

燃气发生器内气体吹除过程压降特性实验研究

孙靖阳¹, 马原¹, 张淼², 王飞², 厉彦忠¹

(1. 西安交通大学制冷与低温工程系, 710049, 西安; 2. 西安航天动力研究所, 710100, 西安)

摘要: 为了提高运载火箭变推力调节过程中气体吹除乳化技术的成熟度,使液体燃料在低流量条件下流经喷注器时能够保持足够高的压降水平,并实现充分雾化,通过实验手段,以水和氮气为工质,针对某型号燃料头腔开展了单相液及气液两相对比实验,定量分析气体吹除乳化过程对压降水平的提升效果,基于泊金汉定理提出了一种可描述高速气液两相流混合乳化过程压降特性的数学模型。研究表明:气体吹入可显著提高燃料流经燃气发生器产生的压降;单相流动时,压降最高产生于阀芯处,且压降随液体流量的升高呈指数形式,而两相流动的最大压降产生于乳化混合段,且液体流量一定时,压降与气体流量呈现线性规律。通过定义无量纲参数乳化数 E 表征气体吹除乳化过程气液两相撞击时的动量交换强度,所建立的压降模型计算结果与实验数据的平均误差为 4.38%,能够较为准确地预测气体吹除乳化过程的两相压降特性。

关键词: 燃气发生器;气体吹除乳化技术;气液两相流;压降模型

中图分类号: TK49 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202303007 **文章编号:** 0253-987(2023)03-0079-07

Experimental Study of Pressure Drop Characteristics on Gas Injection and Emulsification Process in Gas Generator Chamber

SUN Jingyang¹, MA Yuan¹, ZHANG Miao², WANG Fei², LI Yanzhong¹

(1. Department of Refrigeration and Cryogenics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Aerospace Propulsion Institute of Xi'an, Xi'an 710100, China)

Abstract: To improve the readiness level of gas blowing emulsification technology in variable thrust adjustment for rocket launch, so that liquid fuel can maintain a high pressure drop level when flowing through the injector at a low flow rate and achieve full atomization, single-phase liquid and gas-liquid experiments are carried out in this paper for a certain type of head chamber by experimental means, using water and nitrogen as working fluids. The effect of gas blowing emulsification process on the pressure drop level is quantitatively analyzed. Based on Buckingham theorem, a new dimensionless criterion number that can describe two-phase flow under high-speed conditions such as mixed emulsification process is proposed. The results of the study show that gas injection can significantly increase the pressure drop created by the fuel flow through the head chamber. In single water flow, the highest pressure drop occurs at the valve core, and the pressure drop is exponential with the increase of liquid flux. The maximum pressure drop of the two-phase flow arises in the emulsification mixing section, and the pressure drop shows a linear

law with the gas flow rate when the liquid flow rate is certain. . By defining the dimensionless parameter emulsification number E to characterize the momentum exchange intensity during the gas-liquid two-phase impact of the gas blowing emulsification process, the average error between the calculated pressure drop model and the experimental data is 4.38%, which can predict the two-phase pressure drop characteristics of the gas blowing emulsification process more accurately.

Keywords: gas generator; gas blowing emulsification technology; liquid-gas two-phase flow; pressure-drop model

随着航天任务的多样化发展,人们对火箭发动机变推力调节的需求日趋显著^[1-2]。目前,火箭发动机主要采用流量调节装置或结构可调的喷注器实现变推力调节^[3]。然而,仅依靠上述两种装置难以满足深度变推力调节目标。在深度变推力调节过程中以及发动机未达到稳定工况的起动初期,液体燃料的体积流量较低,流经头腔时,燃料头腔中的压力存在明显低于额定工况的现象,可能导致燃料无法充分雾化及燃烧,最终影响发动机推力性能^[4-6]。大量工程经验数据表明,燃气发生器内的喷嘴压降通常需要达到头腔压力的15%~20%才能保证燃料的充分雾化与稳定燃烧^[7-9]。朱玲玲等^[10]也通过CFD方法证实了喷嘴雾化压力与质量流量之间存在线性关系,即压降不足的现象出现在推进剂流量较低的情况下。

为了满足压降需求,各个国家在研制深度变推力液体火箭发动机时都做了许多研究。其中,注入气体以改变燃料流态的气体吹除乳化技术得到了迅速发展。图1为气体吹除乳化过程流程示意图,高速流动的气体和液体从相互垂直的方向进入混合腔内并进行强烈地动量交换,破碎为直径细小的气泡和液滴,最终形成均匀且致密的乳化体均匀流出。在乳化过程中,气液表面积均有明显增大,需要累积大量界面能,即需要外界持续提供能量。

