第 17 卷 第 3 期
1999 年 9 月

空 气 动 力 学 学 报
ACTA AERODYNAMICA SINICA

Vol. 17 No. 3
Sep., 1999

双过临界喷管充气混合装置

赵 伟 俞鸿儒

中国科学院力学研究所 LHD 开放实验室, 北京 100080

摘要 双过临界声速喷管充气混合装置能够快速、均匀地混合两种气体, 其背压适用范围比临界声速喷管提高了 40%, 性能良好, 结构简单。经边界层修正、实态标定和色谱检验, 混合效果良好。适用于各种燃烧、爆轰实验的气体混合。

关键词 过临界喷管; 混合; 充气; 流量

中图分类号 V 211.73

符 号

m	气体摩尔数;	n	气体混合比
$\dot{m}$	质量流量	K_p	曲线斜率
μ	气体分子量	R	通用气体常数
P	压力	M	马赫数
T	温度	o	滞止状态(下标)
A	喷管截面积	$*$	临界状态(上标)
γ	比热比	b	背部(下标)
ρ	密度	e	出口(下标)
t	充气时间		

0 引 言

气体混合比及其空间分布均匀度对于燃烧、爆轰的稳定性和重复性起着极其重要的作用。从事预混气体燃烧和爆轰如氢氧燃烧驱动、氢氧爆轰驱动激波风洞的研究工作者十分重视精确控制氢氧混合比和提高密封容器内气体空间混合均匀度。

50 年代到 60 年代, 国外有人将混合好的气体贮放数周, 待其自动混合均匀后, 再充入驱动段使用。由于混合气在贮存和再充入过程中可能意外点火, 增加了操作的危险性。目前比较通用的方法是先充入一种气体, 再充入另一种气体或分成多阶段轮流充气, 借助充气射流的扰动和扩散使其混合均匀[1]。然而充气射流作用区域小, 气体扩散速率很慢, 需很长时间才能使全容器混合均匀。为了充分利用充气时射流的混合作用, 常常采用多孔充气, 而高压容器开口太多对容器强度不利。力学所曾采用在驱动段底部安装小直径充气管, 通过沿驱动段轴线的大量小孔同时充气来促进混合均匀。但该充气管在实验过程中容易损坏, 增加了操作的复杂性。即使采取了这些措施, 预混气体的均匀度仍难以满足燃烧重复性的要求。

本文于 1997 年 10 月 28 日收到, 1998 年 7 月 22 日收到修改稿。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

德国Aachen 工业大学激波实验室采用电控质量流量计[2], 将氢氧两种气体按要求比例边混合边充入。这种方法能保证气体混合的均匀度。但装置造价昂贵, 外部预混容腔内也存在意外点火的危险, 94 年曾发生事故。

在总结前人工作经验的基础上, 我们采用双临界喷管[3]。按混合比同时充入燃烧剂和氧化剂气体, 两喷管尽可能地靠近(如为细长管可安装在同一截面相对的地方), 两种气体充入容器后相互强烈干扰、混合, 然后流向容器其他部位。这种充气装置结构简单, 效果良好。随着氢氧爆轰驱动激波风洞技术的进一步应用[4], 进行高超声速、高焓实验所要求的驱动气源压力也随之提高。由于气瓶气压所限(瓶压小于 15MPa), 临界喷管的充气压力范围 ($P_b < 0.528P_o$)受到限制。在继承临界喷管充气装置优点的基础上, 双过临界喷管扩大了充气压力范围。

1 原理及装置

图 1(a)所示是渐缩——渐扩喷管, 又称拉伐尔喷管, 其连接两个具有不同压力的空间。若喷管喉道处气体速度低于当地声速, 则喷管的气体流量不仅与贮室状态、喉道面积有关, 而且受背压大小的影响。反之气体的流量仅与贮室状态、喉道面积有关, 而与背压无关。

