

扩散—热和气体动力学不稳定性对管道中 预混火焰形状的影响*

宋占兵 丁信伟 喻健良 刘润杰

(大连理工大学化工学院)

宋占兵等. 扩散—热和气体动力学不稳定性对管道中预混火焰形状的影响. 天然气工业, 2004; 24(4): 97~100

摘要 研究预混火焰在圆管或平行通道中的传播, 对许多工业燃烧装置或系统的安全操作和实际应用都具有重要的意义。扩散—热效应、气体动力学效应和体积力效应是造成预混火焰固有不稳定性, 改变预混火焰形状和传播特性参数的重要原因。针对管道中预混火焰的扩散—热不稳定性和气体动力学不稳定性, 以及网眼状火焰和郁金香状火焰的形成作了详细的阐述, 揭示了火焰形状形成与不稳定性之间的密切关系, 并得出了重要结论: 扩散—热不稳定性和气体动力学不稳定性分别对网眼状火焰和郁金香状火焰的形成起着决定性的作用。

关键词 火焰 传播 扩散 热 气体 动力学 不稳定 形状

针对火焰传播过程中的两种不稳定效应: 扩散—热不稳定性和气体动力学不稳定性, 对形成网眼状火焰和郁金香状火焰的影响进行了分析和总结, 揭示出火焰形状和不稳定效应之间的密切关系。

扩散—热不稳定性

Markstein^[1] 对碳氢化合物火焰的实验研究表明, 在一定的条件下, 平面层流火焰会变得不稳定, 形成独立的网眼状结构单元。Zeldovich^[2] 在燃烧实验中也发现, 大直径管道中的预混火焰经常会分解成尺寸约 1 cm 的独立单元结构, 并且这种独立的单元结构一直处于分解与合并的不稳定状态之中。在后来的诸多研究^[3~4] 中也发现了类似的现象。这就是所谓的网眼状不稳定火焰, 或者扩散—热不稳定火焰。一般的网眼状火焰前锋结构如图 1 所示, 箭头代表气体流动的方向。顾名思义, 扩散—热不稳定性对网眼状火焰的形成起着决定性的作用。

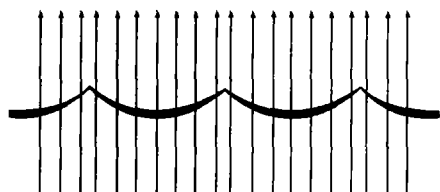


图 1 一般网眼状火焰前锋的形状

1. 网眼状火焰的形成

对预混火焰在管道中传播的研究发现, 当燃料混合物接近极限浓度, 而且扩散性很强的轻分子组分浓度很低时, 就会形成网眼状火焰^[5]。另外, 在富油型燃料—空气混合物的燃烧火焰中也能发现网眼状结构。此时虽然上游未燃气体依然呈层流流动, 火焰前锋还是会分解成许多单元。最明显的网眼状火焰结构是在富油型重组分燃料混合物(如异辛烷 C_8H_{18} 和正丁烷 C_4H_{10}) 中发现的, 在轻组分碳氢混合物(如乙烯 C_2H_4 和乙烷 C_2H_6) 中网眼状结构很不明显。在富油型甲烷 CH_4 的燃烧过程中, 没有网眼结构出现。同时, 所有以上提到的混合物(包括甲烷在内), 在缺油型状态下都不会有网眼状结构出现。缺油型燃料混合物中, 当氢气在溴^[6] 和空气^[7] 中的浓度较低时, 会出现较小的网眼状单元。总之, 只有可燃混合物中轻反应组分的浓度足够低时, 才会形成网眼状火焰结构^[8]。

早在 20 世纪 40 年代, Zeldovich^[2] 就对形成网眼状火焰的原因作过定性的解释。Zeldovich 指出, 热传导能够对火焰起稳定作用, 减小火焰的弯曲程度; 而扩散的作用却恰好相反。因此, 当分子的扩散速率远远大于混合物的热扩散速率时, 平面火焰就会失去稳定性。

Barenblatt^[9] 也认为, 截面上的热量传递和有限

* 本成果为国家自然科学基金(50076006)和教育部博士研究生学科点专项基金(97014114)资助项目。

作者简介: 宋占兵, 1977 年生, 博士研究生; 主要从事工业防爆抑爆机理与技术的研究。地址: (116012) 辽宁省大连市西岗区英华街 52 号。电话: (0411)83653316。E-mail: szb385@sohu.com