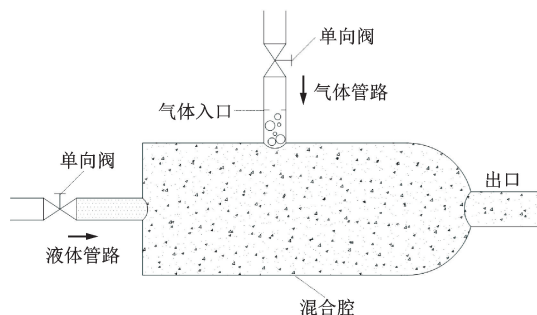


图1 气体吹除乳化过程示意图

Fig. 1 Emulsification process schematic diagram

气体吹除乳化技术最早由美国路易斯研究所在1956年提出,论证了对头腔吹入氦气可使液体燃料呈现泡沫状,并在不影响燃料燃烧效率的条件下实现变推力调节的可行性。美国的SE-10及RL10A-1^[7, 11]等多种液体火箭发动机均采用了气体吹除乳化技术配合流量调节方案实现变推力调节。Casiano等^[11-12]认为头腔内压力的提升来源于液体燃料堆积密度(bulk density)的降低,即气体的加入使得小流量下的燃料具有更大的体积,且堆积密度与压降之间呈现明显反比关系。Bendix公司的工程数据^[13]表明,气体吹除乳化技术拥有极高的节流比,使用氮气和氦气吹除时节流比可以达到35:1和50:1,显著扩大了推力调节范围。Rivard^[14]基于该技术成功设计了一种采用惰性气体喷注实现在35:1范围内调节推力的发动机。北京航空航天大学张黎辉等^[15]通过水-氮气代替对液氧煤油进行实验,成功获得了气体吹除乳化条件下的压降规律,并通过马尔基涅利公式将该结构燃气发生器的压降预测误差控制在5.1%以内。邓志安等^[16-17]通过对管内两相流不稳定性进行分析,得出高压高流速下的两相流具有更强的密度稳定性及更高的界限热负荷,从而使系统更加稳定的结论。杨立军等^[18-20]通过理论建模及实验的方式,针对喷嘴燃烧系统压力振荡幅频特性进行了广泛研究,发现喷注器压降越大,由燃烧室压力振荡引起的喷嘴出口流量振荡相对振幅越小,提高低频稳定性的最简单方法即为提高喷注器单元的压降。康忠涛等^[21-22]对气液同轴式离心喷嘴进行一系列热试,认为随着气液比的增加,燃烧效率将逐渐增大,同时,雾化锥角随着喷嘴压降的增大而增加并逐渐趋于稳定。此外,气体吹入可有效防止发动机内壁处产生湿气凝结、煤油结焦堵塞管道等问题,提高发动机运行的稳定性与安全性^[23]。

综上所述,气体吹除乳化技术是液体火箭发动机安全启动、实现变推力调节、保证燃烧性能的重要手段。目前,我国对气体吹除工况下燃气发生器的压降特性规律仍然缺乏系统性的定量研究。本

文针对某大流量燃气发生器头腔系统搭建实验台进行实验研究,以水和氮气作为实验工质,定量分析不同流量比下气体吹除乳化对头腔内压降的影响规律,并提出预测目标结构气液两相流压降的无量纲参数模型,为变推力式大流量液体火箭发动机研制过程中的压降预测提供理论依据及数据支持。

1 水-氮气吹除乳化实验系统

图2给出了实验系统的组成结构,其主要由气路、液路、气液混合腔、吹除乳化头腔、控制柜和数据采集系统组成。气体流路由高压气瓶组依靠压差驱动供气,后接减压阀调节压差进行气体流量控制。液体侧由高速往复式活塞泵(RTX 100-120N)驱动液体从贮水箱中汲液进入测试段,泵最高转速为1 450 r/min,可由控制柜实现准确控制。气体和液体在混合阀腔内剧烈混合后进入燃料头腔,并由头腔内喷嘴组流出进入收集器。收集器通过涡轮泵与贮水箱连通,构成液路循环。

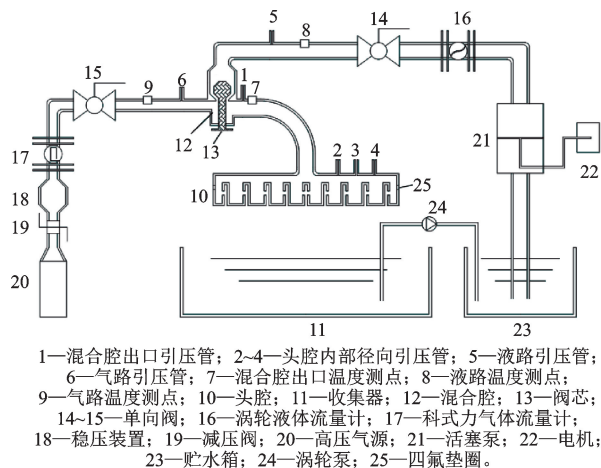


图 2 气体吹除乳化过程实验系统简图

Fig. 2 Schematic diagram of gas injection and emulsification process experiment system

