

文章编号: 1006-9941(2017)05-0379-05

基于巴格利修正的膏体推进剂本构方程

刘成浩, 封 锋

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 在膏体推进剂本构方程测定拟合过程中, 引入巴格利(Bagley)修正方法, 根据巴格利修正参数进行误差修正重新拟合本构方程, 用于减小膏体推进剂粘度带来的实验误差。引入的巴格利修正方法将拟合得到的带有 8% 左右误差值的本构方程修正减小到误差 < 2%, 由求得的本构方程得到的函数曲线与实验测量值吻合较好。结果表明, 巴格利误差修正方法效果明显, 在一定程度上提高了膏体推进剂本构方程的精度。

关键词: 膏体推进剂; 本构方程; 巴格利(Bagley)修正; 误差修正

中图分类号: TJ55; V512

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.05.005

1 引言

膏体燃气发生器是由膏体火箭发动机发展而来的一种新概念可调燃气发生装置, 其可应用于航天伺服系统燃气发生器或卫星变轨调姿发动机等, 是膏体火箭发动机发展的新方向之一^[1-2]。美俄等国家对膏体燃气发生器的研究经多年发展现已投入实际应用, 已知的一些应用情况如: 俄罗斯将膏体燃气发生器应用于“喀秋莎”、“暴风雪”及“闪电”等型号导弹并使其射程显著增加; 美国将膏体燃气发生器应用于动能拦截火箭姿控系统。国内一些单位对膏体推进剂及膏体燃气发生器也开展了多年的研究, 如西安航天动力研究院、第二炮兵工程学院、南京理工大学等, 并取得了一系列成果^[3-9]。

膏体推进剂属非牛顿流体, 利用膏体推进剂流动特性可在燃气转换装置内实现流量控制和多次启动, 为燃气发生系统提供可控的燃气流量。膏体推进剂流变特性是膏体燃气发生器的关键技术也是较难控制的性能之一, 通常以本构方程对其流变特性进行表征, 准确地测量膏体推进剂本构方程显得尤为重要^[9]。目前主要是通过膏体推进剂流动实验或流变仪等对膏体

推进剂流变特性进行测量拟合, 但其实验误差相对较大, 本研究以膏体推进剂直圆管流动实验为基础, 引入巴格利误差修正方法对膏体推进剂本构方程的测定开展研究, 对流变参数进行测试与表征。

应用膏体推进剂流变实验装置, 在不同温度下对三种不同配方的膏体推进剂在一定尺寸的毛细管中进行测试, 得到不同温度下推进剂的物性参数, 求得稠度系数和流动指数, 推导出膏体推进剂本构方程, 对本构方程进行巴格利误差修正, 减小因膏体推进剂本构方程测定带来的误差, 得到更为精确的本构方程, 为膏体燃气发生器的研究提供理论基础及参考依据。

2 实验系统及方法

2.1 实验系统

本实验通过挤压膏体推进剂进入毛细管道测定其本构方程, 实验装置原理如图 1 所示, 使用电动伺服缸驱动活塞挤压膏体推进剂在储料罐内流动, 进而流入实验段毛细管道, 电动伺服缸供给的速度可控, 由压力传感器测量储料罐活塞所受到的挤压力, 改变不同环境温度测试不同膏体推进剂流入实验毛细管道, 处理得到毛细管内膏体流速及其在毛细管两端所受压差, 从而经数据处理建立其本构方程。实验段毛细管道长 $L=50$ mm, 直径 $D=4$ mm, 长径比为 12.5, 储料罐内活塞直径 $D_p=40$ mm。

膏体推进剂主要成分有三种, 即填料组分、粘合剂、表面活性剂, 不同配比三种组分所得到的膏体推进剂其流变性会出现不同, 实验用三种推进剂组分含量

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2016-11-08

基金项目: 航天科技创新基金(CASC03-02); 中央高校基本科研业务费专项基金(30920140112001)

作者简介: 刘成浩(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事膏体和固体推进技术研究。e-mail: bjluchenghao@163.com

