

文章编号: 0258-1825(2006)04-0430-03

# 超声速气流与反向射流的混合

冯 珩, 陈 宏, 单希壮, 李 斌, 俞鸿儒

(中国科学院力学研究所高温气体动力学研究开放实验室, 北京 100080)

**摘 要:**在不同的反向射流喷射角度条件下,对反向射流混合加热方案的混合效果进行了实验研究。采用空气和氢气燃烧混合物作为超声速载气流,常温下的空气作为反向射流。将混合前后流场的温度分布作为衡量载气流与反向射流混合效果的标志。实验结果表明:混合均匀度随混合距离的增加而提高;反向射流的喷射角度在40°角附近时混合均匀度最佳;增大反向射流初始压力可有效提高反向射流与载气流的流量比,从而提高混合效率。

**关键词:**超声速混合;裂解;激波

**中图分类号:** O358

**文献标识码:** A

## 0 引 言

乙烯是石油化学工业中的基础性原料。乙烯来源的绝大部分是通过裂解反应生产的,裂解反应的温度和高温反应的停留时间是影响乙烯产率的重要因素。竖管式裂解炉是裂解生产乙烯的主要设备,由于这种裂解炉反应温度不够高并且反应时间过长,不符合提高乙烯单程产率的反应要求<sup>[1]</sup>。为了克服管式加热炉外加热引起的缺点,Hertzberg<sup>[2]</sup>和俞鸿儒<sup>[3]</sup>曾先后提出相似的气动加热裂解乙烯方案。其工作原理是:将高温载气与原料气膨胀加速成多股超声速气流,两种气流交互且平行地在亚裂解温度限制条件下混合,混合物通过驻定激波后,其温度迅速升高到裂解温度并起始裂解。由于激波加热所需要的时间短、加热能力强,再利用急冷降温措施,可满足提高乙烯产率的反应要求。

由于不允许在混合过程中出现强激波,因而载气流速度与同向原料气流速度差不能太大。原料气滞止温度低于裂解临界温度,载气滞止温度亦不能太高。加上只有部分载气能与原料气良好混合,导致载气用量太多。Mattick等<sup>[4]</sup>完成的实验结果表明:需要耗用大量高温载气——水蒸汽(>96%),才能获得高的乙烯产率,致使运行成本太高,难以在工业中推广应用。

为了克服上述方案出现的难点,俞鸿儒<sup>[5]</sup>提出反向射流混合加热的新方案。利用氢气和氧气在燃烧

室混合燃烧产生高温水蒸气,通过喷管加速至超声速,与反向喷入的超声速原料气射流剧烈混合,原料气温度迅速升高并开始裂解。选取适当长度的实验段,以控制原料气体高温反应停留时间,然后迅速冷却。用此方法来提高乙烯的单程裂解产率。

为了实现反向混合气动加热裂解乙烯方案,首先需要解决两方面的关键问题。一是反向混合速率和均匀性问题,该问题直接影响到对原料气的快速加热和反应时间的控制;二是原料气与载气流的流量比问题,它关系到裂解乙烯的产率和成本。

若两种气流的组分不同,测出混合物组分的空间分布即可获得混合均匀度。采用实时分析测定,则需要昂贵的仪器设备;若采样后再进行分析,则不能及时获得实验结果。邢小月等<sup>[6]</sup>和本文均采用测量载气流与反向射流混合前后的温度分布来反映二者的混合均匀度,这种方法简单方便而且具有实时性。因为载气流与反向射流总温不同,测定混合前后气流温度的变化情况即可决定同一截面混合均匀度的分布。

本文是前期工作<sup>[6]</sup>的继续。当时直接利用裂解原理性实验的高温载气发生器进行实验,载气流温度很高,热电偶支杆难以承受较长时间加热而采用扫描测量,因此实验结果需进一步改进。本工作改用固定的热电偶测温排,提高了测量数据的可靠性。此外,前期采用注入水雾来调节载气流温度,由于水雾与载气流混合不太好,载气流本身的均匀性受到很大影响。本工作采用氢气与空气混合燃烧,调节两者流量

\* 收稿日期: 2005-06-11; 修订日期: 2005-08-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19632002).

作者简介: 冯 珩(1978-),男,中国科学院力学所硕士,主要从事气动方法用于生产化工产品的实验研究.