燃气发生器核心实验件结构由混合阀腔、弯管和燃料头腔组成。水和氮气在混合阀腔内混合乳化,经过弯管进一步混合后进入燃料头腔。头腔底部共有 61 个喷嘴流道,按照每圈 1、6、12、18、24 的数量插排分布在各半径区域。每个喷嘴开有 2 个内径为 1.5 mm 的对称节流喷口。

实验系统中,气体管路、液体管路和混合阀腔出口各布置 1 个压力测点和 1 个温度测点(具体位置在图 2 中标出)。头腔内部沿半径方向布有 3 个压力测点(如图 2 所示)以监测头腔内压力分布梯度。

压力传感器选择 Senex 公司的 DG1300 系列传感器,精度为 0.05%。温度参数通过铂电阻 PT100 进行测量,精度为 0.5 级。气体流量和液体流量分别通过科式力质量流量计和涡轮流量计进行测量,精度均为 0.5 级。所有测量数据通过数据采集仪 (KEITHLEY7700) 进行采集与记录。

2 实验结果分析与讨论

测试工况范围如表 1 所示,气液温度均为 278 K。实验数据显示,气液流量变化时系统各测点压力几乎同步变化,各测点间几乎不存在时间相位差,均可以在很短的时间内达到稳定。因此,本文后续展示的压力数据均为对应气液流量工况达到稳定后的测量值。

表 1 燃气发生器头腔内气体吹除乳化实验工况
Table 1 Experiment condition of gas injection and emulsification process in gas generator

液体流量/(kg · s ⁻¹)	气体流量/(g · s ⁻¹)	背压/kPa
0.11~1.39	10~30	101

图3给出了单相水流动工况下各测点的压力数据。可以看出,各测点压力随着流量的增大整体呈现指数增大的变化规律。最大压降产生于混合腔阀腔处,而在头腔喷嘴处的压降并不大。以水流量 0.93 kg/s 为例,全场内总压降为 29.4 kPa ,其中阀腔压降占比为 40.57% ,弯管段及可视化段压降占比为 20.26% ,头腔内压降占比为 39.17% 。头腔内沿半径方向的3个测点处压力未观测到明显的梯度规律,相对偏差 1.22% ,可以认为头腔内不存在沿半径方向的压力梯度。需要说明的是,当水流量超过 1.25 kg/s 时,由于活塞泵功率已接近其上限值,供液流量稳定性下降,导致系统压力与流量的依变关系略有波动。

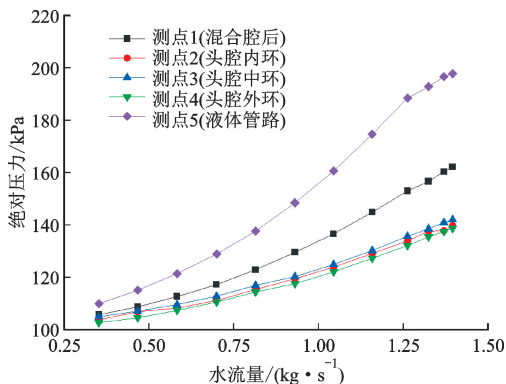
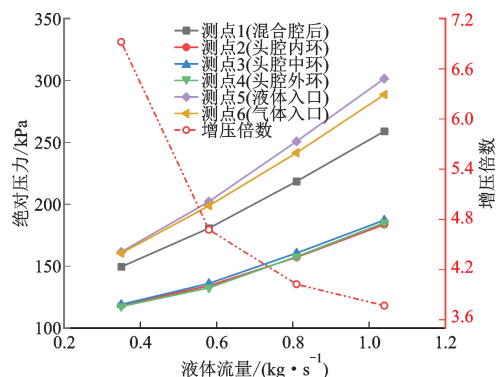