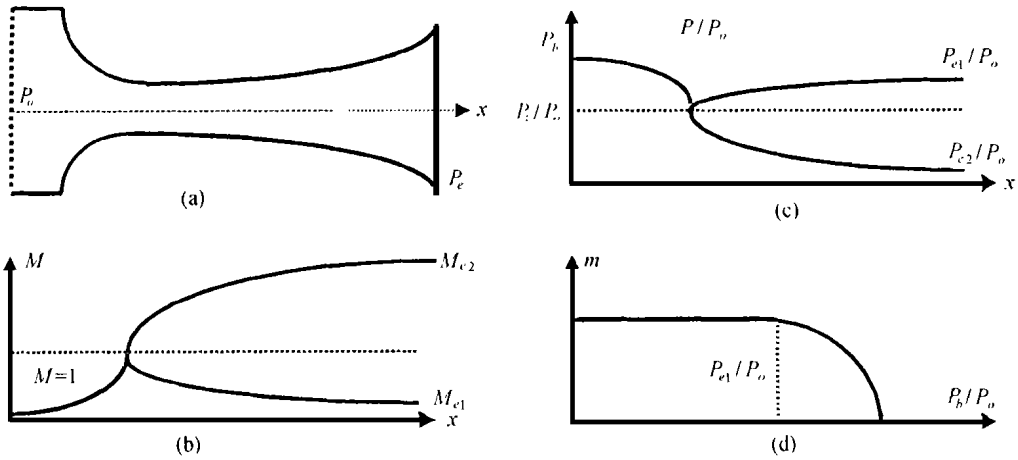

图 1 拉伐尔喷管喉部为声速时, 不同背压下马赫数、压力、流量分布

Fig. 1 Distribution of Mach number, pressure and flux under the varied background pressure, when the velocity of flow is sonic at the throat

图 1(b)、(c)、(d)中的曲线表示不同背压条件下拉伐尔喷管内马赫数、压力、以及流量变化。由图 1(b)、(c)可以看出, 喉部气流速度达到声速后, 喉部下游的渐扩管中可以有两种流动。一是减速的亚声速流, 在出口处$M = M_{e1}$; 另一个为增速的超声速流; 在出口$M = M_{e2}$, 显然:$M_{e2} > M_{e1}$, $P_{e2} < P_{e1}$。

喷管充气时, 背压 P_b 由零逐渐增加, 可能存在三种过程

(1) $P_b/P_o \leq P_{e2}/P_o$

喉部是声速流动, 气流在出口须经复杂的膨胀过程才可达到 P_b/P_o, 但流量恒定。且流量只由喷管前贮室状态参数 P_o、T_o 和喉道面积A^* 确定, 不受背压大小影响。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\dot{m} = \rho^* A^* a^* = P_o \sqrt{\frac{\gamma\mu}{RT_0}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} A^* \tag{1}$$

(2) $P_{e2}/P_o < P_b/P_o \leq P_{e1}/P_o$

喉部是声速流动, 从喉部到喷管出口产生激波, 但流量恒定。流量公式同(1) 式。

(3) $P_b/P_o > P_{e1}/P_o$

喉部处于亚声速流动状态, 喉道声速非恒定, 流量与背压 P_b 也有关, 故流量非恒定, 不易进行控制。

在保证背压 P_b/P_o 满足(1) (2) 两种状态时, 由于流量只与贮室状态、喉道面积有关, 故可以通过控制贮室压力 P_o 和温度 T_o, 调节喉道面积 A^*, 达到流量控制的目的。具体设计中, 给定喉道面积和喷管出口面积比 A^*/A_b, 则 P_{e1}、P_{e2} 之值由以下(2) 式 - (3) 式得到。

$$\frac{A^*}{A_b} = M_e \left\{ \frac{1+\frac{\gamma-1}{2}}{1+\frac{\gamma-1}{2}M_e^2} \right\}^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \tag{2}$$

$$\frac{P_e}{P_o} = \left(1+\frac{\gamma-1}{2}M_e^2\right)^{-\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \tag{3}$$

临界喷管利用流量雍塞原理, 保证 $P_b/P_o \leq P^*/P_o \approx 0.528$, 则喷管最小截面处的气流速度达到当地声速, 此时通过喷管的流量恒定, 即由喷管前的贮室状态参数和喷管喉道截面积决定而不受背压大小影响, 公式同(1) 式。

双过临界喷管充气装置如图(2) 所示。稳压器用来保持出口气体压力恒定, 即 P_o 恒定。由过临界喷管控制流量。进入容器时, 使两种气体在入口截面形成 180 °角射流。由于初始充气时 $P_b \ll P^*$, 喷管喉部流速为声速, 整个充气过程中如果 $P_b < P_{e1}$, 即可保证流量恒定。其中 P_{e1}/P_o 的值可以由所设计喷管的 A_b/A^* 控制, 理论上 P_{e1}/P_o 范围在 0～ 1 之间。表 1 是过临界喷管在几种 A_b/A^* 条件下 P_{e1}/P_o、P_{e2}/P_o 的值, 可以看出, 与临界喷管的原理相比, 过临界喷管控制流量的压力适用范围大大提高。

