

# 超声速反向混合均匀性实验

陈宏, 冯珩, 林建民, 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:** 将温度不超过 800K 的氢气和空气燃烧混合物作为超声速载气流与常温下的反向空气射流进行混合加热实验。用一组热电偶测量混合前后流场温度分布的实验结果表明: 反向射流的喷射角在 0° 到 90° 的范围内, 角度亦大对流场的干扰亦大; 而 45° 角附近范围内喷射时混合效率最佳。在不到 3 倍管道直径的混合距离处, 混合均匀度已达到比较理想的程度。在现有的实验条件下, 反向气流与载气流的流量比已超过 25%, 并仍有提高的潜力。说明反向射流混合方案基本可行。

**关键词:** 裂解; 燃烧; 激波; 超声速混合

## Study of homogeneity of supersonic counter-flow mixing

CHEN Hong, FENG Heng, LIN Jian-min, YU Hong-ru

(LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Combustion mixtures of hydrogen and air, used as supersonic carrier gas at temperatures lower than 800 K, 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 measured with thermocouples. Experimental results indicated that at jet angles of 0-90° interference to the flow field was proportional to the jet angle and that mixing efficiency was optimal when the jet angle was approximately 45°. Mixing was relatively homogeneous at a mixing distance slightly less than three times the pipe diameter. Under the imposed experimental conditions, the specific flux between the backward jet and carrier gas flow exceeded 25% and, moreover, the specific flux could be increased further. The experiments indicated that use of a backward jet for mixing is fundamentally sound.

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

## 0 引言

乙烯是石油化学工业中最基础和最重要的原料。乙烯来源的绝大部分是由竖管式裂解炉裂解产生, 由于这种裂解炉反应温度不够高并且停留时间过长, 不符合高乙烯产率反应要求<sup>[1]</sup>。为了克服管式加热炉外加热引起的缺点, 俞鸿儒<sup>[2]</sup>和美国的 Hertzberg 教授<sup>[3]</sup> 曾独立地提出相似的气动加热裂解乙烯方案。首先将原料气与高温载气加速到超声速并在亚裂解温度限制条件下混合。混合后的原料气被加速和有限制升温, 加速后的原料气通过激波后, 其温度将急剧升高。由于激波加热所需时间极短, 加热温度又能高到所要求的温度, 再利用急冷降温措施, 可满足乙烯高产率的要求。

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,根据超声速燃烧混合经验,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水蒸气,经喷管加速至超声速后,与迎面喷来的原料气射流相遇,两股气流剧烈混合,原料气温度立即升高并开始裂解。适当选取实验段长度,以控制原料气体高温反应停留时间,然后迅速冷却。用此方法来获得高的乙烯单程产率。

在实现反向混合气动加热裂解乙烯方案,并在工业中应用之前,主要有两方面的关键问题需要解决:1)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温和反应时间的控制;2)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生产效率。在以氮气代替原料气对反向混合方法进行的原理性实验表明<sup>[6]</sup>:载气流本身的均匀性受注入水的雾化措施优劣的影响较大;加上实验段温度较高,用接触式测量温度法检验混合均匀性效果欠佳。

为了能够比较仔细地研究反向射流混合加热方法的均匀性,本文采用将氢气和空气燃烧产生约低于 800K 的混合气体作为载气流与常温下的反向空气射流(代替原料气)混合,并改进了反向射流的引入方式,用常规铠装热电偶测温方法并结合压力测量来检验混合速率和均匀性。

## 1 反向混合实验装置

### 1.1 实验装置

根据反向射流混合加热的要求,我们将实验装置进行了改进,见图 1。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  $90^\circ$ 。实验时共进行了  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  三种情况的喷射。其中除  $0^\circ$  喷射外,其余角度的喷射都是关于主流方向对称的,即  $\pm 45^\circ$  和  $\pm 90^\circ$  分别同时喷射。为防止反向射流壅塞超声速流场,主喷管出口处通过扩张的过渡段,将实验段直径从喷管出口处的 50mm 扩大到了 70mm。载气流的 Mach 数也由喷管出口处的 2 增加到了约 2.65。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。