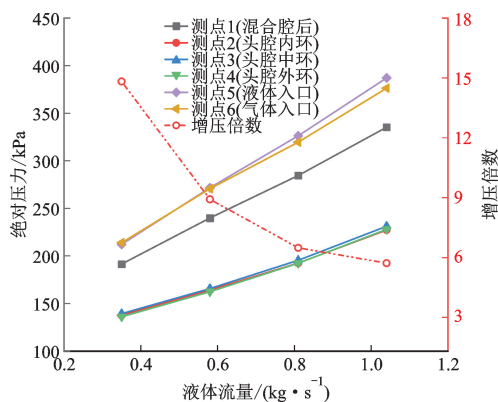
图 3 某型号燃气发生器头腔内单相水压降特性规律

Fig. 3 Pressure characteristics of single-phase water in gas generator

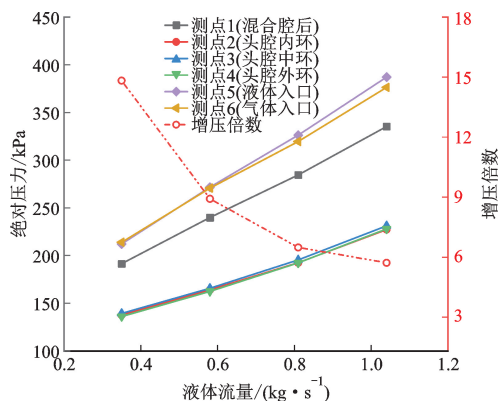
图4给出了在液体流动中加入氮气吹除的两相流压降变化规律。从图4中可以看出,当通入气体后,系统各测点压力将显著高于单相液体工况,且气体流量越大,这种差异越明显。在头腔喷嘴背压相同的条件下(背压均为大气压),系统各测点压力越高,各测点间压差的绝对值也越大,即对应位置的压降越大。以水流量为0.81 kg/s的工况为例,当通入气体的质量流量为10~30 g/s时,头腔产生的压降扩大至单相流时的1.37~1.97倍,表明气体吹除具有明显的增压效果。



(a) 气体流量 $Q_{mg} = 10$ g/s



(b) 气体流量 $Q_{mg} = 20$ g/s



(c) 气体流量 $Q_{mg} = 30$ g/s

图4 某型号燃气发生器内气体吹除乳化过程水-氮气两相流压降规律

Fig. 4 Pressure of two-phase water and nitrogen of gas injection and emulsification process in gas generator

在不同液体流量下,压力的分布规律具有相似的规律。头腔内部压力均保持一致。气体管路和液体管路的压力十分接近,进入混合阀腔内混合后产生明显压降,气液混合的乳化体经过弯管进入头腔的过程中也伴随着显著的压降损失,这与液体单相流实验规律不同。以水流量0.81 kg/s为例,此处的混合腔压降为35.08 kPa,占比为16.07%,而乳化流动段压降则高达91.10 kPa,占比为41.74%。对于单相流动,无论是混合腔还是弯管都仅产生局部阻力压降,由于阀芯处的通流面积更小,此处的压降将大于弯管段。对于乳化体流动而言,整个乳化过程将由两个阶段完成:第一阶段为混合腔阀芯处混合过程,此处气液两相依靠正交动量相互冲击进行混合,气体仅增大混合腔压力,而不渗入液体管路,阀芯液体入口处体积通量仅由液体产生。第二阶段为弯管乳化段,初步乳化的气液将在此处利用离心力差进一步混合,该阶段的体积通量包含气液两股流体,数值上远大于第一阶段,最终表征为弯管处的压降大于混合腔。

结合单相流及两相流实验数据,头腔内部压力梯度很小,在实际应用中,可将头腔内部看成压力均匀的零维模型。且在两相流动中,当液体流量一定时,头腔产生的压降呈明显线性规律。

3 压降模型

本文对吹除乳化过程的压降特性开展进一步分析。在液体流基础上引入气体流后的流动阻力升高,总阻力可看作液体单相流阻力、气相附加阻力以及气液耦合阻力3个部分的阻力和

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p'' + \Delta p''' \quad (1)$$

针对液体单相流,燃气发生器内极短的流程使得沿程阻力可以忽略,压降主要由局部阻力产生

$$\Delta p' = K \frac{\rho v^2}{2} = \frac{K Q_m^2}{2 A^2 \rho g} \quad (2)$$

即单相流压降主要与液体的质量流量、通流面积、密度有关。

对于通入气相带来的附加阻力,目前尚未有明确的模型描述。基于变工况实验数据分析,定性判断其与气体的质量流量、通流面积、密度、黏度等参数相关^[24-25]

$$\Delta p'' = f(Q_{mg}, \mu_{mg}, \rho_{mg}, A) \quad (3)$$

此外,气体吹除将会导致液体受迫挤压,最终表现为两相流中包含大量液滴及气泡。液滴和气泡的形状、大小、平均密度等对压降过程具有明显影响。

由此可知,气液耦合阻力主要与气液界面的表面张力及黏度有关^[24-25]

$$\Delta p''' = f(\sigma_{g-1}, \mu_g, \mu_l) \quad (4)$$

综合式(1)~(4),气体吹除乳化两相流工况的总压力损失主要与 $m_g, m_l, \rho_g, \rho_l, A_g, A_l, \mu_g, \mu_l, v_g, v_g, \sigma_{g-1}, P_b$ 等 12 个参数相关。

