

凝胶试验特性数据分析

窦双庆

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对凝胶推进剂压力损失的计算方法与常规推进剂存在很大差异, 结合对非牛顿流体的理论分析, 得出了凝胶推进剂在管路中的流动特性主要取决于其自身。对凝胶 N_2O_4 及凝胶 UDMH 液流试验的压力-流量数据, 分别采用指数方程、多项式方程和直线方程三种方法进行曲线拟和、对比分析, 反映了凝胶推进剂的非牛顿流体特性, 对系统组建提出了一些建议, 明确了凝胶试验系统试前应采用真实介质进行冷调, 并为系统调试数据提供了可行的拟合方法。

关键词: 凝胶推进剂; 液流试验; 数据分析

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 01-0049-05

Analysis on test data of gelled propellant

Dou Shuangqing

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Through the theoretical analysis of non-Newtonian fluid, it is concluded that the flow characteristic of gelled propellant in the pipeline mainly depending on its own characteristics. There exists distinct difference between the calculation method of the pressure loss of gelled propellant and that of liquid propellant. This paper adopts the Allometric, polynomial and linear equations to perform the curve fitting and comparative analysis on the pressure versus flux test data of gelled N_2O_4 and UDMH, which reflects the non-Newtonian fluid characteristic of gelled propellant. Some suggestions to establish a system have been put forward. It is proposed that real medium should be used to carry out the cold conditioning prior to the test of gel test system. The feasible fitting method is also provided for system adjustment data in this paper.

Key words: gelled propellant; liquid flow test; data analysis

收稿日期: 2006-11-28; 修回日期: 2007-06-29。

作者简介: 窦双庆 (1969—), 女, 高级工程师, 研究领域为发动机试验测量与控制。

1 引言

研制中的凝胶推进剂目前还处在预先研制阶段，而且没有现成的理论和经验可供参考。凝胶推进剂基本可以定位在非牛顿流体的触变流体范围内，凝胶推进剂压力损失的计算方法与常规推进剂存在很大差异，它的流动特性应符合幂律流体的流量方程。工程技术人员只能用原来对牛顿流体的知识进行简单计算和设计。但从流变学的角度考虑，非牛顿流体与牛顿流体在流动特性上是截然不同的。对非牛顿流体的理论分析，可以确定非牛顿流体在管路中的流动特性，主要取决于非牛顿流体的自身特性。

为寻求凝胶推进剂在试验系统管路中的流动特性，结合凝胶推进剂特性试验，重点介绍了实际工作中最为实用和较为准确的幂律流量方程计算方法，为试验系统设计和研究人员提供参考。通过以往对凝胶推进剂试验数据的分析方法，先后采用指数（Allometric）的方程、多项式（Polynomial）方程和直线（Linear）方程对以往的非牛顿流体试验数据进行了拟合和验证和分析。指数方程与流阻变化规律最为接近，直线拟合方法与实际测试值之间偏差较大。

2 幂律流量方程

根据人们所知的幂律流体的流量方程式：

$$Q = \frac{npR^3}{3n+1} \left[\frac{R\Delta p}{2LK} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

其中， R 为流体通道直径， cm ； L 为流体通道长度， cm ； K 为幂定律系数， $Pa \cdot sn$ ； n 为幂定律指数。对于牛顿流体即 $n=1$ ， $K=\mu$ 时，此方程为

$$Q = \frac{pR^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (2)$$

其中， $\Delta p \propto 1/R^4$ ，既管径稍微增加一点， Δp 即可大大降低。但对非牛顿流体， $n < 1$ 且趋近于零， Δp 与 R 成反比，与前述正好相反，要想 Δp 稍微降低一些，则需要大量增加管径，这说明此时管

路中的压力损失主要取决于非牛顿流体本身的特性。

3 凝胶液流试验

3.1 试验概况

在试验系统中按要求分别设置 40 目、200 目和 400 目过滤器，调整贮箱压力，对 N_2O_4 凝胶两种配方（以下称谓配方 A、配方 B）以及凝胶 UDMH 分别进行了流量为 30g/s、50g/s、70g/s、90g/s 的系统流动试验，并获得相关数据。