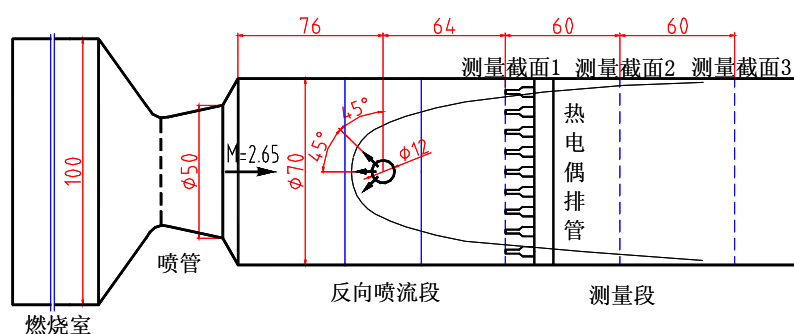


图 1 反向射流混合加热实验装置简图

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

### 1.2 供气与测量装置

供气和测量装置见图 2。气水路系统是由氢和空气组成的载气、反向空气和冷却水系统等部分组成。载气中的氢气从高压气瓶组经汇流排流出,而空气由容积为 1.44 立方米的高压罐流出。两种气体均经过减压器、电磁阀和临界喷管组成的稳压系统,然后通过管路进入燃烧室。由于空气流量大,采用双路进气方式。一路用于点火,另一路用于调节载气流的温度。反向空气与氢气类似,采用多个高压气瓶并通过汇流排集中供气,并通过双路压力调节系统以增加反向空气的流量。无论是那种气体,调节减压器的开度,可以将气体的压力稳定在预定值。稳压后的气体通过

临界喷管，质量流量恒定可控。电磁阀用来开启和关闭管路。

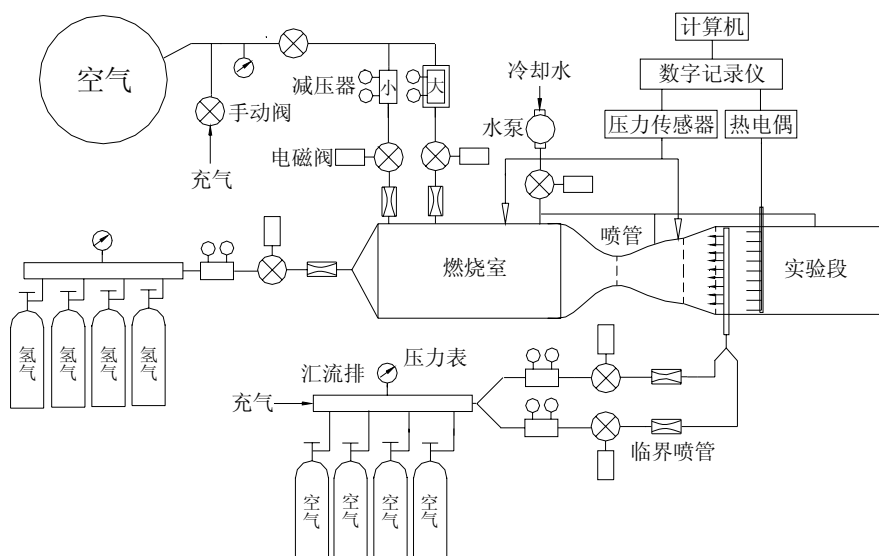


图2 供气和测量系统简图

Fig.2 Diagram of the supply and measurement system

实验中我们在燃烧室、喷管出口处安装了压力传感器。传感器采用应变式压力传感器，量程为 1.5MPa。压力传感器输出的电压信号经过应变放大器放大后，由 Sc500 采集系统进行采集，再由计算机进行处理和分析。

同时采用一组热电偶对实验段混合流场进行了温度分布测量。热电偶所用的材料是镍铬-镍硅，由于加装不锈钢外套最高测量温度一般不超过 1000℃。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。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验状态参数

在本实验中燃烧室及喷管的尺寸是固定的。氢和空气混合比按燃烧后产生约 800K 混合物的要求也应尽量保持固定的比值，但在实际操作中难免有些偏差。因为流量控制不仅与稳压器的开阀精度有关，而且与气瓶的压力也有些影响。进行调节的参数主要是氢气和空气的流进量。氢气和空气来流的滞止压力，主要是通过稳压器的压力输出值来调节，一般在 1~1.5MPa 范围，以便控制燃烧室的滞止压力在 0.4MPa，滞止温度在 800K 左右，载气流量约为 600~800g/s。反向空气的流量约为 120~200g/s。