由于相关参数数量较多,本文采用泊金汉 Π 定理进行变量简化,组合各参数以减小自变量个数。泊金汉 Π 定理可描述如下:设一个流动过程可由 n 个变量 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ 表示,其中 $m_1 \sim m_{n-1}$ 相互独立, m_n 可以通过其余变量以连乘的方法组成 k 个量纲一致的组合物 Π_i 表示,则必有变量减小数 $j = n - k$ 小于等于描述这些变量所需的最少基本量纲数^[26]。

要运用泊金汉 Π 定理,需要针对乳化过程选取合适的变量。由于背压 P_b 主要受到温度以及物性参数的影响,补燃循环的燃烧温度较高,燃烧较为稳定,可将温度看做定值^[27],故 P_b 可由密度直接表示。另外,质量、流速、横截面积可以组合成动量流率

$$\psi = Q_m v = v^2 A \rho \quad (5)$$

此时,与压力相关的自变量简化为如下 7 个

$$\Delta P = f(\psi_l, \psi_g, \rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g, \sigma_{g-1}) \quad (6)$$

需要注意的是,尽管动量流率 ψ 中包含了密度项 ρ ,但是仍然需要将其作为一个独立变量进行考量。这是因为动量流率在物理意义上仅能表征冲击过程,而实际上被密度强烈影响的还有占位体积(即通流面积被气相占据,导致液体实际流动阻力偏高),由于乳化过程将消耗大量的动量,剩余动量的值较小,对占位体积的影响程度低,一定程度上将表现为随机性。若是 ρ 直接被包含进入动量流率中,则会导致其失去对该物理特性的表征。

对式(6)中所有参数进行量纲分析,结果如下

$$\begin{cases} \dim \Delta P = ML^{-1} \tau^{-2} \\ \dim \psi = ML \tau^{-2} \\ \dim \rho = ML^{-3} \\ \dim \sigma = M \tau^{-2} \\ \dim \mu = ML^{-1} \tau^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为质量量纲; L 为长度量纲; τ 为时间量纲。以上参数均可通过这 3 个量纲直接描述,根据泊金汉 Π 定理,有 $j=3$ 。压降 ΔP 和动量流率 ψ 的量纲均可通过这 3 个变量组成的无量纲连乘量 Π_i 描述

$$\begin{cases} \Pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho^{a_1} \sigma^{b_1} \mu^{c_1}} \\ \Pi_2 = \frac{\psi}{\rho^{a_2} \sigma^{b_2} \mu^{c_2}} \end{cases} \quad (8)$$

根据量纲归一化条件,式(8)的分子分母应满足量纲相同的条件,可解得 $\alpha_1 = -1, \beta_1 = -2, \gamma_1 = 2, \alpha_2 = 1, \beta_2 = 0, \gamma_2 = -2$ 。故有如下量纲为 1 的变量

$$\begin{cases} \Pi_1 = \frac{\Delta P \mu^2}{\rho \sigma^2} \\ \Pi_2 = \frac{\psi \rho}{\mu^2} \end{cases} \quad (9)$$

燃气发生器喷嘴处的压降决定了燃料的雾化性能。此处的压降极大程度上取决于乳化体的流态,尺寸越细小、分布越均匀的乳化体的内表面能越高,体积流量越大,流经喷嘴时产生的压降越明显。由此,反映压降参数的 Π_1 和反映动量参数的 Π_2 之间必存在具有强相关性的函数关系。为了区分气体和液体之间密度、黏度等物性参数不同而造成的影响,可以定义乳化数 E (emulsification)

$$E = \frac{\psi \rho}{\mu^2} \quad (10)$$

E 的物理意义为:分子动量流率 ψ 和密度 ρ 的乘积可看作单位体积内的动量冲击力,表征一股流体所携带的能量;分母 μ^2 可以看作表征流体抗冲击破碎的能力的参数,这是因为流体的黏性本身表示了流体在受到剪切力时流体层之间的抗形变能力; E 表示一股流体在冲击过程中的破碎倾向和抗破碎能力的比值。通过对乳化数 E 分析,可以得知压降水平与气液动量流率、黏度等具有明显相关性。气液流量越大、黏度越低,二者在混合腔内的动量交换过程就越剧烈,气体更易被撕碎至小气泡并弥散在液体中,并积累表面能,使乳化体的体积流量更大,乳化体流经喷嘴的压降水平就越高。

