

文章编号: 1007-3124(2003)03-0031-05

超声速反向混合实验及其压力温度测量

邢小月, 陈宏, 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:对超声速反向射流混合加热方案进行实验验证。实验结果表明:控制向燃烧室注入水雾的流量可以方便地调节燃烧室的温度和压力;用双路氢氧进气系统易于实现稳定的点火和燃烧。用热电偶测量混合前后的流场温度分布的初步结果表明,反向射流混合方案基本可行。

关键词:裂解; 氢氧燃烧; 激波; 超声速混合

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A

Temperature and pressure measurements in the supersonic counter flow mixing

XING Xiao-yue, CHEN Hong, LIN Jian-min, YU Hong-ru

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

Abstract: The heating scheme by supersonic counter flow mixing has been tested. The experimental results show that the temperature and pressure in a combustion chamber can be adjusted conveniently by controlling the rate of water flow sprayed in it and the ignition and stable flame of oxyhydrogen mixture can be easily realized by using double oxygen and hydrogen supply. The temperature distributions of the flow field measured by two-platinum lawrencium thermocouple certify that the heating scheme by counter flow mixing is basically feasible.

Key words: pyrolysis; oxyhydrogen combustion; shock waves; 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^[1]。为了克服管式加热炉外加热引起的缺点,我们和美国的 Hertzberg 教授^[2,3]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。Hertzberg 完成的实验结果表明该加热方案仍存在严重的技术困难^[2]:需耗用大量高温载气-水蒸汽,致使运行成本太高,难以在工业中推广应用。这是由于必须在亚临界温度条件下混合,以及同向混合效率不高引起的。

为了克服上述方案出现的难点,根据超声速燃烧混合经验,笔者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汽,经喷管加速至超声速后,与迎面喷来的原料气射流相遇,两

• 收稿日期: 2002-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助(19632002)

作者简介: 邢小月(1977-),男,河北唐山人,硕士.研究方向:高温气体动力学.

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。该文以氮气代替原料气,对反向混合方法进行了原理性实验,验证新方案的可行性。

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,笔者设计了一套实验装置,见图1。原料气通过金属管引入,在头部开多个孔,其中在轴线上的孔喷出的原料气射流方向

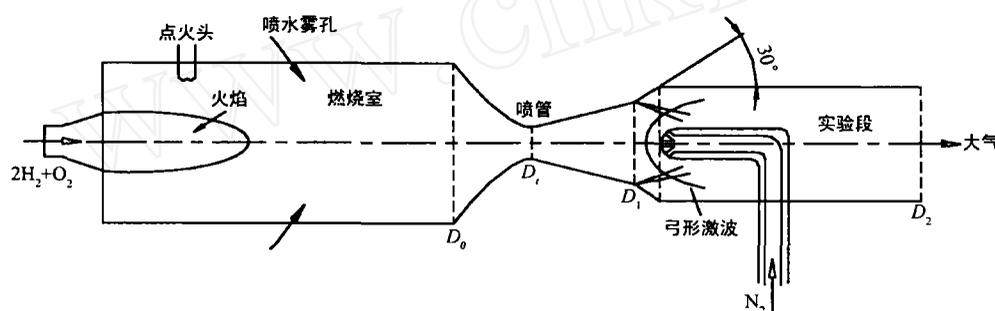


图1 反向射流混合加热实验装置简图($D_0 = 100\text{mm}$ 、 $D_1 = 50\text{mm}$)

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。气水路系统是由载体气、原料气和高压水引入系统及冷却水系统等部分组成。由氢氧组成的载体气从各自高压气瓶组流出,经汇流排分别流向两组由减压器、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。

由于实验用的气量比较大,氢氧和氮气均采用多个气瓶同时供气方式,并通过汇流排集中送气。通过调节减压器的开度,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。采用两套稳压系统,一是因为所需的气量大,二是便于点火和启动后燃烧室压力的调节。

