值增加、峰值外移、峰值速度附近分布变尖锐、回流区变宽等.

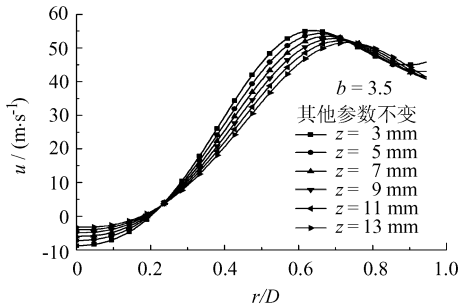


图 2　增大 Rizk & Mongia 的经验关系式中的常数 b 所形成的 u 分布

2　本文提出的关系式及结果

2.1　u 分布经验关系式

本文根据实际流动结构,提出将 u 分布看作由 2 部分构成:①为正向环流,记为 u_{p};②中心回流,记为 u_{r}. 即 u 分布的经验关系式为

$$u=u_{\mathrm{p}}+u_{\mathrm{r}} \tag{3}$$

$$u_{\mathrm{p}}=\frac{u_{\mathrm{p}}}{u_{\mathrm{m}}}\cdot\frac{u_{\mathrm{m}}}{u_{\mathrm{m0}}}\cdot u_{\mathrm{m0}} \tag{4}$$

$$\frac{u_{\mathrm{p}}}{u_{\mathrm{m}}}=\frac{a_1}{\sigma}\exp\left[-\frac{(r-r_{01})^2}{2\sigma^2}\right] \tag{5}$$

$$\frac{u_m}{u_{m0}} = a_3 S^{a_4}\left(\frac{d_0}{z + 2.3d_0}\right)^{a_5} \tag{6}$$

式中，$a_1=\sigma$；$\sigma=4$；$r_{01}=a_2 d_0+z\cdot\tan\alpha$；$a_2=0.85$；$\alpha=44°$；$a_3=2.3^{a_5}/S^{a_4}$；$a_4=0.8$；$a_5=a_6\cdot S^{a_7}$；$a_6=2.1$；$a_7=0.64$；$u_{m0}=30$.

而

$$u_r = \frac{u_r}{u_{mr}}\cdot\frac{u_{mr}}{u_{m0}}\cdot u_{m0} \tag{7}$$

$$\frac{u_r}{u_{mr}} = -a_8\exp\left[-\left(\frac{r}{a_9 r_{02}}\right)^{a_{10}}\right] \tag{8}$$

$$\frac{u_{mr}}{u_{m0}} = a_{12}S^{a_4}\left(\frac{d_0}{z + 2.3d_0}\right)^{a_{13}} \tag{9}$$

式中，$a_8=1$；$a_9=1.3$；$a_{10}=4.5$；$r_{02}=a_{11}d_0+z\cdot\tan(\alpha-10°)$；$a_{11}=0.35$；$a_{12}=0.41$；$a_{13}=0.8$.

由此得到相应的分布曲线如图3所示.

显然，图3所展示的结果在峰值位置、峰值衰减速度、回流区宽度及其沿下游的发展、回流速度及其衰减等流场特征方面与实验数据非常相符.

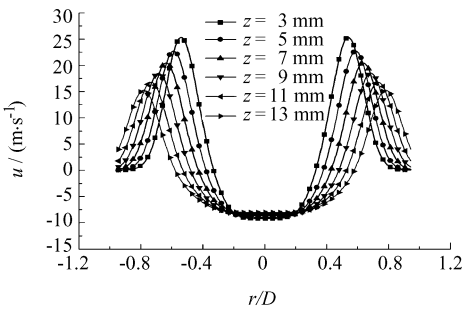


图3 用本文经验关系式计算出的 u 分布

2.2 旋流速度分布经验关系式

类似地，将旋流速度看作3个分量的叠加：①一级涡流器出口形成的正态分布；②二级涡流器出口形成的正态分布；③离心力造成的内、外环旋流速度分布，即

$$w = w_1 + w_2 + w_3 \tag{10}$$

$$w_1 = w_{m1}\cdot\frac{w_1}{w_{m1}} \tag{11}$$

$$w_2 = w_{m2}\cdot\frac{w_2}{w_{m2}} \tag{12}$$

$$w_3 = b_6\left(\frac{r}{r_{03}}\right) - \left[b_6\left(\frac{r}{r_{03}}\right) + b_7\right]\cdot\left(\frac{r}{r_{03}}\right)^2\cdot\frac{1+(r/r_{03})}{1+(r/r_{03})^3} \tag{13}$$