整合式(6)、(9)、(10),可得到以下函数形式

$$\frac{\Delta P \mu_m}{\rho_m \sigma_{g-1}^2} = f\left(\frac{\psi_g \rho_g}{\mu_g^2}, \frac{\psi_l \rho_l}{\mu_l^2}\right) = f(E_g, E_l) \quad (11)$$

式中:角标 l, g, m 分别表示液体、气体及气液混合物。

当通过质量流量计算 E 时,密度值不再显含在表达式中,故式(10)可以表示为

$$E = \frac{\psi \rho}{\mu^2} = \frac{Q_m v \rho}{\mu^2} = \frac{Q_m (Q_m / A \rho) \rho}{\mu^2} = \frac{Q_m^2}{A \mu^2} \quad (12)$$

对于定质量流量、定结构、定温度的燃气发生器吹除乳化过程来说,质量流量 Q_m 是唯一影响 E 的变量。根据实验结果,压降与质量流量之间呈现明显的正相关性。考虑到模型边界封闭性,可做出如下假设函数形式

$$\frac{\Delta P \mu_m^2}{\rho_m \sigma_{g-1}^2} = k_1 (E_l) + k_2 (E_g) + k_3 \sqrt{E_l E_g} - k_4 \quad (13)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 均为正数。

将气液两相流实验数据代入式(13), 其等式左边的数量级为 10^1 , 而 E 的数量级却在 $10^7 \sim 10^9$ 。为减小数量级差距引起的误差波动, 提高变量之间的敏感度, 使拟合式获得更高的预测准确性, 可定义约化乳化数

$$\tilde{E} = \frac{E}{10^7} \quad (14)$$

通过气液两相流的实验数据, 可以对式(14)进行拟合, 并得到如下结果

$$\frac{\Delta P_{\text{m}}^2}{\rho_{\text{m}} \sigma_{\text{g}}^2} = 11.42(\tilde{E}_1) + 0.0678(\tilde{E}_{\text{g}}) + 3.69\sqrt{\tilde{E}_1 \tilde{E}_{\text{g}}} - 10.97 \quad (15)$$

图5给出了通过式(15)拟合的数值与实验测量值的对比情况。式(15)的适用范围涵盖了该型号燃气发生器的变推力工况, 其决定系数 R^2 和平均相对误差分别为 0.99 和 4.38%, 表明上述拟合模型对高速两相流混合乳化过程产生的压降具有良好的预测性。乳化数 E 模型从流体能量角度对压降进行预测, 将结构的影响整合到系数中, 对于诸如发动机喷嘴一类难以通过方程或参数进行量化的结构更为实用, 并可达到相较于马尔基涅利等传统常用公式更高的拟合精度, 且无需对单相流压降规律进行进一步计算。

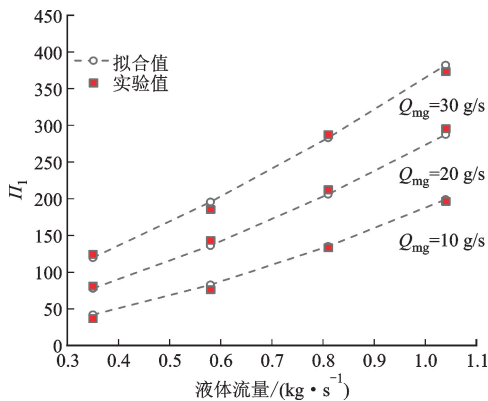


图5 乳化数 E 压降模型拟合结果与某型号燃气发生器头腔内气体吹除乳化过程实验数据的对比

Fig. 5 Data comparison between E pressure model fitting and gas injection and emulsification process experiment in gas chamber

4 结 论

本文针对大流量燃气发生器内影响气体吹除乳化过程进行了实验研究, 对结构压降与气液流量之

间的变化关系进行了量化分析, 得到以下主要结论。

(1) 对燃气发生器头腔内通入气体可显著提升头腔内部的压力, 且头腔压力与气体流量几乎呈线性关系, 气体流量越大, 增压效果越明显。

(2) 在液体单相流动时, 系统内最高压降产生于阀芯处, 而在气液两相流动时, 由于气相占据部分流通面积, 系统最高压降产生于乳化流动段。

(3) 基于泊金汉 π 定理对气液两相混合射流过程进行无量纲化分析, 可定义无量纲准则 E 以表征一股流体对另一股流体产生的冲击力以及自身的抗冲击力之间的关系。流体的乳化数 E 越大, 该流体在受到冲击时自身更容易碎裂成细小的流体团。

