

# 一种能同时测量喷嘴下游 气液流强的两相探针的研制

吴晋湘

(河北工业大学动力机械系, 天津, 300132)

刘卫东 周进 钟良生 庄逢辰

(长沙国防科技大学, 长沙, 410073)

STUDY OF THE TWO PHASE PROBE TO MEASURE THE GAS  
AND LIQUID MASS FLUX ON THE INJECTOR DOWNSTREAM

Wu Jinxiang

(Dept. of Power Machinery Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, 300132)

Liu Weidong, Zhou Jin, Zhong Liangshen, Zhuang Fengchen

(Changsha National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

**摘要** 针对液体火箭发动机喷注器下游燃料和氧化剂两相流场分布的实验研究, 研制了能同时对其流强及混合比进行测量的两相探针, 并对其进行了标定。利用两相探针对不同反压下同轴式喷嘴下游的流强和混合比分布所进行的试验研究, 证明探针的设计是成功的。

**关键词** 喷嘴 探针 两相流动

**中图分类号** V228.1, V231.3, V211.7

**Abstract** The two phase probe able to measure the liquid mass flux and gas/liquid mixture ratio distribution at the same time was studied by experimental researches on the two phase flow field of the coaxial injector of a liquid rocket engine. The experimental calibration and theoretical amendment of this probe were also studied. The design of this probe has been proved successful by measurement of the mass flux and mixture ratio distribution.

**Key words** injector probe two phase flow

在液体火箭发动机、航空喷气发动机等燃烧室中, 其喷嘴下游流场一般由气液两相射流组成。由喷嘴出口产生的气液两相流体在燃烧空间的混合是否均匀, 沿喷嘴轴线下游各横截面上的流强(单位面积, 单位时间通过的气相或液相质量)及混合比分布是否合理, 将会对燃烧室的燃烧效率以及燃烧过程的稳定性产生直接的影响<sup>[1]</sup>。因此, 通过试验了解其出口下游的两相流场结构及其影响因素, 一直是燃烧室设计过程中非常重要的课题。

以往液相流强的测量一般采用收集法, 即将头部内径已知的管型探针置于两相流场中, 收集已知时间段流入探针内的液体, 并称量其重量或容积。近来, 文献[2]介绍了利用水对C射线的吸收特性测量圆形直射式喷嘴射流的流量分布函数的方法, 实现了流强的无接触测

量,但测量系统昂贵复杂。气相流强的测量主要是气体流速的测量,如果雾化液滴直径足够小,并完全处于随空气流动的状态,则可用激光多普勒测速仪对其进行测量。但对于存在较大直径颗粒的两相流动且随流性不好,并且对于液雾密度较高的两相流场,则此法将带来较大测量误差。比较经典的方法仍是用总静压管来测量气相流速,但总压的测量需要修正。E. L. Dussourd 和 A. H. Shapiro 对用总压探针测量带粒子气流的总压和流速的问题进行了系统的理论和试验研究,为用总静压管测量气液两相流场的气侧流速奠定了基础<sup>[3]</sup>。此后, P. F. Mehegan, D. T. Cormpbell 等及八柳信之<sup>[4,5,6]</sup>都应用这一理论,分别对不同形式的同轴直射式喷嘴的两相流场流强分布进行了大量的试验研究工作,但他们的试验一般是用总压探针测量两相流场的气相流速,然后用收集法测量液相流强,气液两相流强通过两次试验测得。

为了解决同时测量空间某点的气相和液相流强的问题,利用文献[3]的分析结果,参照文献[4,5]中流强测量试验的思想,自行设计制造了一种两相探针测量系统。通过试验对该两相探针的测量精度进行了标定,并对常压和反压条件下同轴离心式喷嘴出口下游的冷态两相流场的流强和混合比分布进行了大量的试验研究。试验结果表明应用两相探针测量的流场结构合理,因而证明其设计是成功的。