高压水是用一个高压容器,底下盛水上面充入高压空气的方式提供。高压空气由高压气瓶提供,并通过减压器调节压力。高压水通过一组雾化喷嘴,将水雾化后喷入燃烧室中。

实验中对燃烧室和喷管出口进行了压力测量。传感器采用应变式压力传感器,量程为1.5MPa。压

与主流相反,其余侧向孔射出的射流方向与主流斜交。同时这组原料气引入管需外套一个金属管,中间通冷却水,起防护和冷却作用。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,将实验段直径扩大到 $D_2 = 70\text{mm}$ 。我们知道氢氧完全燃烧后的温度约3200K,因此需要向燃烧室注入水蒸汽以降低燃烧室的温度。根据上面给出的条件,用化学平衡的气体动力学方法计算氢气、氧气和水各自加入的流量分别为 $\dot{m}_{\text{H}_2} = 0.0127\text{kg/s}$ 、 $\dot{m}_{\text{O}_2} = 0.1005\text{kg/s}$ 和 $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1794\text{kg/s}$,总流量为 $\dot{m}_0 = 0.2926\text{kg/s}$ 。

力传感器输出的电压经过应变放大器放大后,由Sc500采集系统进行采集,再由计算机进行分析和分析。

同时采用热电偶对实验段流场进行了温度测量。热电偶所用的材料是铂铑30-铂铑6,最高温度可以测量到2100K。为了测量混合气流的温度随空间径向变化情况,笔者设计了热电偶探针位移装置,探头离原料气喷嘴前缘的轴向距离为5cm。

2 实验结果与分析

2.1 氢氧流量控制实验

为了充分利用氢氧燃烧热以及便于产品分离,氢氧配比选用化学当量比,即氢氧的质量流量比为1:8。

氢氧各自的流量是通过使用稳压器和临界喷管实现的。临界喷管是利用喷管喉部达到声速后,喉部下游反压不影响气体质量流量的原理,来控制充气流量的一种简便有效的装置^[4]。

校准方法是:用若干个已知容积和压力的氮气

瓶,分别接入氢气和氧气汇排管系统中,在给定减压
器出口压力和时间的情况下对外放气,根据放气前后
(在等温的条件下)气瓶的压力差来计算临界喷管的

喉道面积:

$$A_{cr} = V\Delta p / (R\sqrt{TKp^*}\Delta t)$$

其中 V 是高压气瓶和汇排管等管路的容积总

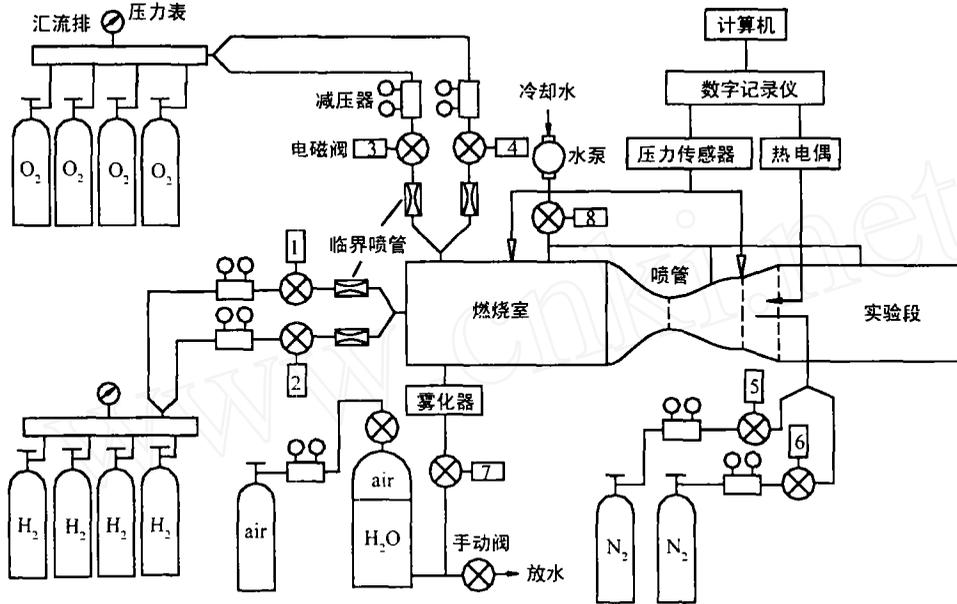


图2 供气和测量系统简图

Fig.2 Diagram of the supply and measurement system

和, Δp 为气瓶实验前后的压力差, R 和 K 分别为氮
气的气体常数和流量常数, T 为气瓶温度(近似为环
境温度), p^* 为减压器出口总压, Δt 为放气时间。根
据校准得到的喷管喉道面积及流量公式,可以知道氢
氧气体通过减压阀提供的总压比为:

