

无隙锥形旋流器燃烧室中流场 分叉现象成因的探讨*

清华大学 焦树建** 刘 静 陈利如

【摘要】 本文以实验为依据,结合分析和推理,对在无隙锥形旋流器燃烧室中发生的流场分叉现象的成因进行了初步探讨。

主题词: 燃烧室 旋风燃烧 流场(流体力学) 分枝过程

1 前 言

在文献[1]中,作者介绍了在无隙锥形旋流器燃烧室中发生的流动分叉现象及其特性。为什么在这种燃烧室中会发生分叉现象?如何控制这种分叉流动对燃烧稳定性的影响?这就需要探索在这种燃烧室中发生流动分叉现象的成因。从理论上讲,产生分叉现象的必要条件是:描写所研究的体系运动特性的方程(组)必定是非线性的,它具有多重稳定解的内在根源,这是产生分叉现象的数学基础。无隙锥形旋流器的流场问题正是由非线性的N-S方程控制的,它具有形成多重稳定解,即产生分叉现象的内在基因。但是,同样由N-S方程控制的燃烧室流场并不是都会发生流动分叉现象的,就是说必然还要具备某些特殊的、会影响过程本身的、并驱使体系远离平衡态的反馈步骤,这些反馈步骤就是产生分叉现象的物理基础。那么,在无隙锥形旋流器燃烧室中驱使流场远离平衡态,也就是说使流场从第1种稳态流动工况转换为第2种稳态流动工况,或者反向转换的反馈步骤是什么呢?要研究清楚这个问题就需要作理论分析,并由实验来加以验证。本实验验证是在图1(图中1—喷嘴,2—喷油嘴间隙 δ ,3—环形引气隙缝,4—保护帽,5—出口环形隙缝,6—旋流叶片,7—束腰环,8—火焰管的过渡锥顶)所示的结构情况下进行的。当把环形引气隙缝3开启时,它就是“有隙”锥形旋流器。当把隙缝3堵死时,它就是“无隙”锥形旋流器。在上述两种情况下,都可以保有喷油嘴的间隙尺寸 δ 。

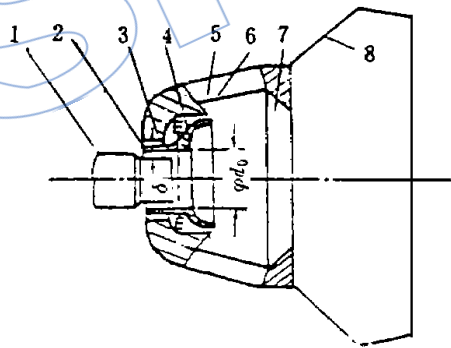


图1 锥形旋流器的结构

2 成因的推理

倘若把旋流器束腰环的出口端面与火焰管过渡锥顶之间包围的空间域(以后简称为“燃烧

空间”)作为分析流场的计算域,那么,燃烧空间中的流场从第 1 种到第 2 种稳态流动工况之间的相互转换,必定意味着束腰环出口端面上气流的速度场、压力场以及湍流特性都在发生相应的变化。实验证实了这一点。图 2(—第 1 种稳态流动工况,---第 2 种稳态流动工况, p_a 为大

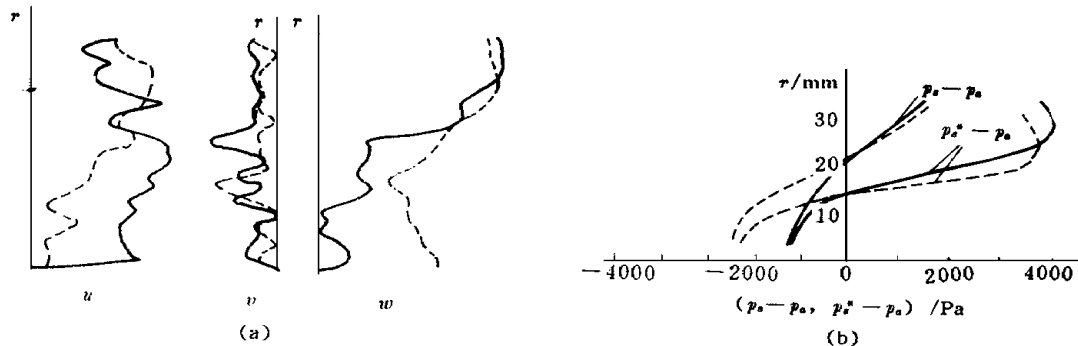


图 2 束腰环出口断面上轴向(u)、径向(v)、切向(w)速度及总压(p^*)与静压场(p_a)