3.2 凝胶 N_2O_4 试验数据分析

3.2.1 凝胶 N_2O_4 配方 A 的数据分析

在配方 A 调试过程中，系统中分别设置 40 目、200 目和 400 目过滤器，通过调整贮箱压力，进行了 30g/s、50g/s、70g/s、90g/s 流量的系统流动调试，试验数据见图 1~3。

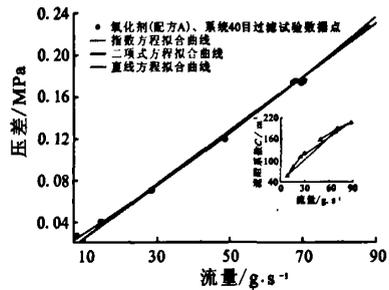


图 1 凝胶 N_2O_4 推进剂（配方 A）在 40 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.1 The curve fitting for the test data of gelled N_2O_4 (A) at 40 meshes filter

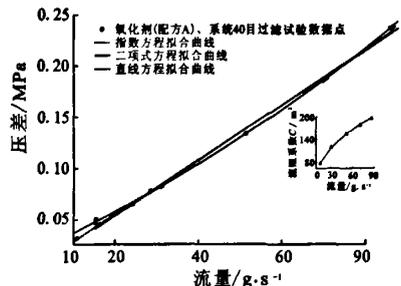


图 2 凝胶 N_2O_4 推进剂（配方 A）在 200 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.2 The curve fitting for the test data of gelled N_2O_4 (A) at 200 meshes filter

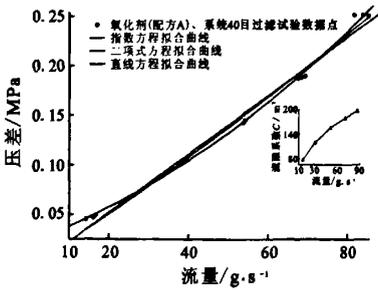


图 3 凝胶 N₂O₄ 推进剂 (配方 A) 在 400 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.3 The curve fitting for the test data of gelled N₂O₄ (A) at 400 meshes filter

从图中数据看出：在过滤器滤网目数相同的情况下，随着调试流量增大，相对应的系统压降损失也相应增大，这个规律符合凝胶的物化特性。

按常规推进剂的流量和系统压降损失的规律，系统流阻系数 C 的计算公式如下：

$$C = \frac{Q_m}{\sqrt{\rho \cdot \Delta p}} \quad (3)$$

按照公式 (3) 计算的系统流阻系数绘制在图中的相应位置，可以看出，在使用相同过滤器滤时，流阻系数 C 不固定为常数。为寻求流量与系统压降损失的关系，根据引言中对非牛顿流体特性的分析，提出采用指数 (Allometric) 方程、多项式 (Polynomial) 方程和直线 (Linear) 方程对试验数据进行拟合。

指数方程：

$$\Delta p = a \times Q_m^b \quad (4)$$

多项式方程：

$$\Delta p = a_1 + a_2 \times Q_m + a_3 \times Q_m^2 \quad (5)$$

直线方程：

$$\Delta p = a + b \times Q_m \quad (6)$$

分别采用公式 (4)、(5) 和 (6) 对试验数据进行拟合的系数见表 1。

表 1 凝胶 N₂O₄ 推进剂拟合公式表

Tab.1 The fitting for the liquid test data of gelled N₂O₄

| 过滤器 | 指数方程 | | | 多项式方程 | | | | 直线方程 | | |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | a | b | R^2 | a_1 | a_2 | a_3 | R^2 | a | b | R |
| 40 目 (配方 A) | 0.04375 | 0.53209 | 0.97126 | 0.24202 | 0.00127 | 1.69261E-5 | 0.99661 | 0.17917 | 0.0034 | 0.99466 |
| 200 目 (配方 A) | 0.07484 | 0.44135 | 0.96683 | 0.20107 | 0.00439 | -3.67176E-6 | 0.99445 | 0.20922 | 0.00401 | 0.99689 |
| 400 目 (配方 A) | 0.08147 | 0.55889 | 0.98398 | 0.24820 | 0.00957 | -1.08352E-5 | 0.99147 | 0.26839 | 0.00844 | 0.9954 |
| 40 目 (配方 B) | 0.01888 | 0.73866 | 0.99993 | 0.04029 | 0.0068 | -1.61627E-5 | 0.99995 | 0.06153 | 0.0530 | 0.99878 |