(4) 基于乳化数 E 建立压降预测模型, 针对目标结构压降的平均计算误差为 4.38%, 决定系数 R^2 达到 0.99, 能够较为准确地预测喷嘴结构内高速两相流的压降特性。

参考文献:

- [1] 靳雨树, 徐旭, 朱韶华, 等. 15:1 气氧/煤油变推力火箭发动机设计及试验 [J]. 推进技术, 2018, 39(11): 2438-2445.
JIN Yushu, XU Xu, ZHU Shaohua, et al. Design and test of 15:1 GO_2 /kerosene variable-thrust rocket engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(11): 2438-2445.
- [2] 谭永华, 杜飞平, 陈建华, 等. 液氧煤油高压补燃循环发动机深度变推力系统方案研究 [J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1201-1209.
TAN Yonghua, DU Feiping, CHEN Jianhua, et al. Study on deep variable thrust system of LOX/kerosene high pressure staged combustion engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(6): 1201-1209.
- [3] 姚照辉, 范家璇. 变推力液体火箭发动机推力调节技术研究综述及发展趋势 [J]. 推进技术, 2022, 43(9): 6-19.
YAO Zhaohui, FAN Jiaxuan. Review and trend for thrust regulation technology of variable-thrust liquid rocket engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(9): 6-19.
- [4] GEORGE P S. Rocket propulsion elements [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 司朝润, 张贤杰, 王俊彪. 7055 铝合金粉末的氩气低压雾化技术 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(1): 112-117.
SI Chaorun, ZHANG Xianjie, WANG Junbiao. Low-pressure argon atomization process of 7055Al alloy

- powders [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2015, 20(1): 112-117.
- [6] BRADLEY D. On the atomization of liquids by high-velocity gases [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 1973, 6(14): 1724.
- [7] DRESSLER G A. Summary of deep throttling rocket engines with emphasis on Apollo LMDE [C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-5220.
- [8] GILL G S, NURICK W H. Liquid rocket engine injectors[EB/OL]. (1976-03-01)[2021-10-11]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19760023196>.
- [9] HAMMOCK W R Jr, CURRIE E C, FISHER A E. Apollo experience report: descent propulsion system [EB/OL]. (1973-03-01)[2021-10-11]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730011150>.
- [10] 朱玲玲, 吴建军, 刘明翔, 等. 基于 CFD 技术的超音速喷嘴两相流破碎机制研究 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2018, 23(3): 229-237.
- ZHU Lingling, WU Jianjun, LIU Mingxiang, et al. A computational fluid dynamics (CFD) research on the atomization mechanism of two-phase flows in ultrasonic gas atomizer [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2018, 23(3): 229-237.
- [11] CASIANO M J, HULKA J R, YANG V. Liquid-propellant rocket engine throttling: a comprehensive review [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(5): 897-923.
- [12] MORRELL G. Rocket thrust variation with foamed liquid propellants[EB/OL]. (1957-02-26)[2021-10-12]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930089674>.
- [13] CONRAD E W, HANNUM N P, BLOOMER H E. Photographic study of liquid-oxygen boiling and gas injection in the injector of a chugging rocket engine[EB/OL]. (1964-12-01)[2021-10-14]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710069673>.
- [14] RIVARD J G. New techniques for throttleable bipropellant rocket engines [C]//Propulsion Joint Specialist Conference. Reston, VA, USA: 1965: 1965-560.
- [15] 北京航空航天大学, 北京航天试验技术研究所. 有气体吹入的燃气发生器头腔充填试验装置及试验方法: CN202111534749.0 [P]. 2022-03-29.
- [16] 黄凡, 罗毓珊, 陈听宽, 等. 低质量流速垂直并联内螺纹管中两相流不稳定性试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(7): 36-40.
- HUANG Fan, LUO Yushan, CHEN Tingkuan, et al. Experimental study on two-phase flow instabilities in parallel vertical internally ribbed tubes at low mass flux [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(7): 36-40.
- [17] 邓志安, 罗毓珊, 陈听宽, 等. 低质量流速垂直和倾斜并联内螺纹管两相流不稳定性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(1): 17-21, 50.
- DENG Zhian, LUO Yushan, CHEN Tingkuan, et al. Two-phase flow instability in vertical and inclined parallel rifled tubes at low mass velocity [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(1): 17-21, 50.
- [18] 杨立军, 富庆飞. 喷嘴对供应系统到燃烧室压力振荡传递幅频特性的影响 [J]. *航空动力学报*, 2008, 23(2): 305-310.
- YANG Lijun, FU Qingfei. Effect of injector on pressure oscillation amplitude-frequency characteristics from pipe-line to combustion chamber [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 305-310.
- [19] 杨立军, 富庆飞. 燃烧室压力振荡对喷嘴出口流量振荡影响分析 [J]. *火箭推进*, 2008, 34(4): 6-11.
- YANG Lijun, FU Qingfei. Investigation on the dynamic interaction between injector flow oscillation and combustion chamber pressure oscillation [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2008, 34(4): 6-11.
- [20] 富庆飞, 贾伯琦, 杨立军, 等. 燃烧室压力振荡对液-液同轴离心喷嘴混合比的影响 [J]. *航空动力学报*, 2020, 35(2): 294-297.
- FU Qingfei, JIA Boqi, YANG Lijun, et al. Effect of combustion chamber pressure pulsation on mixing ratio of Liquid-Liquid coaxial swirl injector [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(2): 294-297.
- [21] 徐顺, 康忠涛, 成鹏, 等. 喷注压降对液液同轴离心式喷嘴喷雾锥角的影响研究 [J]. *推进技术*, 2017, 38(7): 1556-1562.
- XU Shun, KANG Zhongtao, CHENG Peng, et al. Effects of injection pressure on spray angle of liquid-liquid swirl coaxial injector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(7): 1556-1562.
- [22] 康忠涛, 李清廉, 邹建军, 等. 气液比对液体中心式气液同轴离心喷嘴燃烧过程的影响 [J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(6): 52-60.
- KANG Zhongtao, LI Qinglian, ZOU Jianjun, et al. Effects of gas liquid ratio on the combustion of liquid centered swirl coaxial injector [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(6): 52-60.
- [23] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