## 1 两相探针的设计

由于燃烧室中的温度一般很高,故液相燃料(在液体火箭发动机中可以是氧化剂如液氧)在喷入燃烧室后即开始蒸发,这样在其气相中就同时包含有燃料和氧化剂的成分,甚至还包括燃烧产物等,直接对其两相流场的流强和混合比进行试验研究显然比较困难。为此可以先进行冷态研究,即在不考虑液相蒸发的情况下测量其流强和混合比分布,以了解其气液两相流场结构,然后再利用蒸发模型和燃烧模型,通过理论分析和数值模拟的方法将试验结果推广到热态。

为了能同时测量液相和气相的流强及混合比,设计了如图1所示的两相探针。液相流强的测量采用收集法,探针头部集液口的口径为3.5mm。气相流强则利用探针测到的总静压差测量流速,该点流速与气相密度的乘积即为气相流强。其测量原理如下:气液两相流中的液雾从探针头部的集液口进入探针内,探针内有一夹层壁,夹层间的空间通过上部的楔形口与内部空间相连。楔形口可避免液雾流入夹层内。液雾从头部进点探针

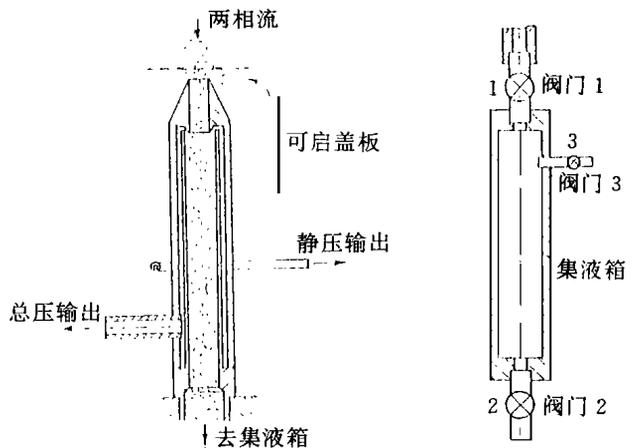


图1 两相控针测量示意图

图2 集液箱结构示意图

后,沿内部通道落下流入密闭的集液箱收集。采集时间通过可启盖板的开启与盖住集液口控制,完成一次采集后,再称量集液箱内液体的容积或重量,即可由此得到液相流强。当可启盖板开启时,由于探针内部不与外界相通,探针头部所感受到的总压通过夹层从总压口输出,

与探针旁侧静压孔输出的静压一起接入 U 形管(参见图 5), 即可在测量液相流强的同时测出该点的总静压差。以总静压差算出流速, 就可进一步得到气相流强。由于一次测得同一点的气相和液相流强, 其比值就是该点的混合比。

考虑到在反压条件下测量液相流强, 集液箱的设计如图 2 所示。在采集液雾时, 集液箱的上阀门 1 打开, 下阀门 2 和卸压阀门 3 关闭。采集完成后, 关闭上阀门。先打开卸压阀门卸去集液箱内的压力, 再打开下阀门收集集液箱内的液体, 称量其容积或重量。

## 2 两相探针测速的标定

由于两相探针的设计不同于常规的总静压风速管的设计, 探针头部孔径及外径都较大, 静压测孔的位置及底座都会给测量带来影响。因此首先必须对两相探针测量纯气相场流速的性能及准确性进行标定。标定试验在低速风洞中进行, 风洞试验段长 1 200mm, 横截面为宽 1 000mm 的正八角型。在试验中应用校准过的标准风速管对气液两相探针进行标定, 求得探针的测速修正系数 F。测速管和两相探针的总静压差由斜管微压计和角度水平仪精确测量。试验中将标准风速管和两相探针安装在同一速度剖面上, 风速管总压孔和静压孔距壁面为 150mm, 两相探针安装在风洞实验段中心位置。

两相探针前端的总压孔正对来流, 用来感受气流的总压  $P^*$ 。而侧面垂直于来流的静压孔感受探针周围的静压, 并以他作为总压孔处的静压。将总压孔与斜管微压力计的储液室相连, 静压孔与压力计的斜管相连, 则压力计指示的压差对应气流的动压头, 为了修正动压头的测量值, 引入一个称为两相探针测速系数的修正因子 F, 则任一风速管测得的动压头为