为比较三种拟合方法的差异，将试验调试的流量值带入拟合公式进行验证，验证结果为：对于 40 目过滤器的试验数据，指数方程和多项式方程的拟合结果与实际较为接近，而 200 目或 400 目的试验数据，无论采用哪种方法，偏差都较大。同时，现场对凝胶流动的观察和试后过滤器的分解，也可以看出，系统中设置 200 目或 400 目过滤器时，配方 A 几乎不流动。所以在配

方 A 试验系统的组建过程中，建议使用 40 目以下的过滤器，对试前调试数据可采用指数方程或多项式方程进行拟合。

3.2.2 凝胶 N₂O₄ 配方 B 流动试验数据分析

使用配方 B 进行试验，系统中设置 40 目过滤器，通过调整介质贮箱压力，进行了 30g/s、50g/s、70g/s、90g/s 流量的调试，使用 3.2.1 中相同的数据处理方法，对试验数据进行了分析，公

式拟合曲线见图4，拟和公式的参数见表1。将试验调试的流量值带入拟合公式进行验证，验证结果为：指数方程的拟合结果与试验数据最为接近，结合前面的理论分析可以看出，配方B表现出非牛顿流体特性更明显。

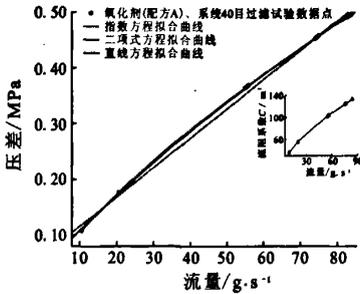


图4 凝胶 N₂O₄ 推进剂 (配方 B) 在 40 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.4 The curve fitting for the test data of gelled N₂O₄ (B) at 40 meshes filter

3.2.3 小结

由试验分析数据可以看出：不同配方的凝胶 N₂O₄ (配方 A 和配方 B) 推进剂在管路中所表现

的非牛顿流体特性不完全一致，但是，试前可以通过使用真实介质进行冷调的方法，利用指数方程或多项式方程拟合出流量与系统压降之间的关系，从而进一步确定系统状态。

4 凝胶 UDMH 试验数据分析

4.1 凝胶 UDMH 的数据分析

调试过程中，系统中分别设置 40 目、200 目和 400 目过滤器，通过调整贮箱压力，进行了 30g/s、50g/s、70g/s、90g/s 流量的调试，试验数据绘制成图 5~7 图，从图中的数据看出：在过滤器相同的情况下，调试流量增大时，相对应的系统压降损失也相应增大，这个规律也符合凝胶的物化特性。

按照公式 (3) 计算的流阻系数 C 绘制在图中的相应位置，可看出，无论是过滤器相同还是流量相同的情况下，流阻系数 C 也没有规律。为此，分别使用上一章中的三种方法进行拟合，拟合公式的系数见表 2，拟合曲线见图 5~7。

表 2 凝胶 UDMH 推进剂液流试验数据拟合公式
Tab.2 The fitting for the liquid test data of gelled UDMH

| 过滤器 | 指数方程 | | | 多项式方程 | | | | 直线方程 | | |
|-------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|---------|---------|
| | a | b | R ² | a ₁ | a ₂ | a ₃ | R ² | a | b | R |
| 40 目 | 0.00229 | 1.02632 | 0.99775 | 0.00754 | 0.0021 | 4.7923E-6 | 0.99876 | -6.79020 | 0.00256 | 0.99874 |
| 200 目 | 0.00271 | 1.00004 | 0.99579 | 0.07856 | 0.00184 | 8.15275E-6 | 0.99991 | 0.00295 | 0.00267 | 0.99808 |
| 400 目 | 0.00179 | 1.10084 | 0.99012 | 0.02202 | 0.00143 | 1.52302E-5 | 0.99756 | -0.00631 | 0.00293 | 0.99328 |

同样为了比较差异，将调试的流量值带入拟合公式进行验证，验证结果可以看出：对于 40 目和 200 目过滤器的试验数据，指数方程和多项式方程拟合的结果与实际较为接近，但 400 目过滤器的拟合结果与实测值之间偏差较大，此时使用拟合估算的方法不再适合。同时，试验过程中也观察到，系统中设置 400 目过滤器时，凝胶 UDMH 的流动性较差。所以在凝胶 UDMH 试验系统的组建过程中，建议使用 200 目以下的过滤