气压力)上给出了当 $\delta = 3\text{mm}$ 时,无隙锥形旋流器束腰环的出口端面上速度场和压力场的变化关系。从无隙锥形旋流器的结构上看,由扩压器流来的气流,可以分别通过旋流器侧面的旋流叶片以及喷油嘴的间隙 δ ,流入旋流器内腔。前股气流是旋转气流,后者是平面射流。这两股气流的有机组合决定了束腰环出口端面上气流的流动参数。不难理解:当燃烧空间中的气流流场受到外界的扰动,而使其发生第 1 种和第 2 种稳态流动工况之间的相互转换时,必然会使旋流器内腔中的气流压力场发生变化,从而会引起喷油嘴间隙 δ 前后的压差,也就是平面射流流量发生变化(当然,从旋流叶片流入旋流器内腔的旋转气流量和参数相应地也会有所变化)。这就最终改变了束腰环出口端面上气流的速度场、压力场和湍流特性,它为流动分叉现象提供了前提。由此可见,在无隙锥形旋流器中存在的喷油嘴间隙尺寸 δ 是该旋流器发生流动分叉现象的结构因素之一。但是在许多常用的旋流器中,喷油嘴与旋流器的内轮毂之间也往往会有间隙尺寸 δ ,然而却不曾发现有流动的分叉现象。因而喷油嘴间隙 δ 的存在并非是无隙锥形旋流器燃烧室中发生分叉现象的充分条件。可以推论:必定还会有另外一些因素,与喷油嘴间隙 δ 相配合,共同组成了促使发生分叉现象的反馈步骤。研究表明:这个因素就是锥形旋流器本身的特殊结构形式。如图 1 所示,进入旋流器内腔的旋转气流和平面射流之间彼此非常靠近,它们需要相互汇流后才能通过同一个束腰环流向燃烧空间。显然,这两股气流参数和流量的变化对于束腰环出口端面上气流流动参数的影响是敏感的,这就为出现分叉现象创造了有利条件。倘若旋转气流与平面射流之间离得比较远,又无需相互汇流后一起流出旋流器的内腔,如通常使用的平面旋流器那样,那么,旋转气流与平面射流之间的相互影响就会明显减弱,流动的分叉现象就不一定会发生。探讨分叉现象时需要研究的另一个问题是分叉现象存在的稳定性,即需要探讨燃烧空间中的流场由一种稳态流动工况转换为另一种稳态流动工况时,当把外界扰动撤消后,流场为何能在新的流动工况下稳定下来的原因。

3 实验验证与分析

3.1 δ 对流动分叉现象影响的实验

在无隙锥形旋流器上做了 $\delta = 0 \sim 5\text{mm}$ 中的 6 种尺寸的实验,那时保护帽 2 上的内轮毂直

径 d_0 恒定不变。此外,还把图 1 所示的旋流器上的环形引气隙缝 3 打开,使之变成有隙锥形旋流器。在此旋流器上做了 $\delta=0$ 和 $\delta=3\text{ mm}$ 两种间隙尺寸的试验。以上试验都是在束腰环出口端面上气流的平均速度 $W_s=30\sim70\text{ m/s}$ 的条件下进行的。

试验表明:在此速度范围内无隙锥形旋流器中:① $\delta=0$ 和 1 mm 时,不论外界进行何种形式的扰动,燃烧空间中的气流流动都不会发生分叉现象,流场只呈第 2 种稳态流动工况的形式。② $\delta=2\text{ mm}$ 时,分叉现象开始发生,流场主要呈第 2 种稳态流动工况,第 1 种稳态流动工况则是欠稳定的。③ $\delta=3\text{ mm}$ 时,也会发生分叉现象,第 1 种稳态流动工况比较稳定,第 2 种稳态流动工况是欠稳定的。④ $\delta=4\text{ mm}$ 时,分叉现象仍然存在,第 2 种稳态流动工况相当稳定,第 1 种稳态流动工况却是非常不稳定的。⑤ $\delta=5\text{ mm}$ 时,已不再发生分叉现象,流场呈第 2 种稳态流动工况的形式。试验进一步表明:在有隙锥形旋流器中, $\delta=0$ 和 3 mm 时,都不会发生分叉现象,燃烧空间中的流场都呈第 2 种稳态流动工况的形式。

应该指出: δ 不同时,虽然各个流场都可以具有第 1 种或第 2 种稳态流动工况的特征,但它们具体的速度场和回流区边界尺寸却是各不相同的,例如:随着 δ 的增大,内侧回流区的启始截面将逐渐远离束腰环的出口端面。