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 = (P^* - P)F = C(h - h_0)gFKB \tag{1}$$

式中: C 为斜管压力计中液体的密度,  $C = 840 \text{ kg/m}^3$ ; g 为重力加速度,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ; B 为斜管压力计测量系数; K 为斜管压力计校准系数; h,  $h_0$  为斜管压力计读数。

试验中标准风速管和两相探针安装在风洞实验段的不同位置 1, 2 处, 在同一时刻, 流速  $V_1, V_2$  一般不等。但对流场品质良好的风洞来说, 可以认为近似相等, 亦即可认为两处动压头相等

$$C(h - h_0)_1 F_1 K_1 B_1 = C(h - h_0)_2 F_2 K_2 B_2 \tag{2}$$

而  $K_1 = K_2$ , 并令  $X = C(h - h_0)_1, Y = C(h - h_0)_2$ ,  $C = F_1 B_1 / (F_2 B_2)$ , 则有  $Y = CX$ 。

试验时风速由 5m/s 增至 30m/s, 再由 30m/s 减至 5m/s, 测量值的间隔约取 5m/s, 每一风速测定一次实验数据, 这样就可以得到不同风速下各斜管压力计的读数  $(X_i, Y_i)$ , 依据最小二乘法原理求出 C, 即可求得修正系数  $F_2$

$$F_2 = \frac{B_1 F_1}{C B_2} \tag{3}$$

式中:  $B_1, B_2$  由斜管压力计的倾斜角度确定,  $F_1$  为标定过的标准风速管的修正系数, 已知  $F_1 = 0.994$ 。对探针的标定试验共进行了两

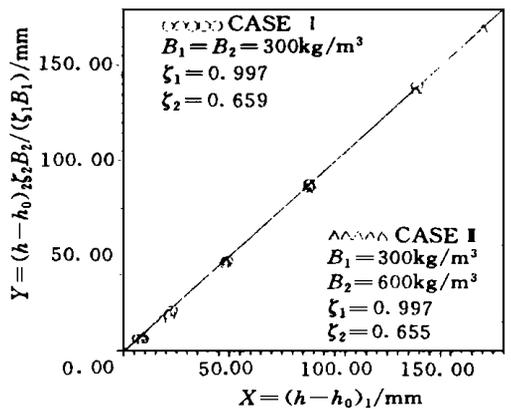


图3 两相探针测速标定试验结果

次,第一次试验取  $B_1 = B_2 = 300\text{kg}/\text{m}^3$ , 得探针速度修正系数  $F_2 = 0.659$ 。第二次试验取  $B_1 = 300\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $B_2 = 600\text{kg}/\text{m}^3$ , 得探针速度修正系数  $F_2 = 0.655$ , 其试验结果见图 3。通过这两次标定试验可以认为:试验结果的精度和准确度较高,经过修正的两相探针用于测量气流速度是可信可用的。最终可取测速修正系数为  $F_G = 0.657$ 。

### 3 液相流强测量的修正

由于在试验中要同时测量气相流强和液相流强,为了保证能测到气相流场的总压,测量时探针总压孔内部不能与外界相通。这样在测量液相流强时不能保证等速度测量,使一部分应该落入探针孔内的细小的液滴随气液飘到了探针口外,因而使采集到的液雾比应采集到的要小。对液相流强的修正采用了如下的办法,先用实际测量方法测量一次液相流强  $Q_L$ , 再在相同状态下用等速度法测量一次液相流强  $\bar{Q}_L$ , 比较两次测量结果求得修正系数

$$F_L = \frac{Q_L}{\bar{Q}_L} \quad (4)$$

在进行等速测量时,集液箱的上阀门 1 打开,下阀门 2 关闭,通过调整卸压阀门 3(参见图 2)使探针的总压口与静压口输出的压力平衡,由于总压管内有气流流动,此时总压口输出的压力近似等于总压管内的静压,因此当总压口和静压口的输出压力处于平衡态时,可以认为探针内的气流速度与探针外的气流速度近似相等,从而实现等速测量。而在实际测量过程中仍采用关闭卸压阀门的非等速测量。液相流强测量的修正试验结果如图 4 所示,通过试验可以求得平均修正系数为  $F_L = 0.924$ 。