通信联系人: 封锋(1982-), 男, 副教授, 主要从事膏体(凝胶)和固体推进技术研究。e-mail: nust203@aliyun.com

如表 1 所示。

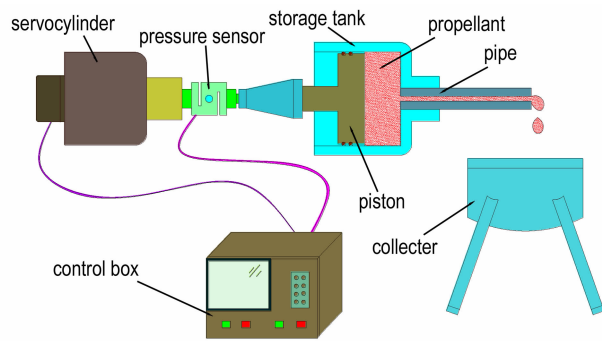


图 1 实验装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

表 1 推进剂组分

Table 1 Propellant composition			
propellant	filler	binder	surfactant
1#	75	23.75	1.25
2#	80	18.75	1.25
3#	70	28.75	1.25

流变实验温度选取为 1#膏体推进剂 20, 26 °C, 2#膏体推进剂 20, 28 °C, 3#膏体推进剂 20, 32 °C, 测得不同推进剂相同温度下和同种推进剂在不同温度下的流量与压力差数据, 经处理得到其流变关系。

2.2 处理方法

膏体推进剂属于非牛顿流体, 其粘度函数仅与剪切速率有关。

当前实验研究所使用的本构方程为幂律方程, 其公式为^[10]:

$$\tau_w = k \dot{\gamma}_w^n \text{ 或 } \lg \tau_w = \lg k + n \lg \dot{\gamma}_w \quad (1)$$

式中, n 为流动指数, k 为稠度系数, 一般剪切稀化流体 $n < 1$, 本实验中 n, k 取近似常数, 下角标 w 意指管壁位置。

根据表观粘度函数公式:

$$\eta_w = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (2)$$

于是剪切稀化流体本构方程也可写成如下形式:

$$\eta_w = k (\dot{\gamma}_w)^{n-1} \quad (3)$$

根据粘性流体圆管层流基本方程得到^[11]:

管壁剪切应力与压降关系式:

$$\tau_w = \frac{\Delta p}{4} \frac{L}{D} \quad (4)$$

管壁剪切速率:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8v}{D} \quad (5)$$

由上述分析可得知对 $\ln \tau_w$ 与 $\ln \dot{\gamma}_w$ 作图, 根据截距 b 与斜率 $\tan \theta$ 确定 n 和 k 的值。

根据初步拟合到的本构方程再进行巴格利误差修正, 巴格利误差修正方法^[12]所用到的巴格利修正参数为 n_b , 其由几组不同长细比毛细管道测定求得。在某一温度下, 选取不同长径比毛细管道, 对某一推进剂做流动实验测得其压差, 由压差与长径比的数据绘制巴格利修正曲线图以确定巴格利修正参数值 n_b 。

巴格利修正管壁剪切应力公式为^[12]:

$$\tau_w = \frac{\Delta p}{2 \left(\frac{L}{R} + n_b \right)} \quad (6)$$

应用巴格利修正管壁剪切应力公式计算得到真剪切应力, 对所得剪切应力与剪切速率再次应用上述处理方法做对数关系图, 从而可处理得到修正后本构方程。

3 结果与分析

3.1 实验数据与处理

根据实验装置测试三种推进剂 (1#、2# 与 3# 推进剂) 在活塞驱动下以速度 v 流经长细比 12.5 的毛细管道, 测量活塞盘所受压力 F , 实验数据及毛细管内数据处理结果见表 2。

由公式 (4)、(5) 处理得到剪切速率与剪切应力对数关系, 并作出对数函数关系, 如图 2 所示, 从图 2 中可看出其对数函数关系拟合曲线基本为一条直线, 易求得斜率和截距, 流动指数与稠度系数计算结果如表 3 所示。

