

低温环境对气体减压阀调节特性的影响

田川¹, 廉英琦², 雷小飞², 罗大亮²

(1. 空军装备部驻西安地区军事代表局, 陕西 西安 710043;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 气体减压阀是轨姿控发动机的关键组件, 其出口压力特性直接影响到发动机系统推力性能及工作可靠性。通过减压阀低温环境影响分析, 得到了影响减压阀阀芯受力和调节特性的3种因素。对3种因素影响下减压阀低温动态特性进行仿真研究, 获得了低温环境减压阀启动压力峰值和稳态出口压力的相对变化趋势, 减压阀启动压力峰值和稳态出口压力值均随温度的降低而升高, 低温环境膜片特性的变化是影响减压阀出口压力变化的主要因素, 通过减压阀低温环境启动压力峰值和稳态出口压力的拟合函数, 能够预估低温启动峰值和稳态出口压力, 满足发动机低温环境系统参数设计。

关键词: 减压阀; 低温; 出口压力; 压力峰值

中图分类号: V432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2020)06-0082-08

Influence of low temperature environment on the regulation characteristics of gas pressure reducing valve

TIAN Chuan¹, LIAN Yingqi², LEI Xiaofei², LUO Daliang²

(1. Xi'an Military Representative Bureau of Air Force Equipment, Xi'an 710043, China;

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

Abstract: The gas pressure reducing valve is the key module of the orbital and attitude control engine, and its characteristic of outlet pressure directly affects the thrust performance and working reliability of the engine system. Through the influence analysis of the PRV in low temperature environment, there are three factors affecting the stress and regulation characteristics of the valve spool. The low-temperature dynamic characteristics of the PRV under the influence of three factors are simulated, and the relative change trend of the starting pressure peak and the steady-state outlet pressure of the PRV are obtained in low temperature environment. It is considered that the starting pressure peak and the steady-state outlet pressure of the valve increase with the decrease of temperature. The change of diaphragm characteristics in low temperature environment is the main factor affecting the change of outlet pressure. Through the fitting function of the starting pressure peak value and the steady-state outlet pressure of the PRV in low temperature environment, the low-temperature starting peak value and steady-state outlet pressure can be esti-

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(11702204)

作者简介: 田川(1977—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机

mated to meet the requirements of the engine system parameter design in low temperature environment.

Keywords: pressure reducing valve (PRV); low temperature; outlet pressure; pressure peak

0 引言

气体减压阀是挤压式轨姿控发动机的关键组件,其出口压力特性直接决定了系统推力性能,也影响到推力室工作的可靠性^[1-2]。减压阀在制造时通过调整弹簧力预先设定出口压力值。减压阀在阀芯开始动作的瞬间,阀芯处于最大开度,高压气体以最大流量充填出口容腔,当出口容腔压力达到关闭压力时,阀芯开始向关闭方向运动,这个过程中出口压力一般表现为较高的压力峰值,然后下降到平衡压力。出口压力稳定的过程则是作用在减压阀运动部件上力的动态平衡过程,往往会引起出口压力振荡^[3]。发动机系统要求减压阀在流量大范围快速变化情况下动态特性稳定、出口压力偏差小。

减压阀出口压力特性受到诸多因素的影响。尤裕荣、曾维亮等人的研究表明,摩擦力、流体稳态力对减压阀静态特性偏差有不同程度的影响,并对此进行仿真分析,研究了气体压力、温度、流量及阀芯开度等参数对减压阀启动特性的影响,提出了减压阀优化设计的措施^[3,4]。曹明主要讨论了结构参数对减压阀静态特性的影响^[5]。朱建国等人讨论了阀芯开度、限流圈、管路系统等因素对减压阀动作瞬间压力峰值及振荡的影响,提出了抑制振荡的措施^[6]。目前国内外对减压阀特性的研究主要关注结构参数的影响^[7-15],少有涉及低温环境对减压阀特性的影响。

本文针对某发动机用气体减压阀低温工作特性,开展动态仿真和试验研究,获得了减压阀出口压力特性随温度变化的规律,分析了低温环境影响减压阀特性的主要因素,为减压阀低温工作特性趋势判断提供依据。