### 4 两相流中总压测量的修正及气相流强测量

在有液雾或固体颗粒存在的两相流中,由于液雾或固体颗粒与气体的相互作用,使得在用总压管测量总压时会引入一定的误差。这是因为将总压探针置于两相流场中时,气流在探针头部滞止,流线沿探针中心轴向两边分开。而液雾颗粒由于惯性的作用,继续往前运动。当颗粒跨过流线时,由于气液相对速度的不同,颗粒将受到来自气相场的阻力。在总压探针入口以内,其阻力主要由两个方向的分量组成,其一是沿径向指向探针轴线的分力;另一是沿轴向指向探针头部入口的分力,这一阻力使颗粒在探针内作减速运动。作为颗粒所受阻力的反作用,颗粒也将其动量传给管内的气相场,并在探针内部建立一个与阻力方向相反的附加压力梯度场。这时,探针内部的压力将大于两相流场中该点气相的实际滞止压力,从而带来测量误差。Dussourd 和 Shapiro<sup>[3]</sup>对这一误差从理论和试验两方面进行了认真仔细的分析,并提出了相应的误差修正理论。为了对由气液相互作用所引入的测量误差进行修正,该理论引入了如下称为过剩压力比(Over Pressure Ratio)OPR 的参数

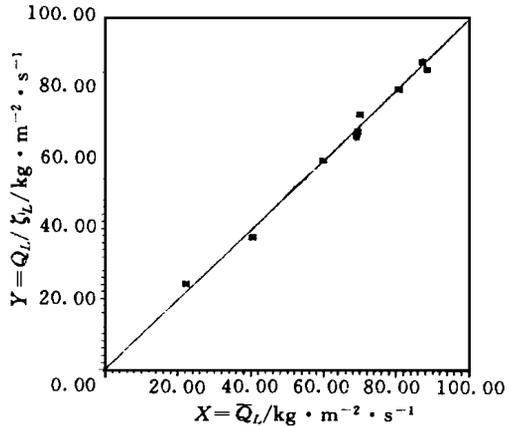


图 4 两相探针液相流强测量标定试验

$$OPR = \frac{P_{\text{meas}} - P^*}{\frac{1}{2} Q_G V_G^2 \left( \frac{m_L^a}{m_G^a} \right)} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{meas}}$  为探针测得的气相滞止压力;  $P^*$  为真实气相滞止压力;  $Q_G$  为气相密度;  $V_G$  为探针远前方的气流速度;  $m_L^a$  为当地液雾流强;  $m_G^a$  为当地气体流强

对过剩压力比的主要影响包括液滴群与气相流的相互影响和液滴雷诺数, 液滴群与气相场相互影响的指标可用服从数(Obedience Number) ON 来衡量

$$ON = \frac{3Q_G D}{4Q d} \quad (6)$$

式中:  $D$  为探针头部入口直径;  $d$  为液滴群平均直径;  $Q_G$  为气相密度;  $Q$  为液相密度。而液滴雷诺数定义为:  $Re = Q_G V_G d / L_G$ 。

由 Dussourd 理论得出的过剩压力比与服从数和雷诺数的关系可参见文献[3]。为了处理试验数据的方便, 本文作者拟合出如下公式

$$OPR = \left[ \sum_{m=0}^8 a_m (ON)^m \right] Re^{\sum_{n=0}^3 b_n (ON)^n} \quad (7)$$

其中:  $a_m, b_n$  为拟合多项式的系数, 其具体数值见表 1。由此公式即可最后求出动压头的修正量  $P_{\text{meas}} - P^*$ 。