器，对试前调试数据可采用指数方程或多项式方程进行拟合。

4.2 小结

由试验分析数据可以看出：凝胶 UDMH 推进剂调试数据变化规律、协调，试前使用真实介质对试验系统进行冷调产生的数据，可以利用指数拟合公式或多项式拟合公式寻找出流量与系统压降之间的关系，进一步确定系统状态。

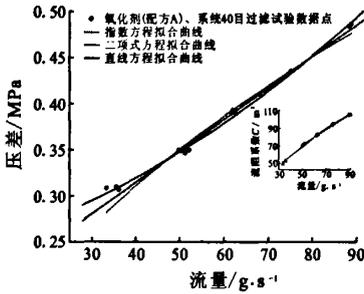


图 5 凝胶 UDMH 推进剂在 40 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.5 The curve fitting for the test data of gelled UDMH at 40 mesh filter

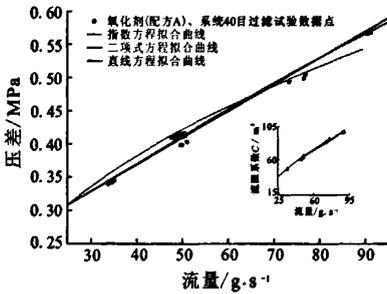


图 6 凝胶 UDMH 推进剂在 200 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.6 The curve fitting for the test data of gelled UDMH at 200 meshes filter

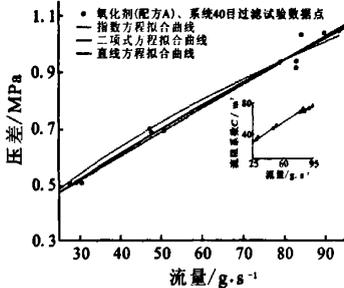


图 7 凝胶 UDMH 推进剂在 400 目过滤器下试验数据拟合曲线

Fig.7 The curve fitting for the test data of gelled UDMH at 400 meshes filter

5 结论

通过以上分析，可以看出凝胶 N_2O_4 、UDMH 推进剂调试数据变化规律、协调，在试验中的表

现出的基本理化特性与非牛顿流体相符。

结合文中对凝胶 N_2O_4 、凝胶 UDMH 试验数据的分析，在有效控制系统多余物的前提下，建议在实际系统组建中，使用 40 目以下的过滤器，以较好地保持凝胶推进剂在系统中的流动特性。

由试验分析数据可以看出：不同配方的凝胶 N_2O_4 、凝胶 UDMH 推进剂在管路中所表现的非牛顿流体特性不完全一致，而且，目前尚没有像常规推进剂一样的规律可循，对采用凝胶推进剂进行试车的系统，试前应使用真实介质对试验系统进行调试，以确定试验系统的流动特性。

对凝胶推进剂冷调数据，采用指数方程或多项式方程拟合的方法在实际中是可行的，尤其是试验系统经过凝胶介质的冷调后，结合冷调数据和产品设计参数来确定试验系统箱压，此方法可以保证较为准确的产品入口压力参数。

参考文献：

- [1] 代玉东. 凝胶推进剂及其剂的制备和特性表征[J]. 火箭推进. 2004, 30(4): 59-64.
- [2] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展[J]. 火箭推进. 2005, 31(5): 37-42.
- [3] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂模拟液直圆管流动特性初步研究[J]. 火箭推进. 2006, 32(3): 12-18.
- [4] 符全军, 杜宗臣, 兰海平, 等. UDMH/NTO 双组元凝胶推进剂的制备及性能研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 48-53.
- [5] 梁小强. 凝胶试验系统的设计及试后处理工艺[J]. 火箭推进, 2006, 32(4): 51-53.
- [6] 江体乾. 华工流变学 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2004.
- [7] 李韵琳, 徐温干, 鲍金燕. 凝胶推进剂及其在火箭发动机上的应用[R]. HQ-95017.
- [8] 张惠军. 科氏力质量流量计在凝胶推进剂火箭发动机试车中的应用[J]. 火箭推进. 2004, 30 (6): 55-60.

(编辑：侯 早)