表 1　过临界喷管出口截面与喉道截面积比与出口压比 P_e/P_o 的关系

Table 1　The ratio of area vs ratio of pressure at the nozzle exit and the throat

A_b/A^*	2	4	6	10	20
P_{e1}/P_o	0.9375	0.9850	0.9938	0.9978	0.9994
P_{e2}/P_o	0.0935	0.0298	0.0150	0.0068	0.0025

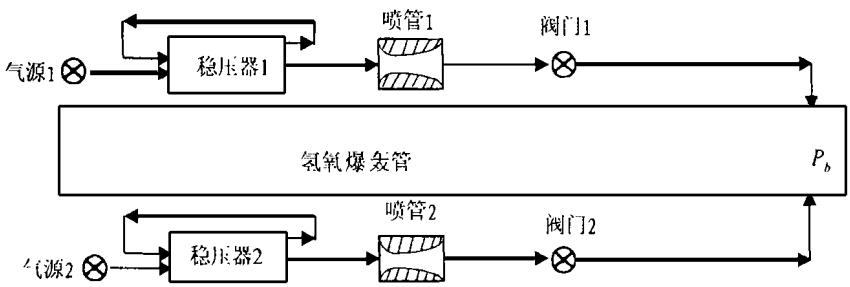

图 2　双过临界喷管充气装置示意图

Fig. 2　Sketch map of filling device with the double over-critical nozzles

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 设计、计算、标定和调节

若混合气体的充气压力 P_b 以及稳压器出口的气体压力 P_o 给定, 将 P_b/P_o 代入公式(3) 和(2), 可确定喷管的喉道面积和出口面积比 A^*/A_b, 据此进行喷管设计。考虑到各种损失, A^*/A_b 应选得尽量小一些。

气体的混合比实质是气体的分子数比, 即摩尔数比。单位时间流过喷管的气体摩尔数为

$$m = \mathring{m}/\mu \tag{4}$$

设两种气体的混合比为 n, 则 $n = \dfrac{(m)_1}{(m)_2}$ (5)

将(1) 和(4) 代入(5) 得到

$$n = \frac{(P_o)_1}{(P_o)_2} \times \sqrt{\frac{(T_o)_2}{(T_o)_1}} \times \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \times \frac{(A^*)_1}{(A^*)_2} \tag{6}$$

假定在充气过程中, 气源气体的温度近似相等, 即 $(T_o)_1 \approx (T_o)_2$, 则(6) 进一步简化为

$$n = \frac{(P_o)_1}{(P_o)_2} \times \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \times \frac{(A^*)_1}{(A^*)_2} \tag{7}$$

若气体 1 为氢气, $\mu_1 = 2$; 气体 2 为氧气, $\mu_2 = 32$

$$n = 4\frac{(P_o)_1}{(P_o)_2} \times \frac{(A^*)_1}{(A^*)_2} \tag{8}$$

在给定双过临界喷管喉道截面积之比时, 可以通过调节两种气体的气源压力比 $(P_o)_1/(P_o)_2$ 控制二者的混合比。另外, 由于充气喷管喉道直径很小($d < 1$mm), 受边界层影响, 喉道有效流动面积减小。加工与测量亦难以保证精确度, 实际的喷管喉道截面积比应通过标定来精确测定。混合气体的摩尔比即单个气体在容器中的分压比。实际充气过程中保持二者同步, 则两种气体在容器内的压力上升率的比值为气体的混合比。利用这一原理进行标定: 将单一气体分别充入固定的容器, 并测定容器内气体压力上升速率, 在保证气源总温 T_o 保持不变的条件下, 两种气体在容器内压力上升速率的比值即为气体的实际混合比。若设定的气体混合比不符合要求, 可通过调节总压 P_o 来达到要求。

实际工作中应特别注意温度变化的影响, 若以气瓶作气源, 充气过程中气瓶压力下降, 总温 T_o 亦跟着下降, 质量流率逐渐增加, 如果两种气体气瓶压力下降速率不一样, 将影响混合比, 但如果气瓶容积较大, 充气比较缓慢, 通过细长易传热的管壁散热, 使气源总温基本保持为室温, 则影响可忽略, 否则就应进行总温变化修正。