其中

$$w_{m2} = w_{m0}\cdot\frac{b_2}{S^{b_1}}\cdot\left(\frac{d_0}{2}\right)^{b_3} \tag{14}$$

$$\frac{w_2}{w_{m2}} = -b_5\left(\frac{1}{\sigma_1}\right)\exp\left[-\frac{(r-r_{01})^2}{2\sigma_1^2}\right] \tag{15}$$

$$w_{m1} = b_4 w_{m2} \tag{16}$$

$$\frac{w_1}{w_{m1}} = -b_5\left(\frac{1}{\sigma_1}\right)\exp\left[-\frac{(r-r_{03})^2}{2\sigma_1^2}\right] \tag{17}$$

式中，$b_1=0.186$；$b_2=0.13$；$b_3=0.6$；$b_4=0.6$；$b_5=2.5$；$\sigma_1=2.35$；$r_{03}=r_{01}-\Delta r$；$b_6=-0.96$；$b_7=b_8 w_{m2}+b_9$；$b_8=0.36$；$b_q=1.2$

选取 $w_{m0}=15$，$\Delta r=8$，得到相应的分布曲线见图4.

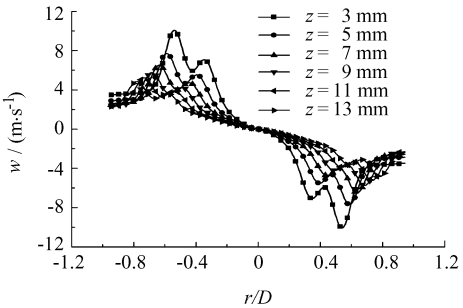


图4 用本文经验关系式计算出的 w 分布

同样，从图4可以看出，w 分布及其衰减规律与实验数据很相符.

总的来看，无论是 u 分布还是 w 分布，速度分布与实验数据都非常相似，准确地抓住了旋流杯下游流场结构的特点. 由于经验关系式中的经验常数较多，且相对独立（第3节会进一步说明），有理由相信，通过仔细调节该经验关系式中的经验常数，有可能比较准确地定量拟合各种不同结构的旋流杯下游的复杂流场.

3 经验常数影响规律

该经验公式中，考虑到常数 $a_3\sim a_7$ 是基于Rizk & Mogia的基本思想，且目前暂时缺乏旋流数等几何结构参数的影响数据，故认为这些常数的取值与其论文中的相似，只是根据峰值速度的衰减程度对 a_6 稍作调整.

在可变的几个经验常数中，影响峰值速度径向位置的参数为 a_2，α，影响分布宽度的参数为 σ，影响衰减快慢的参数为 a_6、影响最大回流速度的参数为 a_{12} 及 a_{13}、影响最大回流速度衰减快慢的参数为 a_{13}、影响回流区宽度等的参数为 a_9，a_{11}，α，影响回流速度分布陡峭程度的参数为 a_{10}. 具体影响规律和程度见图5～图13.

图5表明，σ 的增加会导致 u 分布峰值附近的 u 分布变平缓. 这与主（2级）旋流器气流通道径向间距有关.

图6表明，a_2 的减小会导致 u 分布峰值向中心线移动. 这与主（2级）旋流器直径大小有关.