$$p_{H_2}^*/p_{O_2}^* = 0.5A_{cr,O_2}/A_{cr,H_2}$$

2.2 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
氧混合比按要求也应尽量保持固定的化学当量比,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,而且气瓶的初始压力也有些
影响。进行调节的参数主要是氢氧气体的流进量和
水雾的加入量。氢气和氧气来流的总压,主要是
通过调节稳压器的压力输出值来实现,一般在 $1 \sim$
 1.5MPa 范围内调节。高压水雾的压力一般也在 $1 \sim$
 1.5MPa 范围内调节。以便控制燃烧室的总压在 $0.$
 95MPa , 总温在 1740K 左右。

起动方式是:首先打开第一路氢氧进气系统,点
火后再进入高压水蒸汽,紧接着打开第二路氢氧进气

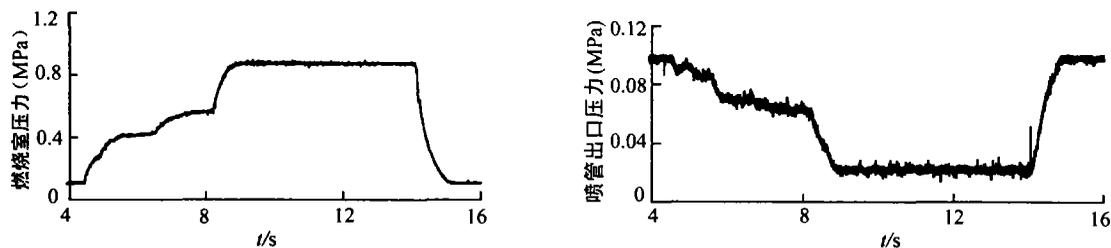
系统;在实验段建立超声速流场后,引入原料气并与
载体气进行反向混合。

2.3 结果分析

图3和图4分别为无反向射流和有反向射流时,
燃烧室和主喷管出口截面的压力曲线。明显看出,由
于启动时三个不同的操作过程形成了三个压力逐渐
升高的启动台阶。启动后燃烧压力是很平稳的,与是
否存在反向射流没有关系。没有反向射流时,主喷管
出口的压力在启动后是很平稳的;而存在反向射流
时,由于受边界层干扰的影响,压力有些升高。

图5和图6分别为无反向射流和有反向射流时,
实验段流场的温度测量曲线。由于受启动程序的影
响,两种情况都可以看出启动时,温度是先升高后下
降,然后又升高的现象。

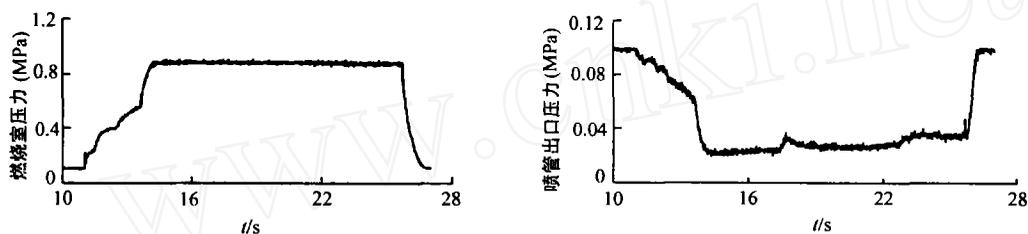
01019号实验的加水量不少,但温度却比设计值
高,说明水的汽化效果并不好。由图5(b)看出,从
 $r = 15\text{mm}$ 沿径向还未到壁面时,温度急剧下降,一
方面是由于冷壁的影响,另一方面可能是由于未来得
及参加反应的水雾沿管壁附近流动的结果。



$$\dot{m}_{H_2} = 13g/s, \dot{m}_{O_2} = 94.7g/s, \dot{m}_{H_2O} = 52g/s, \dot{m}_{N_2} = 0$$

图3 无反向射流压力曲线(No.01015)