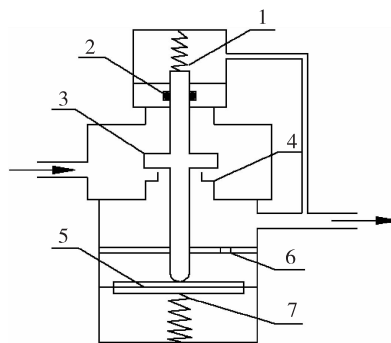
1 低温环境影响分析

典型逆向式减压阀结构原理如图1所示,主要由主副弹簧、密封圈、阀芯、阀座、膜片以及阻尼罩

组成。减压阀的动态特性本质上是阀芯在气体介质力作用下受力的动态平衡过程。轨姿控发动机用减压阀最低使用环境温度一般为 $-35 \sim -50\text{ }^{\circ}\text{C}$,该温度环境影响减压阀阀芯受力和调节特性的主要因素包括:

1)刚度变化:减压阀的刚度由弹簧和膜片共同组成,低温环境下,材料弹性模量发生变化,偏离设计的额定点,导致减压阀动态特性发生变化;

2)阻尼变化:减压阀阀芯运动阻尼主要受到胶圈摩擦力的影响。低温环境下,橡胶收缩和润滑脂性能降低导致阀芯运动阻尼发生变化,导致减压阀动态特性发生变化。



1-副弹簧;2-密封圈;3-阀芯;4-阀座;
5-膜片;6-阻尼罩;7-主弹簧。

图1 逆向卸荷式减压阀工作原理图

Fig. 1 Diagram of reverse unloading PRV

2 动态仿真分析

对减压阀低温动态特性进行仿真及分析,以刚度和阻尼为要素研究其对减压阀低温特性的影响。

2.1 弹簧刚度变化对调节特性的影响

根据 GB/T 23935—2009 圆柱螺旋弹簧设计计算标准,圆柱螺旋压缩弹簧刚度

$$K_1 = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (1)$$

式中: G 为材料切变模量,MPa; d 为弹簧丝径,mm; D 为弹簧中径,mm; n 为弹簧有效圈数。

假设减压阀弹簧常温工作温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温为

-35 ℃,则温差为 55 ℃。在此温度下弹簧刚度变化率

$$K'_t = \frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{1}{K_t} \frac{\partial K_t}{\partial T} \Delta T \quad (2)$$

可得

$$K'_t = \frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{\Delta G}{G} + 4 \frac{\Delta d}{d} - 3 \frac{\Delta D}{D} \quad (3)$$

式中: ΔK_t 为弹簧刚度变化量, N/mm; ΔG 为材料切变模量变化量, MPa; Δd 为弹簧丝径变化量, mm; ΔD 为弹簧中径变化量, mm; $\frac{\Delta d}{d}$ 和 $\frac{\Delta D}{D}$ 分别为弹簧丝径和中径在 ΔT 温度变化下的变化率, 即材料的平均线膨胀系数。由于弹簧用不锈钢材料线膨胀系数极小 (1.3×10^{-7}), 因此式(3)可以近似认为

$$K'_t \approx \frac{\Delta G}{G} \quad (4)$$

由式(4)可得低温下弹簧刚度变化率主要由材料的切变模量变化率决定。假设低温下材料切变模量随温度近似线性变化, 通过插值法可以得到不同温度下的不锈钢材料切变模量, 进而得到不同温度下的弹簧刚度, 如表 1 所示。

表 1 不锈钢弹簧低温刚度

Tab. 1 Low temperature stiffness of stainless steel spring

温度/℃	不锈钢切变模量/MPa	刚度/(N · mm ⁻¹)
20	7.52×10^4	228.5
0	7.56×10^4	229.7
-15	7.59×10^4	230.6
-35	7.63×10^4	231.8
-273	8.10×10^4	246.1

建立典型逆向式结构减压阀的 AMESim 仿真模型, 如图 2 所示, 采用表 1 计算的弹簧刚度对减压阀在温度为 20、0、-15、-35 ℃ 时启动过程中的动态特性进行仿真。气体介质采用氮气, 入口压力为 28 MPa; 出口压力随时间变化的仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 随着温度降低启动瞬间压力峰值及稳定后出口压力均略有升高, 但压力峰值与稳态出口压力的比值为 1.092 ~ 1.121, 差别较小 (相对变化 2.66%)。