在试验过程中, 用秒表记录下两相探针头部可启盖板开启的时间  $t$ , 用量筒测量该时间段所收集液体的质量  $m_L$ , 探针头部集液口直径为  $D_{\text{tpp}} = 0.0035 \text{ m}$ , 因此液相流强即为

$$Q_L = \frac{4m_L^a}{\pi D_{\text{tpp}}^2 R} \quad (8)$$

其中  $R$  为由试验标定的液相流强非等速测量的修正系数。

在可启盖板开启的同时, 用 U 型管测量两相探针总静压差所形成的液位差高度  $h$ , 设罐内压力为  $P_0$ , 则罐内空气密度为:  $Q = Q P_0 / P$ 。由式(1)可知气相速度与动压头的关系为

$$\frac{1}{2} Q V_G^2 = (P^* - P) F_G = C g h F_G$$

式中:  $C$  为 U 型管内液体比重,  $C = 997 \text{ kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度;  $F_G$  为由试验标定的两相探针测速修正系数。则可初步求得气相流强

$$\tilde{Q}_G = Q V_G = \frac{2Q C g h F_G}{1} \quad (9)$$

在用两相探针测量气液两相流场的总静压差时, 还须应用式(6)和式(7)对测得的总静压差进行修正。在修正时进一步假设: (1) 液滴群的直径即为该点的索太尔平均直径 SMD; (2) 测点的液滴运动速度与该点气流速度相等(未置入两相探针时)。索太尔平均直径可由文献[7]的试验结果给出。则可定义  $Re_d = Q V_G SMD / L_G$ ; 服从数  $ON = 0.75 Q D_{\text{tpp}} / Q SMD$ 。并进一步由式(7)求得过剩压力比 OPR, 则由其定义可求得修正压头

表 1 OPR 拟合多项式的系数

$a_0$	- 0.010 394 3	$a_5$	0.025 258 2	$b_0$	- 0.488 058
$a_1$	3.829 73	$a_6$	- 0.002 105 15	$b_1$	0.078 236 6
$a_2$	- 2.386 7	$a_7$	9.731 76 $\times 10^{-5}$	$b_2$	- 0.008 383 44
$a_3$	0.845 621	$a_8$	- 1.925 1 $\times 10^{-6}$	$b_3$	0.000 366 037
$a_4$	- 0.184 8				

$$Sh = \frac{QV^2}{2C_g} \left( \frac{Q_L}{Q_G} \right) OPR \tag{10}$$

最终求得修正后的气相流强为

$$Q_G = \frac{2QC_g(h - \$h)F_g}{ALR} \tag{11}$$

有了气相流强和液相流强,则可以很容易地求出当地气液混合比

$$ALR = Q_G / Q_L$$

### 5 两相探针的应用

为了对我国某型液体火箭发动机氢氧同轴式喷嘴的气液两相流场进行系统的研究,本文作者设计研制了如图 5 所示的实验系统。图中所示为反压试验台,气源和水源控制系统如文献[7]所示。在试验过程中以水和空气分别模拟液氧和气氢,从储气箱出来的空气经过气体涡轮流量计 2 进入压力罐内喷嘴夹具 10 的气相腔室,然后沿喷嘴外环轴向喷出。气侧流量计前的压力  $P_{g1}$  由压力表 1 测量。从储液箱出来的水经过液体涡轮流量计 3 进入压力罐内喷嘴夹具的液相腔室,然后沿喷嘴中心孔旋转离心喷出。液相腔室的压力  $P_l$  由压力表 8 测量。截止阀 17 为卸水阀门。阀门 15 为卸气阀门系统,同时控制罐内的反压  $P_0$ ,  $P_0$  由压力表 9 测量。在试验过程中,两相探针 12 感受到的总静压差接入高压 U 型管 18,由 U 型管读出, U 型管内介质为水。两相探针收集到的液雾则流入集液箱 16 以备称量。探针的径向位置通过摇柄 13 控制,周向位置通过摇柄 15 控制,而通过摇动顶部摇柄 7 可调整喷嘴距探针测量面的轴向距离,从而实现两相流场三度空间流强及混合比分布的测量。