组分的扩散对反应区的燃烧温度所起的作用正好相反,因此会在对局部火焰速度的影响上相互制约。当分子扩散速率远大于热传递速率,即路易斯数足够小时,就会出现扩散不稳定性,形成网状火焰。

另外,Sivashinsky 通过计算火焰前锋的褶皱结构并与实验观测到的网状火焰结构进行比较^[1],进一步指出,网眼结构的形成是和扩散的不稳定性分不开的。

总结前人的理论和实验研究,可以得出这样的结论:扩散-热不稳定性是网状火焰结构形成的主要原因。

2. 网状火焰的数学描述——扩散-热模型

为了有针对性的描述扩散作用和热传递在网状火焰形成过程中的作用,理论上一般假设气体混合物的密度 ρ 处处相等。也就是说,暂时不考虑气体的热膨胀。因此,温度的变化不会引起动力学意义上的湍动,这样就可以将燃烧问题和动力学问题分开讨论。描述这一简化过程的理论模型通常称之为扩散-热模型^[10]。根据假设,等压火焰模型的能量和组分守恒方程可分别表达为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho v \cdot \nabla (C_p T) = \lambda \Delta T + Q \cdot w(\rho, T, y_A) \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial y_A}{\partial t} + \rho v \cdot \nabla (y_A) = \rho D \Delta y_A - w(\rho, T, y_A)$$

上式中: ρ 表示混合物的密度; C_p 表示热容; T 表示温度; t 表示时间; v 表示局部动力学速度; λ 表示传热系数; Q 表示反应热; $w(\rho, T, y_A)$ 表示化学反应速率; y_A 表示有限组分 A 的质量分数; D 表示扩散系数。

初始条件和边界条件会因研究对象和几何模型等的不同而有所差异,在此不作讨论。

气体动力学不稳定性

在研究网状火焰过程中,由于扩散-热效应的主导作用,通常会忽略热膨胀以及由热膨胀引起的湍动与火焰之间的互动作用。然而,这又会掩盖其他不稳定因素对火焰稳定性的作用,也直接影响了对网状火焰结构不稳定极限的准确描述。例如,对于强点火,在管道中以较高速度传播等条件下的碳氢化合物燃烧火焰来说,流体流动与化学反应和扩散效应等存在耦合作用是必然的,因此气体动力学特性就显得非常重要了。

最早对火焰的稳定性进行研究的是 Darrieus^[11]

和 Landau^[12]。他们在忽略体积力的情况下,将整个火焰简单地描述为一个密度的跃变,并以不变的速度在不可压缩无黏性流体中传播。研究表明,受热膨胀效应的影响,平面爆燃火焰是无条件不稳定的(称之为 Landau 不稳定性)。

1. 郁金香状火焰的形成

在两端封闭圆管中,从一端点火开始蔓延的预混火焰在传播过程中火焰形状会出现一个急剧的转变过程。开始时,运动的火焰锋面是向未燃气体凸起的,称之为蘑菇状火焰,而后会在火焰的中心形成一个向已燃气体凸起的尖端,这种火焰后来被称为郁金香状火焰^[13]。两种火焰结构的示意图见图 2。

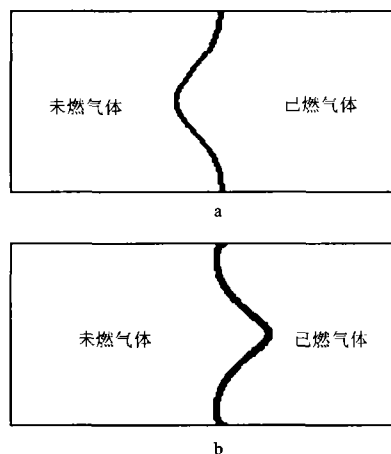


图 2 蘑菇状火焰(a)和郁金香状火焰(b)的结构示意图

在对郁金香状火焰进行深入研究之前,人们的注意力多集中在研究蘑菇状火焰上。Ball^[14]曾经运用松弛法对平行管道中的蘑菇状火焰进行了数值计算。Zeldovich^[15~16]在研究圆管中传播的蘑菇状火焰的稳定性时指出,由于非线性的稳定作用,蘑菇状火焰要比平面火焰稳定得多。后来对于蘑菇状火焰的研究多数都是与其他研究主题(如火焰在圆管中的熄灭等)同时进行的。