- and contact characteristics of curvilinear cylindrical gears with line contact [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(4): 183.
- [17] MEHTA G, SOMANI M, NARENDIRANATH BABU T, et al. Contact stress analysis on composite spur gear using finite element method [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5, Part 2): 13585-13592.
- [18] 周如传, 赵宁, 李旺, 等. 锥形面齿轮副的几何展成及轮齿接触分析 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(7): 86-95.
- ZHOU Ruchuan, ZHAO Ning, LI Wang, et al. Generation, TCA and stress analysis of the face gear drive with a tapered involute pinion [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(7): 86-95.
- [19] 韩振华, 石万凯, 肖洋铁, 等. 新型复合摆线外啮合圆柱齿轮副的传动特性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(9): 10-19, 131.
- HAN Zhenhua, SHI Wankai, XIAO Yangyi, et al. Analysis on transmission characteristics of novel composite cycloid cylindrical gears for external driving [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(9): 10-19, 131.
- [20] 张荣华, 曹莉, 周建星, 等. 行星齿轮传动的齿面动态磨损特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(8): 42-49.
- ZHANG Ronghua, CAO Li, ZHOU Jianxing, et al. Dynamic tooth surface wear characteristics of planetary gear transmission [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(8): 42-49.
- [21] LITVIN F L, FUENTES A. Gear geometry and applied theory [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 83-516.
- [22] 彭先龙, 徐琪超, 侯祥颖, 等. 安装误差对面齿轮承载传动性能的影响 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(12): 1861-1867.
- PENG Xianlong, XU Qichao, HOU Xiangying, et al. Finite element analysis of gear bearing transmission performance influenced by misalignment [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(12): 1861-1867.
- [23] 彭先龙, 徐琪超, 乔心州. 直刃刀具加工的面齿轮承载接触特性 [J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(3): 531-539.
- PENG Xianlong, XU Qichao, QIAO Xinzhou. Loaded tooth contact performance of a face gear manufactured by plane-cutter [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(3): 531-539.
- [24] GUINGAND M, DE VAUJANY J P, JACQUIN C Y. Quasi-static analysis of a face gear under torque [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194(39/40/41): 4301-4318.
- [25] LEWICKI D G, HEATH G F, FILLER R R, et al. RDS-21 face-gear surface durability tests, NASA/TM-2007-214970 [R]. Washington D. C., USA: NASA, 2007.

(编辑 武红江 杜秀杰)

(上接第 85 页)

- [24] 刘华. 蒸汽横掠降膜流动水平管束的两相流动过程研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [25] XU G P, TSO C P, TOU K W. Hydrodynamics of two-phase flow in vertical up and down-flow across a horizontal tube bundle [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, 24(8): 1317-1342.
- [26] 张鸣远. 流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [27] 丁兆波, 刘倩, 王天泰, 等. 220 t 级补燃循环氢氧发动机推力室研制 [J]. *火箭推进*, 2021, 47(4): 13-21.
- DING Zhaobo, LIU Qian, WANG Tiantai, et al. Development for thrust chamber of 220 t staged combustion cycle LOX/LH2 engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, 47(4): 13-21.

(编辑 武红江 杜秀杰)