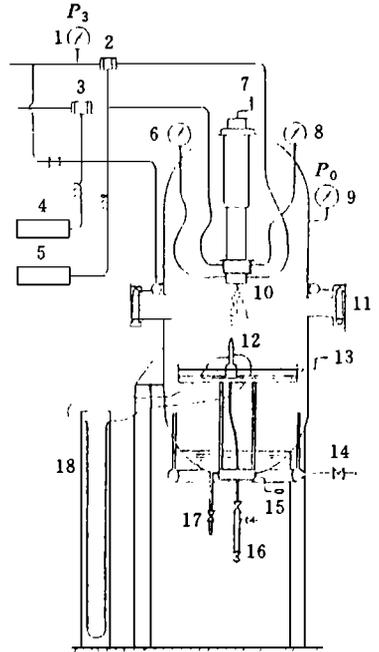


图 5 流强及混合比实验系统示意图

利用自行设计研制的两相探针和反压实验台,本文作者对不同反压条件下同轴式喷嘴下游的流强及混合比分布进行了大量的试验研究。测量采样时间视液相流强大小而不同,一般在 10~20s 之间。其中  $P_0 = 0.3\text{MPa}$  时的一例试验结果如图 6 所示,这是  $P_{g1} = 0.5\text{MPa}$ ,  $P_l = 0.4\text{MPa}$ ,距喷嘴出口轴向距离  $X = 50\text{mm}$  平面上的气相和液相流强分布的测量结果。由图可以清楚的看到,流强分布存在有中心凹坑,并且由于喷嘴加工和装配的误差,流强分布在测量横截面上存在一定的非对称性。

图 7 为  $\$P_g = P_{g1} - P_0 = 0.2\text{MPa}$ ,喷嘴总气液比  $ALR_T = 0.15$  时,以上试验结果与常反压( $P_0 = 0.1\text{MPa}$ )条件下试验结果的比较。在气侧压头  $\$P_g$  相同的条件下,由于反压的增加,使气侧总流量增加,因而液侧总流量也增加,流强及混合比的分布都趋于平缓。

为了进一步验证两相探针测量的可靠性,将测得的气相和液相流强的径向分布在该截面内积分流量,并与流量计测得的总流量比较,图 8 为 A 型喷嘴流量比较的部分数据。由图可知,虽然积分流量与流量计测量流量之间虽有一定的误差,但其规律是一致的,反应两相探针的测量结果可以令人满意。气侧涡轮流量计经过长期使用后而未标定其流量系数,可能

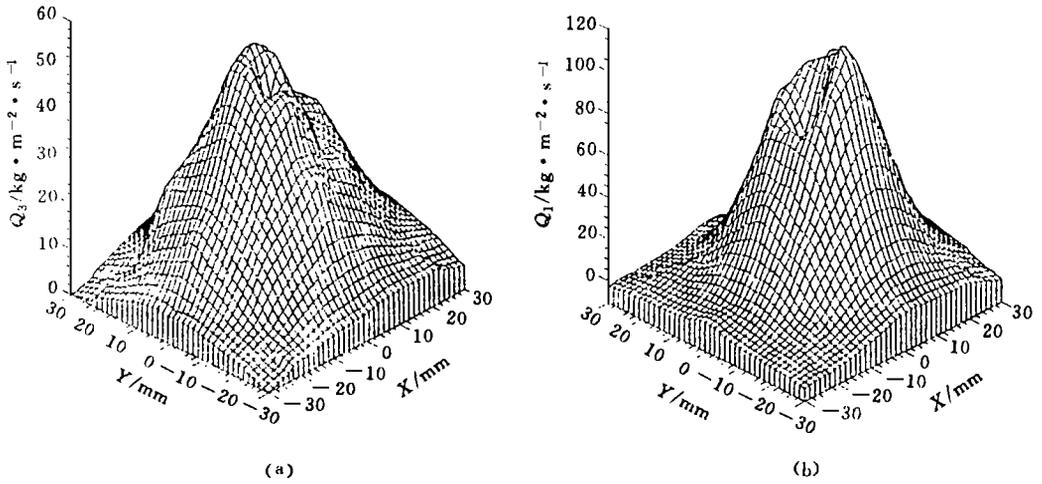


图 6 反压  $P_0 = 0.3 \text{ MPa}$  时同轴式喷嘴的流强分布 ( $X = 50 \text{ mm}$ )