早在 1928 年, Ellis^[17]就在两端封闭的玻璃爆炸容器中拍摄到了郁金香状火焰的照片。Starke^[18], Jarosinski^[19]和 Gonzalez^[20]在近来的实验研究中,分别在圆柱容器和半封闭圆管内观察到了类似的火焰传播现象,证明了郁金香状火焰的存在。在较早的理论研究^[21~22]中,人们就发现火焰在不稳定时会在已燃气体的方向上出现带有尖端的褶皱火焰结构。但直到最近几年, Lee 和 Tsai^[23]对圆管中火焰传播的数值计算才使得对于层流火焰形状的研究更加系统化。他们详细研究了等温和绝热 2 种壁面条件

下,几种火焰的结构特征。Lee 和 Tsai 将在圆管中传播的线形火焰结构明确地分为 2 种:一种是郁金香状火焰,即从火焰的传播方向上看,火焰中心是凹陷的;另一种是蘑菇状火焰,从火焰的传播方向上看,火焰中心是凸起的。他们同时还指出,在绝热边界条件下,郁金香火焰较容易形成;而等温边界条件下,蘑菇状火焰会更稳定一些。但如果管道直径足够大,在 2 种边界条件下,2 种火焰结构都有存在的可能性。Hackert 等^[24]在多种边界假设条件下对火焰形状进行研究时也发现,随着管道直径的扩大,都存在着一个由完全凸起的蘑菇状火焰向双尖头的郁金香火焰的过渡过程。

对于郁金香状火焰形成的原因有诸多解释,包括火焰—压力相互作用机理^[25],已燃和未燃气体的涡流运动^[26]以及 Landau 的不稳定性^[12,27~28]机理等。Zoolinyan 等^[29]通过对形成郁金香状火焰的必要条件进行彻底分析,认为 Landau 不稳定性是形成郁金香状火焰的直接原因。

总结前人的理论和试验研究成果,可以这样来定性解释郁金香状火焰的形成:在等温壁面条件下,随着管道宽度的增加,燃烧速率也会增大。火焰逐渐形成郁金香形状就是试图通过抹平火焰锋面、减小火焰燃烧面积,以达到降低燃烧速率的目的。而在绝热壁面条件下,过高的燃烧速率又会促使未燃气体产生明显流动,这就进一步拉长了火焰,加速了燃烧速率。因此,火焰的郁金香状结构就更加明显了。这些都是流体气体动力学特性的体现。另外,总结前人的思想不难发现,Landau 不稳定性实际上是动力学不稳定性的一种。因此,可以说,内在的气体动力学不稳定性是形成郁金香火焰的直接原因。

2. 郁金香状火焰的数学描述

为了更准确地描述火焰传播过程,物理模型的建立必须体现与扩散—热效应同时存在并可能形成竞争的动力学效应。另外,描述郁金香状火焰的形成也必须考虑热膨胀效应。此时,流动区域内密度不再是常数,控制方程应该这样建立。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v v) = \nabla(\mu \nabla v) - \text{grad } p$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla(\rho C_p T v) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q \cdot w(\rho, T, y_A)$$
(2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho y_A) + \nabla(\rho y_A v) = \nabla(\rho D \nabla y_A) - w(\rho, T, y_A)$$

式(2)中符号的意义同式(1)。

结 论

着重阐述了火焰的扩散—热不稳定性及气体动力学不稳定性,以及以此为主导因素形成的网状状和郁金香状火焰。实际上,除了扩散—热不稳定性及气体动力学不稳定性外,还有其他一些因素,如浮力和重力等也同时影响着预混火焰结构的形成和稳定性。但为了简化计算,使得研究更具有针对性,一般的理论研究可以忽略次要影响因素。如上所述,气体动力学不稳定性在网状状火焰的形成过程中并不起主要作用,因此,在扩散—热模型中就没有考虑气体动力学效应。重力对预混火焰形状的产生也会有一定影响:在无重力的假设条件下,在狭窄的绝热管道中只能得到郁金香状火焰;但在正常重力作用下,蘑菇状火焰和郁金香状火焰都会存在。垂直向下传播火焰的不稳定性可能会因浮力作用而削弱或被完全抑制。