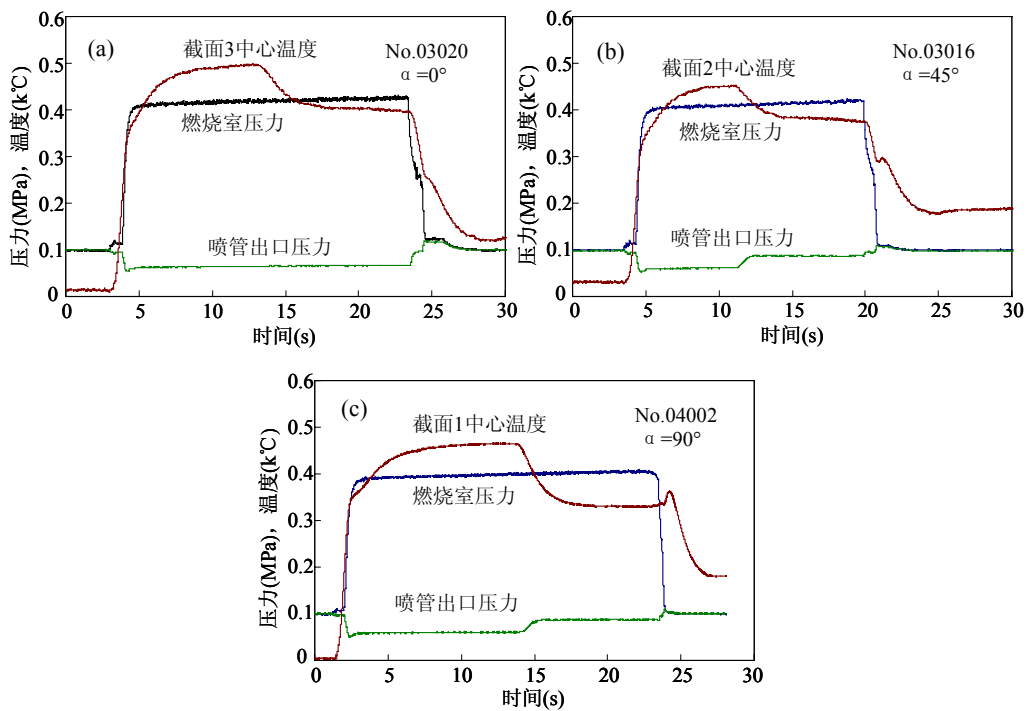
起动方式是：首先同时打开氢气和小流量的空气阀门，点火后紧接着再打开大流量的空气阀门；在实验段建立稳定的超声速流场后，再引入反向空气与载气流进行混合。

### 2.2 结果分析

为了比较混合前后的温度变化，在喷入反向空气前，先记录下无反向射流的流场温度分布测量值，然后测量喷入反向空气后混合流场的温度分布。图 3 所示为混合实验过程中，反向射流喷入前后，燃烧室和主喷管出口处的压力随时间变化曲线，以及测量截面中心处热电偶测到的温度随时间变化曲线。可以看出：启动过程瞬间完成，启动后燃烧压力平稳，反向射流的喷入对燃烧

室压力没有影响。没有反向射流时，主喷管出口的压力在启动后是平稳的。而喷入反向射流后，超声速载气流将产生脱体激波，并且与边界层产生干扰，其对喷管出口管壁处压力的影响大小与反向射流的喷射角度有关。喷射角度亦大，对超声速流场的干扰亦大，喷射角为  $0^\circ$  时，几乎没有影响。从喷管出口处压力的越升幅度分析，反向射流对载气流的干扰，也只限于喷管出口附近的下游，并未影响到上游。因为假若 Mach 数为 2 的激波退到喷管出口处上游时，喷管出口处测量到的压力跃升处前后压力比应该约在 4.5 倍。而实际测量结果远远低于此值。说明反向射流与载气流的流量比超过 20%（有些实验流量比超过 25%）时，对载气流的干扰还没有对主流场产生壅塞，只是由于激波与边界层的干扰使管口附近压力略有些升高。

从图 3 还可以看出：喷入反向射流后，因为反向射流与载气流温度相差较大，混合流场中心处的温度有明显的下降。通过测量混合前后流场各个截面气流温度的变化，来反映混合均匀度和混合效果。图 4 反映的就是在三种反向射流喷射角度下，流场在三个截面处反向混合前后气流温度分布的变化情况。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流杆的影响，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，其于温度相对比较均匀。由于需要通过更换过渡段，来完成不同截面的测量。因此，不同截面和不同喷射角的测量结果需要通过不同次的实验来获得。每次实验滞止温度和压力略有不同，但一般载气流滞止温度不超过 800K，滞止压力约在 0.4MPa 左右。



(a).  $m_R/m_\infty=21.7\%$ , (b).  $m_R/m_\infty=16.5\%$ , (c).  $m_R/m_\infty=21.4\%$

图 3 混合实验过程中的压力温度曲线

Fig.3 Pressure and temperature curve in mixing experiments

从图 4 可以看出：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平线。图 5 直接反映出混合前后，无量纲温差在不同喷射角度和不同截面处的分布情况，其中  $To_i$  和  $T_i$  分别表示混合前后气流当地温度。从三种喷