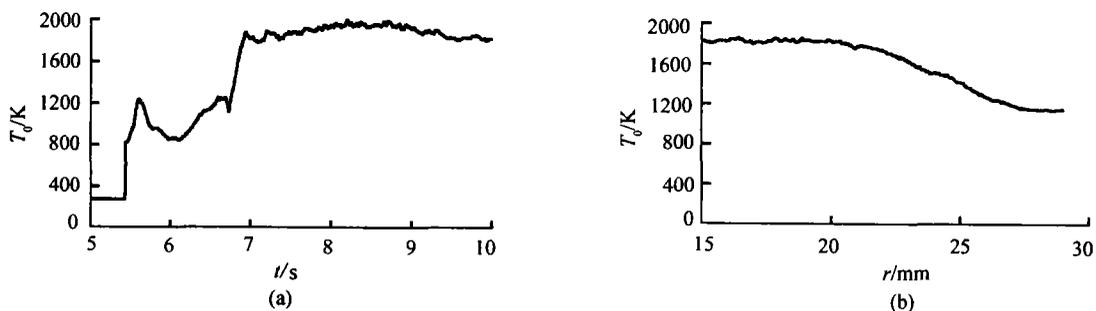
Fig.3 Pressure curve without counter jet



$$\dot{m}_{H_2} = 18.4g/s, \dot{m}_{O_2} = 88.8g/s, \dot{m}_{H_2O} = 188g/s, \dot{m}_{N_2} = 15g/s$$

图4 有反向射流压力曲线(No.01023)

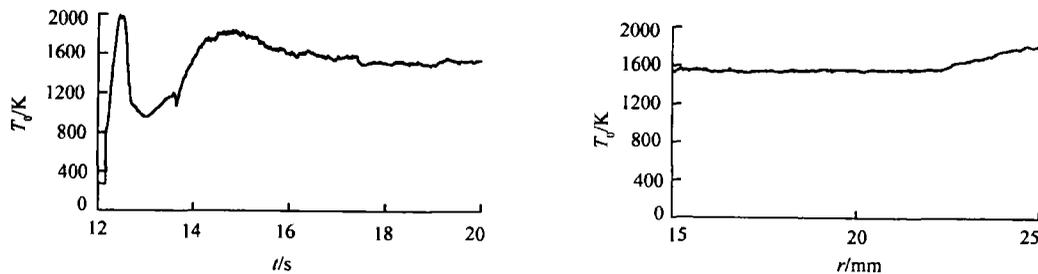
Fig.4 Pressure curve with counter jet



$$\dot{m}_{H_2} = 18g/s, \dot{m}_{O_2} = 81g/s, \dot{m}_{H_2O} = 175g/s, \dot{m}_{N_2} = 0$$

图5 无反向射流实验段温度曲线(No.01019)

Fig.5 Temperature curve of the test chamber without counter jet



$$\dot{m}_{H_2} = 18.4g/s, \dot{m}_{O_2} = 88.8g/s, \dot{m}_{H_2O} = 188g/s, \dot{m}_{N_2} = 13.5g/s$$

图6 有反向射流实验段温度曲线(No.01023)

Fig.6 Temperature curve of the test chamber with counter jet

从图6可以看出,常温状态的原料气反向喷入载体气参加混合后,总温从1800K降到了1500K。据估算混合区的平均速度只有三百多每秒米,因此混合后的平均静温与总温相差不大。这样的温度正是乙烯裂解理想的温度。从温度沿径向变化曲线可知:在混合流场的核心区域之外,温度又逐渐升高。这也反映出在整个实验段,除核心区外混合并不是处处均匀的。提高流动混合均匀性的研究将是下一步工作重点。

3 结 论

采用向燃烧室注入水雾的方法可以调节燃烧室的温度和压力,但要采取较好的雾化措施促使其易于汽化,或直接注入水蒸汽;用双路氢氧进气系统易于实现稳定的点火和燃烧;初步的实验表明:超声速反

向混合不失为一种好的裂解乙烯的方法,原料气射流反向喷入后与主流的均匀混合尚有待于进一步改进。

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] MATTICK A T, HERTZBERG A, et al. Shock-controlled reactor. In: "Shock Waves", K, Takayama(ed.) Springer Verlag, 1992, 1289 ~ 1294.
- [3] 俞鸿儒. 气动技术在裂解制造乙烯新工业中的应用. 中国科学院“八五”项目可行性研究报告, 1992.
- [4] 毛容海, 林建民, 俞鸿儒. 高焓超声速载气的产生. *流体力学实验与测量*, 2001, 15(3): 1 ~ 6.