图7说明，α 的减小会导致 u 分布峰值随下

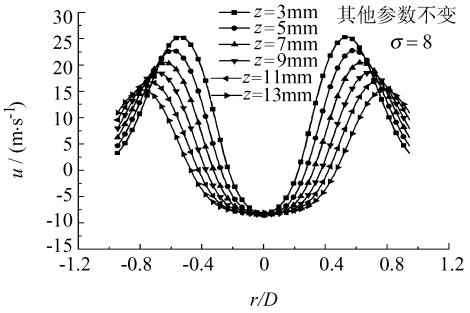


图 5　σ 增大形成的 u 分布

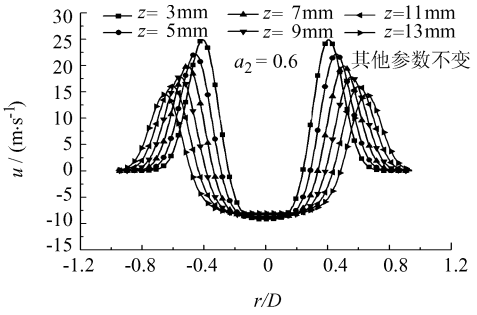


图 6　a_2 变小形成的 u 分布

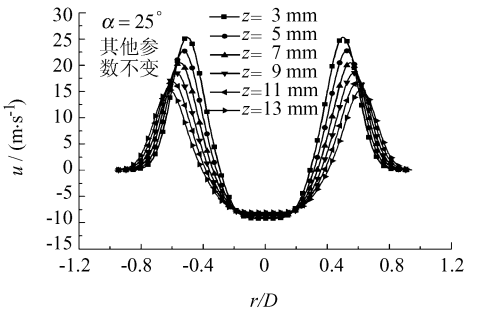


图 7　α 减小形成的 u 分布

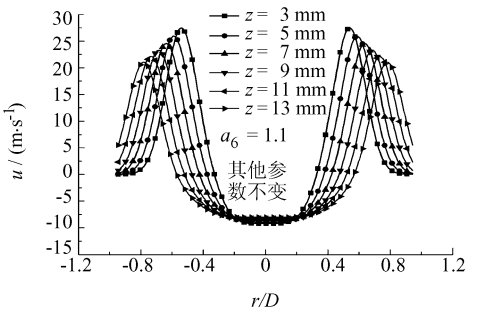


图 8　a_6 减小形成的 u 分布

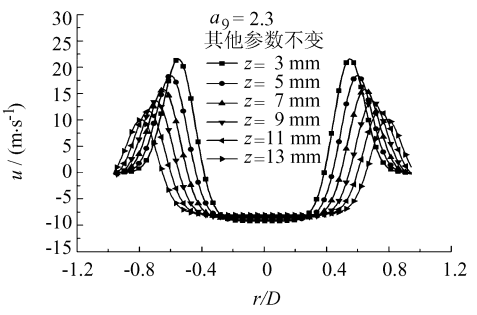


图 9　a_9 增大形成的 u 分布

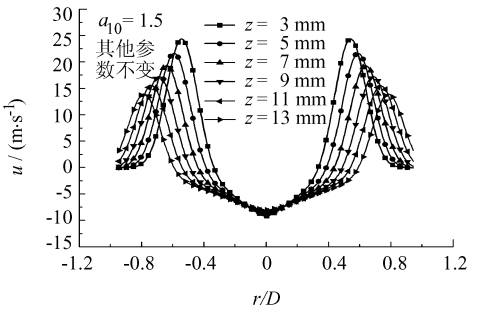


图 10　a_{10}减小形成的 u 分布

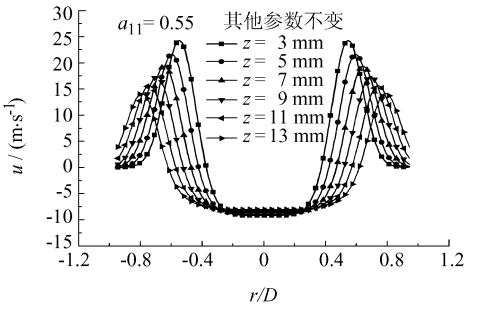


图 11　a_{11}增大形成的 u 分布

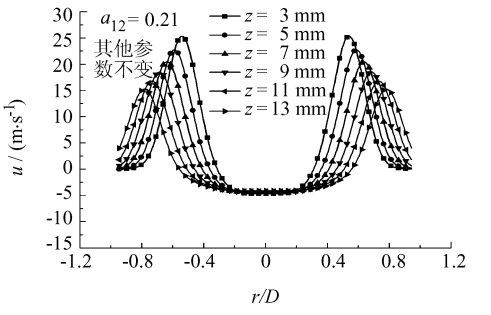


图 12　a_{12}减小形成的 u 分布

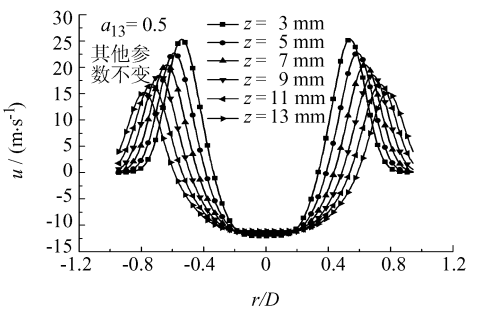


图 13　a_{13}减小形成的 u 分布

游距离的变化小. 这应当与旋流杯的整体旋流数大小有关.

图 8 说明,a_6 的减小会导致 u 分布峰值随下游距离的衰减变慢.

图 9 说明,a_9 的增大会导致 u 分布的回流区变宽,且回流区宽度随下游距离的变化大. 这与涡流器直径、以及整体旋流数大小有关.

图 10 说明,a_{10}的减小会导致回流区内的 u 分布变平缓.

图11说明,a_{11}的增大会导致回流区变宽,这与涡流器直径大小有关.

图12说明,a_{12}的减小会导致最大回流速度变小,这与整体旋流数及涡流器直径有关.

图13表明,减小a_{13}会导致最大回流速度变大,且最大回流速度随下游距离的变化变慢.

4 结 论

通过本文研究,可得结论如下:

1)本文提出的半经验关系式能更好地、定量地拟合旋流杯下游复杂的流场结构;

2)本文提出的经验关系式中的经验常数具有相对独立性,影响规律明确,适合大量实验数据的相关性研究.

参考文献(**References**)

[1] Wang H Y, McDonell V G, Sowa W A, et al. Characterization of a two-phase flow field downstream of a 3x-scale gas turbine coaxial, counter-swirling, combustor dome swirl cup[R]. AIAA-92-0229, 1992

[2] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelsen G S. Effect of mixer geometry on fuel spray distribution, emission and stability[R]. AIAA-98-0247, 1998

[3] Mongia H C, AI-Roub M, Danis A, et al. Swirl cup modeling: part 1[R]. AIAA 2001-3576, 2001

[4] Im K S, Lai M C, Tacina R. A parametric spray study of the swirler/venturi injectors[R]. AIAA-98-3269, 1998