比即可调控燃烧后混合物的温度。燃烧后混合物的温度降到 800 K 左右, 便于采用热电偶测量温度。

## 1 实验装置与实验方案

如图 1 所示, 实验装置分为燃烧室、喷管、反向喷射段和测量段 4 个部分。反向空气通过与载气流方向垂直的金属管引入, 在金属管壁的母线上均匀地开了一排孔。反向空气射流方向与载体气主流方向相反时, 喷射角度 定义为  $0^\circ$ ; 垂直时定义为  $90^\circ$ 。在  $0$  到  $90^\circ$  的范围内共进行 8 种不同喷射角度实验。采用一组热电偶对实验段混合流场进行温度分布测量。通过更换长度不同的过渡段, 进行不同截面的温度分布测量。

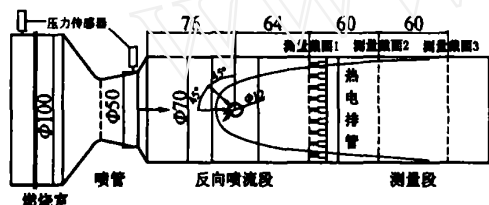


图 1 反向射流混合加热实验装置简图

Fig. 1 Sketch of the set-up by counter flow mixing

通常热电偶的温度恢复系数在 0.9 以上, 因此热电偶测量到的温度值接近当地气流的滞止温度。每个热电偶外形相同, 流场参数相近, 因此温度恢复系数非常接近, 便于相互比较。本实验所用热电偶加装了不锈钢外套, 测量温度一般不宜过高, 因此氢和空

气的混合比按照燃烧后产生约 800 K 混合物的要求确定, 即控制燃烧室的滞止温度在 800 K 左右, 滞止压力约为 0.4 MPa。实验中, 反向射流的流量与载气流的流量比控制在  $1/5 \sim 1/4$ 。在燃烧室、喷管出口处和实验段分别安装了压力传感器, 用于监测实验时流场运行的情况。

## 2 实验结果与分析

图 2 所示为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  三种反向射流喷射角度下, 流场在三个截面处混合前后气流温度分布的变化情况。图中横坐标为反向喷射段径向距离, 纵坐标为轴向距离。通过比较混合前后流场各个截面气流温度的变化, 来反映载气流与反向射流的混合效果。从图 2 可以看出: 在反向射流喷入前, 由于受非型面喷管的非均匀性和绕反向喷射杆的影响, 截面 1 测量的温度分布略为不均匀, 中间低两边高, 到了壁面附近由于受冷壁的作用温度最低。在下游两个测量截面, 除壁面附近的温度较低外, 其余温度相对比较均匀。反向射流喷入后与载气流相互碰撞和掺混的开始阶段, 混合的均匀性较差。中心区域温差大, 两边温差小, 到了壁面附近温度几乎没有变化。说明中间区域以反向射流为主, 温度比较低; 主流的一部分被挤到两边, 未与反向射流充分混合, 因此温度变化小, 甚至没有变化。随着混合过程的发展, 到了下游截面混合逐渐均匀, 反映在混合前后温度差的变化逐渐均匀。在截面 3 混合前后两种温度分布曲线接近成两条水