是其测量流量偏小的原因。而液雾在密闭容器中的回流亦是导致液相积分流量偏大的因素。

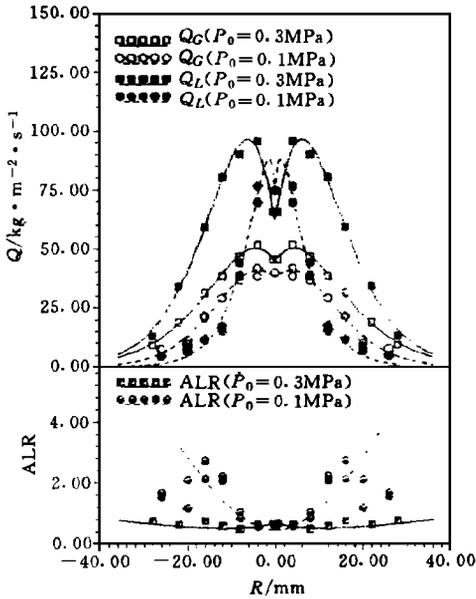


图 7 不同反压对流强和混合比分布的影响

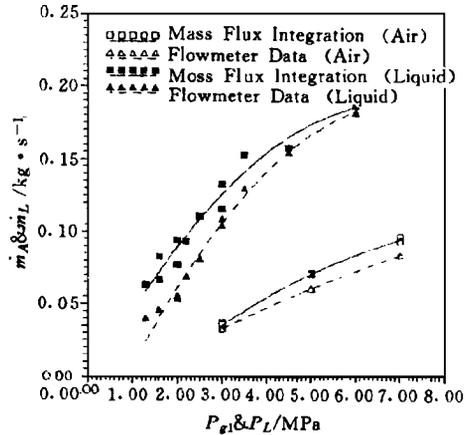


图 8 积分流量与流量计测量流量的比较

### 6 小 结

(1) 本文介绍了用于气液两相流场流强及混合比测量的两相探针的研制思想及对其进行的试验标定分析。两相探针实用于冷态气液两相喷雾流场的流强和混合比试验分析, 其研究结果可验证有关喷雾理论模型及作为热态数值模拟分析的初始条件。

(2) 两相探针的采样口径为 3.5 mm, 这对于总压的测量是偏大的, 特别是在分布梯度较大的地方。但考虑到两相流动的特殊情况及液相流强的测量, 其口径又不可能设计得太小。根据文献[3, 4, 5]的研究结果及本文的试验分析可知, 当测量点与喷嘴的轴向距离大于

50mm时,测量结果作为当地的平均值是可信的。

(3)利用两相探针首次对同轴离心式喷嘴常压和反压条件下喷雾两相流场的流强和混合比分布进行了大量的试验测量。试验结果能较好地反映气液两相流场的规律,证明探针的设计是成功的。

### 参 考 文 献

- 1 Williams F A. 庄逢辰,杨希濂译. 燃烧理论. 北京:科学出版社,1990
- 2 Tseng L K, Ruff G A, Faeth G M. Effect of gas density on the structure of liquid jets in still gases. AIAA J, 1992, 30(6): 1537
- 3 Dussourd J L, Shapiro A H. A deceleration probe for measuring stagnation pressure and velocity of a particle-laden gas stream. Jet Propulsion, January 1965, 24
- 4 Mehegan P F, Campbell D T, Schenerman C H. Investigation of gas-augmented injectors. California, NASA CR-72703, 1970
- 5 八柳信之. 气液同轴型喷射要素K h k 喷雾流N 实验及S 解析(1). Japan, NAL TR-692, 1982
- 6 八柳信之. 气液同轴型喷射要素K h k 喷雾流N 实验及S 解析(2). Japan, NAL TR-745, 1982
- 7 吴晋湘,刘卫东,周猛,王振国,庄逢辰. 反压条件下同轴式喷嘴雾化特性的试验研究. 航空动力学报, 1994, 9(4): 431 - 434