这组实验证明了无隙锥形旋流器中喷油嘴的间隙 δ 确实是促使该旋流器发生流动分叉现象的结构因素之一。当 $\delta=0$ 或 1 mm 时,根本没有或者几乎没有通过喷油嘴间隙而形成的平面射流,因而外界的任何扰动都不会引起旋流器内腔中气流流量和参数的变化,故不会发生分叉现象。随着间隙 δ 的增大,平面射流量将逐渐增大,那时束腰环出口端面上气流的流动参数就取决于这股平面射流与由旋流叶片流入的旋转气流的有机组合。在外界扰动的作用下,由于旋流器内腔中压力场的变化,会导致喷油嘴间隙前后的压力差发生变化,这样就开始了分叉现象的上述演变过程。表 1 中给出了 $\delta=3\text{ mm}$ 时,相应于第 1 种和第 2 种稳态流动工况下,图 1 所示的 $E-E$ 截面上轴向速度场 $u=f(r)$ 的实测数据。由此确证:在第 1 种稳态流动工况下,通过 δ 间隙流入旋流器内腔的平面射流的流量确实是较多的。当流动状态因分叉现象而转入第 2 种稳态流动工况后,通过喷油嘴间隙流入旋流器内腔的平面射流量就会明显地减少。

表 1 喷油嘴间隙出口 $E-E$ 截面上的轴向速度场 ($W_s=45\text{ m/s}$)

测点 $r(\text{ mm})$	18	15	12	9	6	3	中心轴线 $r=0$
第 1 种稳态流动时的 $u(\text{ m/s})$	120.5	94.68	21.36	25.18	37.93	38.55	24.19
第 2 种稳态流动时的 $u(\text{ m/s})$	96.42	51.56	21.11	24.40	31.72	37.89	23.70

由此确证了这样一个论点,即:由于外界扰动作用而促使流经喷油嘴间隙的平面射流与流经旋流叶片的旋转气流之间产生了新的组合关系,致使束腰环出口端面上气流的流动参数发生变异,才为流场的分叉现象创造了条件。那么,为什么当外界扰动撤消后,流场就能在后一种稳态流动工况下稳定呢?显然,这一定与气流经扩压器的作用而流到旋流器之前的流场情况有关。锥形旋流器的迎风面是一个不良流线体,来流在绕流流过旋流器的迎风面而流入旋流叶片之前,必然会在喷油嘴与迎风面之间的空域内发生不稳定的气流分离现象。这些分离气涡刚好位于喷油嘴间隙 δ 和环形引气隙缝 3 之前,当来流流量和流经间隙 δ 的平面射流量 G_j 一定时,这个不稳定的分离气涡的流型就是一定的。当 G_j 改变时,分离气涡的流型就会发生变化,并趋于一个新的平衡状态。这种分离气流的流型可以随 G_j 量的变化而重新调整的特性,与喷

油嘴间隙尺寸 δ 的结合, 就是驱使流动体系远离平衡态, 使其发生分叉现象的反馈步骤。这就为流动分叉转换的稳定性提供了条件。

试验表明: 在喷油嘴与旋流器迎风面之间的空域内发生的、可以调整流型的分离气涡, 主要是由锥形旋流器迎风面的不良流线体的形状造成的。我们曾设计过两种结构形式完全不同的扩压器来与无限锥形旋流器相匹配。其中一个是由扇形入口过渡为圆形出口的三维扩压器; 另一个是两侧都是圆形断面的、扩压角很小的、不会发生气流脱离现象的轴对称的扩压器。在这两种扩压器上试验得到的无限锥形旋流器的分叉现象之特征, 以及分叉点发生和消失时喷油嘴的间隙尺寸 δ 值, 却是彼此相同的。那么, 为什么当喷油嘴的间隙 δ 增大到 5mm, 或者把环形引气隙缝 3 打开后(变成为有隙锥形旋流器 3), 流动分叉现象就此消失了呢? 显然, 这是由于流经喷油嘴间隙, 或者是流经环形引气隙缝 3 的平面射流流量加大到一定程度后, 位于喷油嘴与旋流器迎风面之间的空域内的不稳定的气流分离涡被消除了, 致使流动体系失去了重新调整旋流器流场特性的反馈步骤的缘故。

3.2 旋流器结构形式对流动分叉现象影响的实验

采用安装角 $\alpha = 45^\circ$ 的平面旋流器取代无限锥形旋流器做实验, 发现: 无论是喷油嘴间隙 $\delta = 0$ 或 $\delta = 3\text{mm}$, 任何形式的外界扰动都无法使安装平面旋流器的燃烧室发生流动的分叉现象。这是由于在这种旋流器中, 旋转气流与平面射流之间离得比较远, 无需互相汇流后一起流入燃烧空间, 致使这两股气流之间的相互影响比较小, 而且在平面旋流器之前也不会发生不稳定的气流分离涡的缘故。