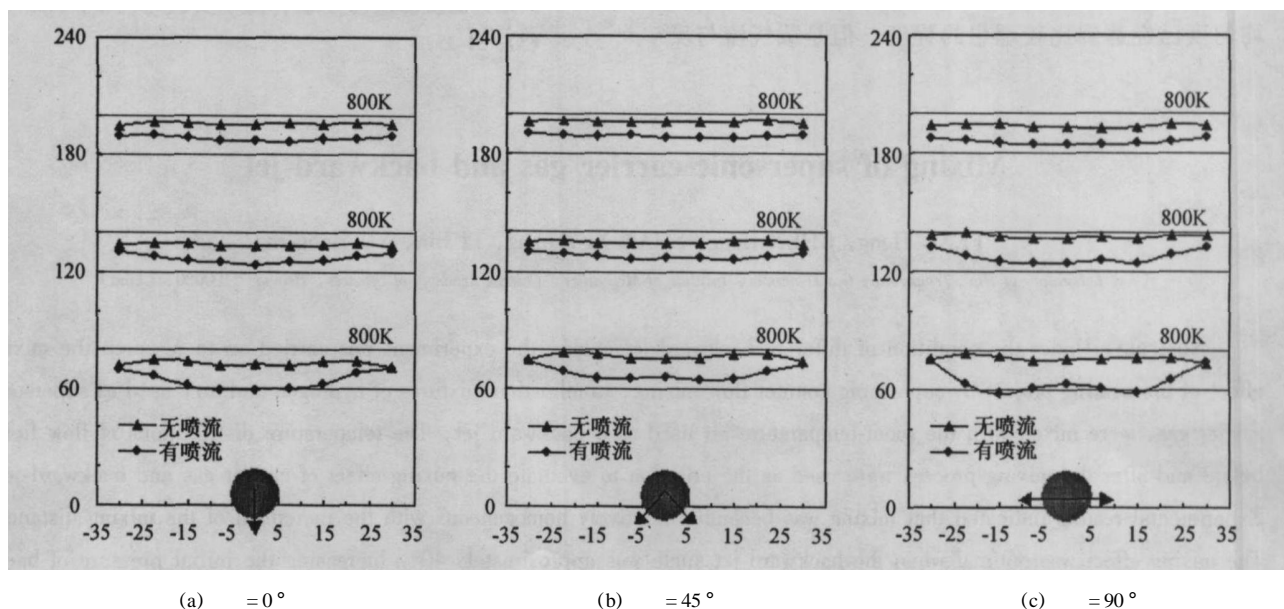


图 2 反向射流喷射角度对混合流场温度分布的影响

Fig. 2 The distribution of temperature in counter flow with different jet angles

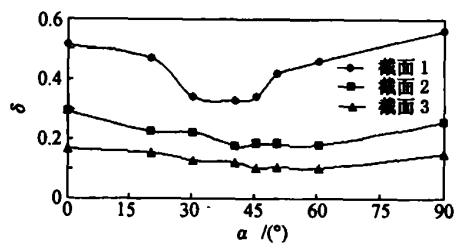


图3 不同喷射角度时温度不均匀度的分布

Fig. 3 The distribution of temperature difference before and after mixing

平线。从图2还可以看出,喷射角度的不同对载气流与反向射流的混合效果有显著的影响。

为了量化比较不同喷射角度对混合效果的影响,定义温度不均匀度为:  $\delta = \frac{\Delta T}{\bar{T}}$ 。其中,  $\Delta T$  是同一截面各点混合前后温度差的均方差,  $\bar{T}$  是该截面各点温度差的平均值。当  $\delta$  值小于某一数值时,可以认为温度达到平衡,即载气流与反向射流均匀混合。图3为不同喷射角度时温度不均匀度的比较。对应于同一角度,  $\delta$  值随混合距离的增加而减小,混合逐渐均匀。对应于同一截面,起始截面1时,反向喷射角在40°附近时  $\delta$  值较小,混合均匀性较好;到了下游截面3处,  $\delta$  值大体趋于一致,温度基本达到平衡,载气流与反向射流均匀混合。

从图3可以看出,喷射角度的不同对于上游混合效果的影响十分显著,随着混合距离的增加这种影响逐渐减弱,在不到3倍管道直径的混合距离处,混合均匀度已经达到比较理想的程度。但是载气流与反

向射流通过激波后,温度将急剧升高,加热所需时间极短,缩短混合的距离能有效地控制高温反应停留时间。此时,考虑喷射角度的影响是必要的。

### 3 结 论

通过测量混合前后气流温度分布的变化情况,可以细致的研究超声速载气流与反向射流的混合效果。混合均匀度随混合距离的增加而提高;反向射流的喷射角度在40°角附近喷射时混合均匀度最佳。在现有实验条件下,增大反向射流初始压力可以提高反向射流与载气流的流量比,其流量比已经达到1/4,并且仍有提高的潜力,从而提高混合效率。

### 参 考 文 献:

- [1] DONG Y F, YU H R, SHAN X Z. On nonequilibrium of pyrolysis process in the manufacture of ethane [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 15(1): 23-31.
- [2] MATTICK A T, HERTZBERG A, RUSSELL D A. Shock controlled reactors. In: "Shock Waves", K, Takayama (ed.) [R] Springer Verlage, 1992, 1289-1294.
- [3] MATTICK A T, KNUWLEN C, RUSSELL D A, et al. Pyrolysis of hydrocarbons using a shock wave reactor [A]. *Proceedings of 21st International Symposium on Shock Wave* [C]. Australia, 1997.
- [4] 俞鸿儒等. 反向射流混合加热裂解装置及生产乙烯的方法[P]. 中国发明专利, 专利号 ZL01, 145130.0.
- [5] 邢小月, 陈宏, 林建民, 俞鸿儒. 超声速反向混合实验及其压力温度测量[J]. *流体力学实验与测量*, 2003, 17(3): 31-35.

## Mixing of supersonic carrier gas and backward-jet

FENG Heng, CHEN Hong, SHAN Xi-zhuang, LI Bin, YU Hong-ru

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Under the condition of different backward-jet angle, the experiment was carried on to research the mixing effect of the heating project by supersonic counter flow mixing. Combustion mixtures of hydrogen and air, used as supersonic carrier gas, were mixed with the room-temperature air used as a backward jet. The temperature distributions of flow fields before and after the mixing process were used as the criterion to evaluate the mixing effect of carrier gas and backward-jet. Experimental results indicated that mixing was becoming relatively homogeneous with the increment of the mixing distance. The mixing effect was optimal when the backward-jet angle was approximately 40°. Increasing the initial pressure of backward-jet was an effective way to increase the specific flux between the backward jet and carrier gas, and thus the mixing effect raised.

**Key words:** supersonic mixing; pyrolysis; shock wave