射角度的实验结果可以比较出：反向射流在 45° 喷射角混合的效果最佳，其次为 0° 喷射角，而在 90° 喷射时混合的效果相对较差。

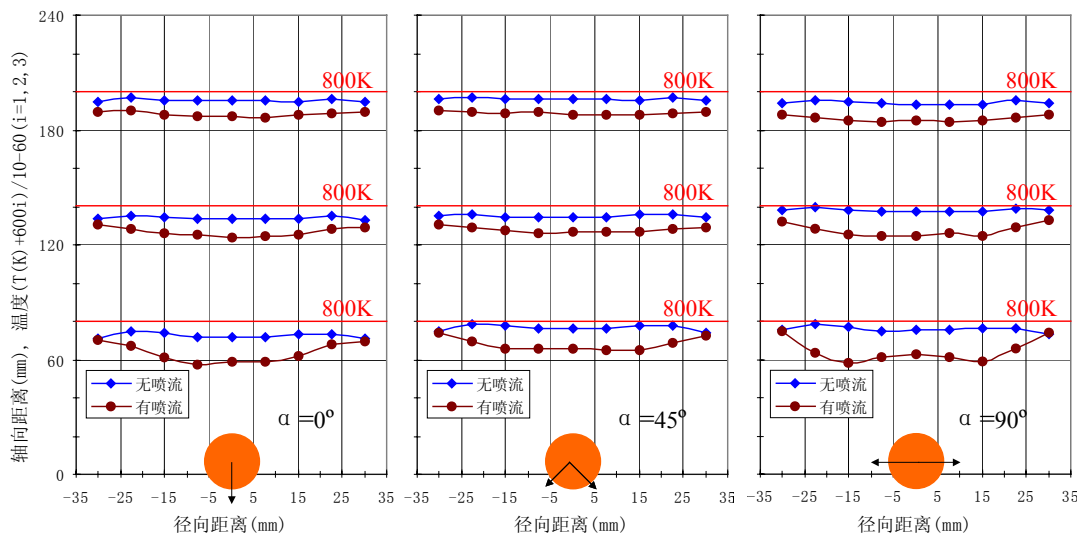


图 4 反向射流喷射角度对混合流场温度分布的影响

Fig.4 The distribution of temperature in counter flow with different jet angles

应该说，超声速气流混合过程相当复杂，不仅有两股气流之间的碰撞、剪切，还存在三维涡系和激波的干扰。除了可以使用价格昂贵和设备复杂的光学方法测量混合流场的均匀度以外，我们认为：在没有化学反应的流动中，通过测量混合前后气流温度的变化情况，来反映混合的均匀度和混合效率，这种简易的测量方法也是行之有效的。

### 3. 结论

用温度不超过 800K 的氢气和空气燃烧混合物作为超声速载气流与常温下的反向空气混合加热实验，结合对流场温度分布的测量，可以细致地研究混合均匀性和混合效率。反向射流的喷射角在 0° 到 90° 的范围内，角度越大对流场的干扰越大；而 45° 角附近范围内喷射时混合效率最佳。在不到 3 倍管道直径的混合距离处，混合均匀度已达到比较均匀的程度。在现有的实验条件下，反向气流与载气流的流量比已超过 25%，并仍有提高的潜力。

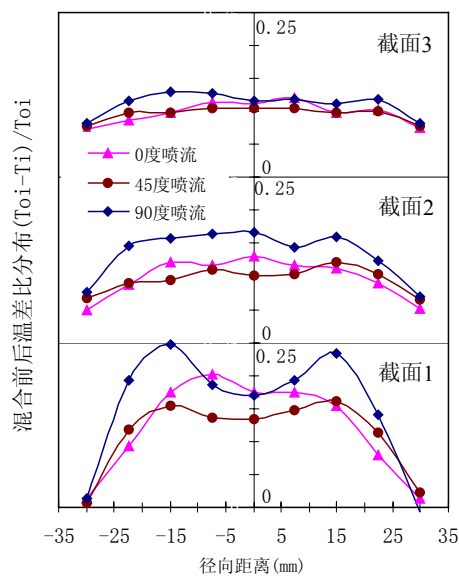


图 5 混合前后无量纲温差的分布情况

Fig.5 The distribution of temperature difference before and after mixing

### 参考文献:

[1] Dong Y F, Yu H R, Shan X Z. On nonequilibrium of pyrolysis process in the manufacture of ethane. Acta Mechanica Sinica, 1999, 15(1): 23-31

[2] 俞鸿儒, 气动技术在裂解制造乙烯新工艺中的应用, 中国科学院“八五”项目可行性研究报告, 1992.

[3] Mattick A T, Hertzberg A, Russell D A. Shock controlled reactors. In: “Shock Waves”, K, Takayama (ed.) Springer Verlage, 1992, 1289-1294.

[4] Mattick A T, Knwlen C, Russell D A, et al. Pyrolysis of hydrocarbons using a shock wave reactor [A]. Proceedings of 21<sup>st</sup> International Symposium on Shock Wave [C]. Australia: [s n], 1997

[5] 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 2001(申请号 01145130.0)

[6] 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”, 流体力学实验与测量, 2003, 17(3): 31~35.