[5] Park J H, Yoon Y, Jeung I S, et al. Effect of swirl cup on characteristics of fuel spray in gas turbine combustors[R]. AIAA 2000-3352, 2000

[6] Feng Shouyi, Huang Yong, Guo Zhihui. Experiments on the spray in a model combustor with swirl cup and primary hole flows[C]// Proc of 9th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System (ILASS-ASIA 2004). Shanghai: [s. n.], 2004: 217-224

[7] 郎洪俭,黄勇,郭志辉. 双轴向旋流杯燃烧室主燃区流场特性[C]//中国动力工程学会第三届青年科技工作者会议. 南京:[出版者不详],2005

Lang Hongjian, Huang Yong, Guo Zhihui. The flowfield in the primary region after a double axial swirl cup[C]// Proc of 3rd Yang Scholar Conference on Power Engineering. Nanjing: [s. n.], 2005 (in Chinese)

[8] Mongia H C, Gore J P, Grinstein F F, et al. Combustion research needs for helping development of next generation advanced combustors[R]. AIAA 2001-3853, 2001

[9] Rizk N K, Mongia H C. Semi-analytical fuel injector performance correlation approach[R]. AIAA-89-2902, 1989

[10] Rizk N K, Mongia H C. A semi-analytical aapproach validation for airblast atomizer[R]. AIAA-90-0316, 1990

[11] Rizk N K, Mongia H C. Further validation of a semi-analytical approach for fuel injectors of different concepts[R]. AIAA-90-2190, 1990

[12] Mongia H C, Vermeersch M, Held T J. A DRA modeling approach for correlating gaseous emissions of turbo-propulsion engine combustors[R]. AIAA 2001-3419, 2001

[13] Mongia H C, Vermeersch M, Thomsen D, et al. A simple reactor-based approach for correlating lean blowout of turbopropulsion engine combustors[R]. AIAA 2001-3420, 2001

(责任编辑:张 嵘)