另外,除了扩散—热效应,气体动力学效应以及浮力和重力以外,壁面热损失对火焰形状的形成也有着非常大的影响,这部分内容将在以后的研究论文中发表。

参 考 文 献

- 1 Markstein G H. Experimental and theoretical studies flame front stability. *J Aeronaut Sci*, 1951;3: 18~26
- 2 Zeldovich Y B. Theory of combustion and detonation of gases. Russian; Acad Sci USSR, 1944
- 3 Markstein G H. Instability phenomena in combustion waves. Fourth symposium on combustion, 1953; 43~59
- 4 Markstein G H. Non-steady flame propagation. London; Pergamon, 1964
- 5 Sivashinsky G I. *Combust. Sci Tech*, 1977;15:137~146
- 6 Kokochashvili V I. Specific nature of combustion of hydrogen—bromine mixtures. *Zurn Fiz Chem*, Russian, 1951; 25: 445~449
- 7 Karpov V P. Cellular structure of flames under condition of constant volume and its relationship to vibrational combustion. *J Combustion explosion and shock waves*, 1965; 3: 1~8
- 8 Joulin G. *Combust Flame*, 1979;35:139~153
- 9 Branblatt G I. *Priklad Mekh Tekh Fiz*, N2, 1962
- 10 Branblatt G I *et al.* On diffusional—thermal stability of a laminar flame. *Priklad Mekh Tekh Fiz*, Russian, 1962
- 11 Darrieus G. Propagation d'un front de flamme: assai de theorie des vitesses anormales de deflagration par developpement spontane de la turbulence. *The Int Congr Appl*

- Mech, 6th, Paris, 1946
- 12 Landau L D. On the theory of slow combustion. Acta Physicochim, URSS, 1944; 19: 77~85
- 13 Oppenheim A K, Ghoniem A F. AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting, 1983; 1~20
- 14 Ball G A. Combustion Aerodynamics. A study of a two-dimensional flame. Harvard University, Department of Engineering Science and Applied Physics, 1951
- 15 Zeldovich Ya B. Combust Flame, 1981;40: 225~234
- 16 Zeldovich Ya B, Istrtov A G *et al.* Combust. Sci Technol, 1980;24: 1~13
- 17 Ellis O C de C. Fuel, 1928;7:502
- 18 Starke R, Roth P. Combust. Flame, 1986;66:249~259
- 19 Jarosinski J, Strehlow R A, Azarbarzin A. Nineteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1982;1549
- 20 Gonzalez M, Borghi R, Saouab A. Combust Flame, 1992, 88: 201~220
- 21 Sivashinsky G I. Annual Review of Fluid Mechanics, 1983; 15:179~199
- 22 Michelson D M, Sivashinsky G I. C & F, 1982; 48: 211
- 23 Lee S T, Tsai H T. Combust Flame, 1994; 99: 484~490
- 24 Hackert C L, Ellzey J L, Ezekoye O A. Combust Flame, 1998;112: 73~84
- 25 Guenoche H. In Nonsteady Flame Propagation, Pergamon Press, New York, 1964;107
- 26 Rotman D A, Oppenheim A K. Twenty-first Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1986; 1303~1312
- 27 Dunn-Rankin D, Thesis Ph D, University of California, Dept of Mech Eng, Lawrence Berkeley Laboratory, April, 1985
- 28 Dunn-Rankin D, Barr P K, Sawyer R F. Twenty-first Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1986; 1291~1301
- 29 Zoolinyan G A, Makhviladze G M *et al.* Numerical Investigation of Laminar Flame Form and Structure. Institute for Problems in Mechanics, Moscow; Russian Academy of Science, Reprint 1991;499
- (收稿日期 2003-12-18 编辑 居维清)

球塞气举排水采气技术首获成功

目前,由西南油气田分公司采气研究所设计施工与推广应用的球塞气举排水采气技术,在蜀南气矿合江采气作业区二里场气田二6井进行试验并获得了成功。该项新技术的成功应用填补了国内空白。

作为排水采气工艺有效的后续工艺接替储备技术,球塞气举是排气工艺的新工艺技术。它采用Y型双管柱(一注一采),在注入气流中投入气举球作为气液相间的固体界面,实现了稳定的段塞流,有效地防止液体回落,降低滑脱损失、注气量,减少回压增大采气压差,加之换小油管,改善了常规连续气举的两相不稳定性,在极低的地层压力下能连续气举,提高举升效率,最终提高气井采收率。

合江采气作业区选取了二里场气田二6井进行试验,通过修井和场站建设,于2004年1月6日正式启用球塞气举,一改过去生产一周就关井复压的生产状况。目前二6井已连续生产二个多月,月产气量为 $28.88 \times 10^4 \text{ m}^3$,是原来月产气量的3.8倍。

(陈敏 摘)