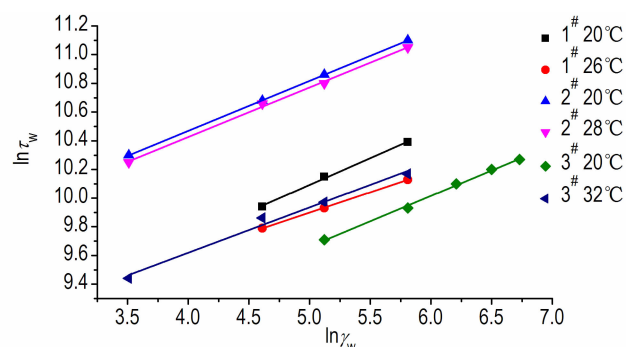


图 2 毛细管内剪切应力与剪切速率对数函数曲线

Fig.2 Curves of shear stress and shear rate in the pipe

表 2 活塞供给速度与毛细管两端压力差实验数据及处理结果

Table 2 Data of piston driving speed and force & Data processing

propellant	20 °C				26 °C (1#) 28 °C (2#) 32 °C (3#)			
	$v_p / \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	F / N	$v / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta p / \text{MPa}$	$v_p / \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	F / N	$v / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta p / \text{MPa}$
1#	30	1440	50	1.04	30	1250	50	0.89
	50	1736	83.33	1.28	50	1420	83.33	1.03
	100	2171	166.67	1.63	100	1710	166.67	1.26
2#	10	2000	16.67	1.49	10	1900	16.67	1.41
	30	2870	50	2.18	30	2800	50	2.13
	50	3400	83.33	2.60	50	3220	83.33	2.46
3#	100	4300	166.67	3.32	100	4100	166.67	3.16
	50	1165	83.33	0.82	10	920	16.67	0.63
	100	1430	166.67	1.03	30	1333	50	0.96
3#	150	1660	250	1.22	50	1470	83.33	1.07
	200	1810	333.33	1.34	100	1766	166.67	1.30
	250	1940	416.67	1.44				

Note: v_p is piston driving speed; F is piston force; v is the flow speed in the pipe; Δp is the pressure different in the pipe.

表 3 毛细管内剪切速率与剪切应力对数关系及流动指数与稠度系数结果

Table 3 Logarithmic form of shear stress and shear rate in the pipe & data of shear stress and shear rate

propellant	20 °C				26 °C (1#) 28 °C (2#) 32 °C (3#)			
	$\ln \dot{\gamma}_w$	$\ln \tau_w$	n	k	$\ln \dot{\gamma}_w$	$\ln \tau_w$	n	k
1#	4.61	9.94			4.61	9.79		
	5.12	10.15	0.38	4024	5.12	9.93	0.29	4914
	5.81	10.39			5.81	10.13		
2#	3.51	10.30			3.51	10.25		
	4.61	10.68	0.35	8955	4.61	10.66	0.35	8955
	5.12	10.86			5.12	10.80		
3#	5.81	11.10			5.81	11.05		
	5.12	9.71			3.51	9.44		
	5.81	9.93			4.61	9.86		
3#	6.21	10.10	0.36	2697	5.12	9.97	0.32	4447
	6.50	10.20			5.81	10.17		
	6.73	10.27						

Note: $\dot{\gamma}_w$ is shear stress; τ_w is shear rate; n is flow index; k is consistency coefficient.

3.2 巴格利 (Bagley) 误差修正

测得实验温度下三种膏体推进剂在四组不同长径比(3.5/5.5/7.5/9.5)下的压差,根据实验点绘制巴格利误差修正曲线图,以所拟合的直线与横轴截距确定巴格利误差修正参数 n_b 的值,列举出三种推进剂 20 °C 巴格利误差修正曲线如图 3 所示。

根据实验结果拟合出 $\tau_w = k \dot{\gamma}_w^n$ 形式本构方程,利用本构方程代入实验处理得到的 $\dot{\gamma}_w$ 值,结合公式(2)反算出本构模型理论压差 Δp_e 。所求得理论压差 Δp_e 代入公式(6)进行巴格利误差修正计算,得到误差修正后剪切应力 τ_w ,结合剪切速率 $\dot{\gamma}_w$ 重新按公式(4)、(5)及图 2 方法绘制剪切应力与剪切速率对数函