3.3 无限和有隙锥形旋流器燃烧室中流场的测量结果

图 3 上给出了 $\delta = 3\text{mm}$ 时无隙锥形旋流器燃烧室中, $W_s = 45\text{m/s}$ 时的第 1 种第 2 种稳态流动工况下的轴向速度场(a—第 1 种稳态流动工况, b—第 2 种稳态流动工况, 1—外侧回流区边界, 2—内侧回流区边界)。图 4(a) 上给出了这种旋流器燃烧室在 $\delta = 0$ 时的轴向速度场。图 4(b) 上则给出了 $\delta = 3\text{mm}$ 时有隙锥形旋流器燃烧室中的轴向速度场。如前所述, 在后两种条件下流场不会发生分叉现象。

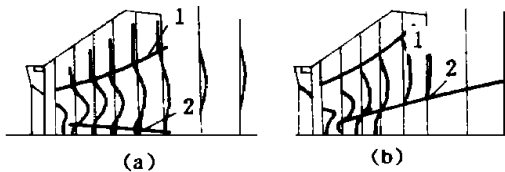


图 3 轴向速度场($\delta = 3\text{mm}$)

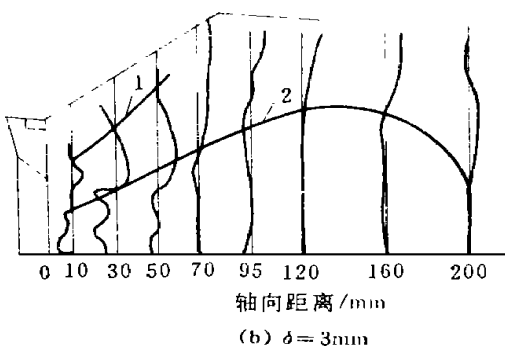
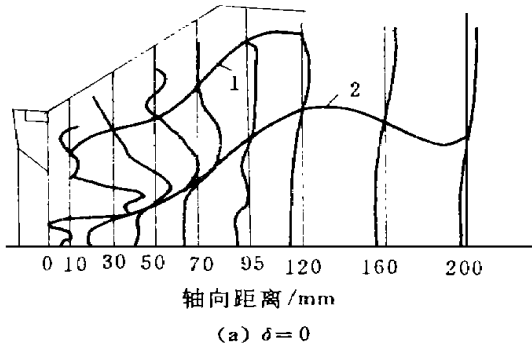


图 4 轴向速度场($W_s = 45\text{m/s}$)

在比较这些图后, 不难得出结论: 有流动分叉现象时, 由于流场的相互转换, 燃烧火焰会发

生不稳定的火焰脉动。但在后两种情况下,随着流动分叉现象的消失,火焰脉动现象将不复存在。然而,由于在有隙锥形旋流器燃烧室中内侧回流区的尺寸相当大,它必将具有较好的燃烧稳定特性。燃烧室的热态试验证明了这一点。

4 结 论

(1) 由于燃烧室的流场特性是由非线性的 N-S 方程控制的,因而它有发生流动分叉现象的可能性。

(2) 在锥形旋流器燃烧室中,喷油嘴的间隙尺寸 δ 或环形引气隙缝 3、旋流器迎风面的不良流线体形状,以及平面射流与旋转气流彼此靠得很近,而且必须汇流后一起流入燃烧空间的结构特点,是共同组成促使流动发生分叉现象反馈步骤的 3 个几何因素。它们是缺一不可的,否则流动的分叉现象就不会发生。

(3) 在锥形旋流器燃烧室中,使喷油嘴的间隙尺寸和环形引气隙缝减为零(即:使流经这些隙缝的平面射流流量降为零);或是加大这些隙缝的尺寸以消除在这些隙缝前存在的不稳定的分离气涡,都能使分叉现象消失,因为那时流动体系自动失去了发生分叉现象的反馈步骤。

(4) 采用有隙锥形旋流器是解决锥形旋流器燃烧室中火焰脉动和燃烧稳定范围窄的有效措施。

(5) 只有把流场的计算域扩大到无隙锥形旋流器前的整个扩压器区段,才能按 N-S 方程出现双重稳定解的方法来求解流动现象的分叉解。

参 考 文 献

- 1 焦树建,李进,刘静,陈利如. 无隙锥形旋流器燃烧室中流场的分叉现象. 航空动力学报, 1993, 8(4)

(责任编辑 魏星禄)