在充气过程中, 封闭容器内压力逐渐升高, 受压缩功作用, 温度亦逐渐升高, 停止充气后, 压力会出现微量下降, 这是由于气体通过管壁散热所致, 需待压力平稳后才可作为充气压力。

3 实验结果和讨论

图 3 是充气喷管的标定曲线, 气源的压力 $P_o = 0.6$MPa。由曲线可以看出: 当容器内所充气体的压力 P_b 接近 0.5MPa 即气源压力 P_o 的 83% 时, 喷管的流量基本保持恒定。图 4 是为检

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

验过临界喷管的充气混合特性, 取氮气和氧气两种气体进行混合充气的标定曲线。由曲线(4)可以知道: 设定的氮气与氧气混合比$(K_p)_{N_2}/(K_p)_{O_2}=2$。沿充满混合气体的容器轴向取样, 通过色谱测定的结果见表 2, 气体混合比沿轴向的不均匀度约 3%

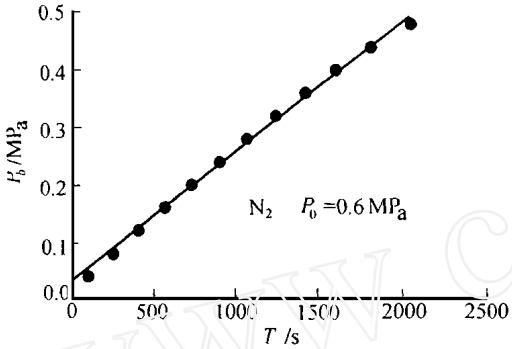

图 3　充气容器内的压力-时间曲线

Fig. 3　The pressure vs time in the filling tank

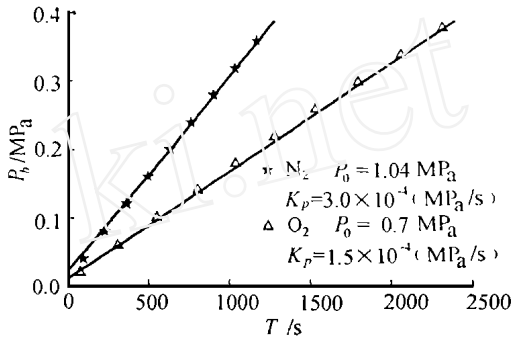

图 4　氮气与氧气喷管充气标定曲线

Fig. 4　The calibrated curves of the nitrogen and oxygen nuzzles

表 2　色 谱 测 量 结 果

Table 2　Test results of chromatogram

取样轴向位置 X	1.8m	4.8m	6.2m	8.5m	平均值
色谱测定混合比	2.091	2.060	2.034	2.056	2.060
误　　差	4.5%	3.0%	1.7%	2.8%	3.0%

实验结果表明: 过临界喷管充气混合装置是一种简单、有效的充气混合装置, 在燃烧、化工等其它有关领域亦可发挥重要作用。

本实验得到范秉诚同志的大力协助, 在此表示衷心感谢。

参　考　文　献

1　Bakos R J, Calleja J F, Erdos J I etc. An Experimental and Computational Study Leading to New Test Capabilities for the Hypulse Facility with a Detonation Driver. AIAA 96-2193 June 17-20, 1996.

2　Olivier H, Groning H. Some Results to Achieve in the Aachen Shock Tunnel TH2. Report, Shock Wave Laboratory Aachen Germany, 1993.

3　于伟, 俞鸿儒. 临界喷管充气混合装置. 气动实验与测量控制, 1994, No. 8(3): 25-28.

4　Yu H R, Esser B, Lenartz M, Gronig H. Gaseous Detonation Driver for a Shock Tunnel. Shock Waves, 1992, 2, 245-254.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

The Double Over-Critical Nozzles Device for Filling and Mixing Mixture Gases

Zhao Wei Yu Hongru

(LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

Abstract The double over-critical nozzles device can mix two kinds of gases quickly and uniformly. Good capability and simple configuration, the pressure range which can be applied in filling the mixture was upgraded 40% higher than that of the critical-nozzles. With boundary-layer modification, virtual calibration, color-spectrum measurement, the mixed result was proved to be fairly good. This device can be used to fill mixture gases in some combustion and detonation experiments.

Key words over-critical nozzle; mixing; filling; flux

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net