数曲线,求得巴格利误差修正后流动指数 n 与稠度系数 k ,并求得巴格利误差修正后理论压差 Δp_b 。

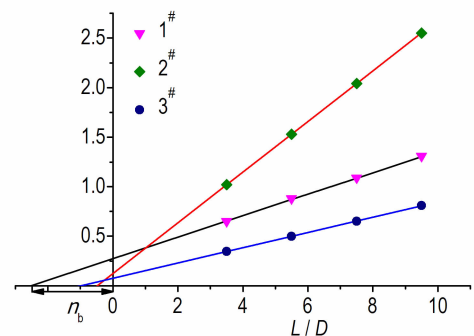


图 3 三种推进剂 20 °C 巴格利误差修正曲线

Fig. 3 Bagley correction curves around 20 °C

根据公式(3)建立巴格利误差修正前后粘度函数关系本构方程,并结合实验处理的 τ_w 和 $\dot{\gamma}_w$ 计算出实测黏度,其结果如图4所示。计算所得巴格利误差修正参数 n_b 、理论压差 Δp_e 、修正后压差 Δp_b 、求得的流动指数 n 、稠度系数 k 及巴格利误差修正前后误差值如表4所示。

由图4中可以看出巴格利误差修正后粘度函数曲线对实验点的吻合性更好,修正后粘度函数曲线比修正前误差更小,从表4可以看出巴格利误差修正前的压差误差 ε_e 在3%~12%,修正后误差 ε_b 均在2%以内,可见巴格利修正使误差有明显减小。

表4 巴格利修正结果及误差对比

Table 4 Result of Bagley correction and error

T/°C	propellant	Δp /MPa	Δp_e /MPa	Δp_b /MPa	n_b	n	k	ε_e /%	ε_b /%
20	1 [#]	1.63	1.829	1.655	2.53	0.38	3641	12.21	1.53
	2 [#]	3.32	3.420	3.353	0.48	0.35	8778	3.01	0.99
	3 [#]	1.03	1.092	1.049	0.99	0.36	2592	6.02	1.84
26	1 [#]	1.26	1.325	1.273	1.02	0.29	4722	5.16	1.03
28	2 [#]	3.16	3.420	3.221	1.53	0.35	8434	8.23	1.93
32	3 [#]	1.30	1.427	1.317	2.08	0.32	4105	9.77	1.31

Note: Δp_e is calculate pressure different of the pipe on both end before Bagley correction; Δp_b is calculate pressure different of the pipe on both end after Bagley correction; n_b is Bagley correction factor; ε_e is the error before Bagley correction; ε_b is the error after Bagley correction.

4 结论

(1) 巴格利修正前本构方程计算得到的压差与实际测得的压差误差较小(3%~12%),验证了本构方程的准确性。

(2) 巴格利修正后本构方程精度更高,误差<2%,可见巴格利误差修正方法具有一定的有效性。

(3) 巴格利误差修正前实验结果存在一定误差,该误差主要由储料管与毛细管过渡处截面突变带来的入口压力损失引起,巴格利误差修正方法将这一损失加以考虑,在剪切应力方程引入巴格利误差修正参数,从而在一定程度上减小了误差。

(4) 由巴格利误差修正后的误差值的差异性可得出巴格利误差修正精度与巴格利修正系数 n_b 的测量与选取有关,更精确的测量巴格利修正系数 n_b 可在一定程度上减小修正误差。

参考文献:

- [1] 沈海琴. 膏体推进剂火箭发动机研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2004, 2(4): 32-35.
SHEN Hai-qin. Research progress of pasty propellant rocket en-

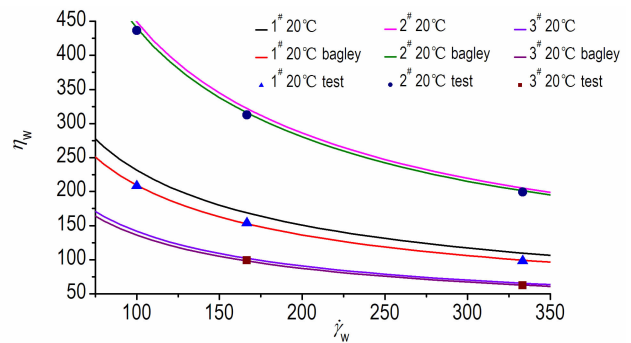


图4 误差修正前后三种推进剂 20 °C 粘度函数曲线

Fig. 4 Viscosity function curves around 20 °C

gine[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2004, 2(4): 32-35.

[2] 石建. 膏体火箭发动机的性能特点及应用前景[J]. 飞航导弹, 2008(10): 61-63.

SHI Jian. The characteristics and application prospects of pasty propellant rocket engine [J]. *Winged Missiles Journal*, 2008(10): 61-63.

[3] 龚静芝, 封锋, 邓寒玉, 等. 石蜡基凝胶燃料的制备及性能表征[J]. 含能材料, 2016, 24(6): 560-564.

GONG Jing-zhi, FENG Feng, DENG Han-yu, et al. Preparation and performance characterization of paraffin based gel fuel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(6): 560-564.

[4] 强洪夫, 夏学礼. 凝胶推进剂管道流动特性影响因素数值分析[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 137-142.

QIANG Hong-fu, XIA Xue-li. Numerical analysis of factors affecting flow property of gel propellants in round pipes [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 137-142.

[5] 周超. 膏体推进剂流变与输送特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

ZHOU Chao. The study on rheological and supply behaviour of Pasty Propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.

[6] 张蒙正, 左博. 幂律型凝胶推进剂管路中的流动特性[J]. 推进技术, 2009, 30(2): 246-250.

ZHANG Meng-zheng, ZUO Bo. Flow behavior of power law model gelled propellant in the pipe [J]. *Journal of Propulsion*

- Technology, 2009, 30(2): 246-250.
- [7] 沈铁华, 杨敬贤, 孙庆曼. 膏体推进剂发动机试验[J]. 推进技术, 2004, 25(2): 173-175.
SHEN Tie-hua, YANG Jing-xian, SUN Qing-man. Experimental investigation of pasty propellant rocket engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(2): 173-175.
- [8] 徐亚龙, 陈淑秉. 膏状推进剂——一种新型的能量管理型推进剂[C]//中国宇航学会固体火箭推进专业委员会2001年年会, 2001.
XU Ya-long, CHEN Shu-bing. Pasty Propellant-A kind of energy management propellant[C]//China aerospace society of professional committee of the solid rocket propulsion annual conference, 2001.
- [9] Rahimi S, Natan B. Atomization characteristics of gel fuels[R]. AIAA-98-3830: 1998.
- [10] 代玉东. 凝胶推进剂及其模拟剂的制备和特性表征[J]. 火箭推进, 2004, 30(2): 59-64.
DAI Yu-dong. Preparation and characterization of gelled propellant and simulants[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2004, 30(2): 59-64.
- [11] 左博, 张蒙正. 凝胶推进剂直圆管中剪切速率与表观粘性实验研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 12-15.
ZUO Bo, ZHANG Meng-zheng. Experimental investigation of the apparent viscosity and the shear rate of gelled propellant in straight round pipe[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2007, 33(4): 12-15.
- [12] 王作龄. 最新橡胶工艺原理(二十三)[J]. 世界橡胶工业, 2005, 32(2): 50-54.
WANG Zuo-ling. New rubber technology (Twenty-three)[J]. *World Rubber Industry*, 2005, 32(2): 50-54.

Constitutive Equation of Paste Propellant Based on Bagley Correction

LIU Cheng-hao, FENG Feng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the process of fitting the constitutive equations, the Bagley correction method was brought in to obtain the correction parameters to refit the constitutive equation and reduce experimental errors caused by the viscosity of paste propellant. The experimental errors were reduced from 8% to less than 2% by using the Bagley correction method. The obtained curve of the constitutive equations were consistent with the experimental data. The results showed that the Bagley correction method had an obvious effect in improving the accuracy of the equation to a certain extent.

Key words: paste propellant; constitutive equation; Bagley correction; error processing

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.05.005



《含能材料》“损伤与点火”征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部