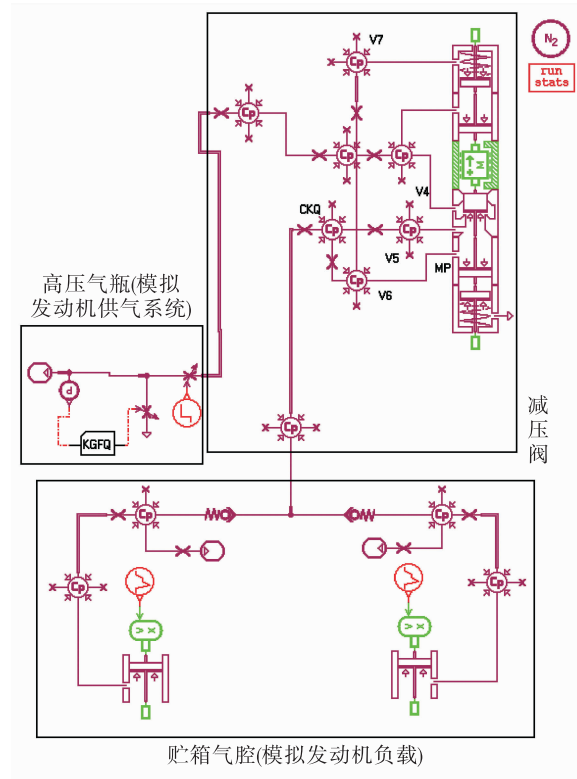


图 2 减压阀仿真模型

Fig. 2 Simulation model of PRV

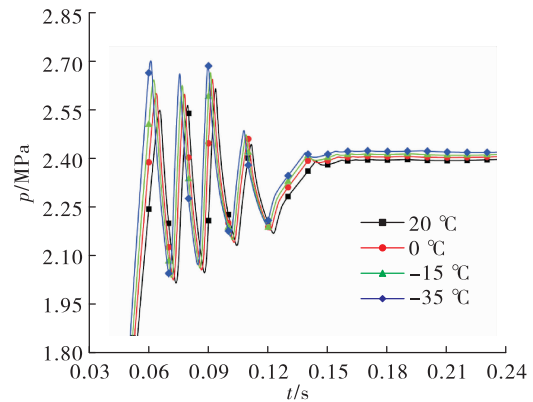


图 3 不同弹簧刚度条件下出口压力动态仿真曲线

Fig. 3 Dynamic simulation curve of outlet pressure at different stiffness of spring

2.2 膜片刚度变化对调节特性的影响

轨姿控发动机用减压阀常使用橡胶膜片作为感压元件, 具有出口压力精度高、结构紧凑的特点。橡胶作为一种有机高分子材料, 具有高弹性、大变形、压缩性差等超弹性力学特性。相比普通金属材料, 橡胶的弹性阶段材料属性有着显著差异, 其具

有发生大变形而不发生破坏的能力。而且在小变形区域内,橡胶材料的弹性模量不是一个定值,因此无法使用常用的赋予各向同性材料属性的方法对膜片的刚度进行计算。

研究人员常采用应变能函数 $W(E)$ 来描述超弹性材料的力学性能,该函数可以准确描述橡胶等超弹性材料。很多学者使用唯象的方法,提出了多种基于应变能函数的超弹性材料本构方程。针对橡胶材料的本构模型包括 Ogden-Tschemgl 模型、Klosner-Segal 模型、Monney-Rivlin 模型等。其中 Monney-Rivlin 模型(M-R 模型)更贴近橡胶材料真实性,且被大量的实验验证^[16-18]。M-R 模型的一般形式为

$$W = \sum_{k+l=1}^N a_{kl} (I_1 - 3)^k (I_2 - 3)^l + (I_3 - 1)^2 / 2K \quad (5)$$

式中: a_{kl} 为 M-R 关系系数; K 为体积模量(超弹性材料的不可压缩性)。

M-R 模型依据参数不同,分为 2、5 和 9 参数 M-R 模型。针对不同型号的超弹性材料,需要进行材料的单轴拉伸、单轴压缩、平面剪切等材料力学性能测试,通过参数拟合方法得到这些参数,从而完成针对一种材料的 M-R 材料本构模型的构建。

针对航天丁腈橡胶材料,傅海明开展不同温度下的材料力学试验,并拟合出不同温度下航天

丁腈橡胶材料的 9 参数 M-R 本构模型^[19],该模型能较准确地反映丁腈橡胶材料在常温、低温下的力学性能,因此适用于本减压阀橡胶膜片的刚度分析。

采用有限元分析对膜片刚度进行仿真计算。材料参数设置为超弹性模型,选择 9 参数 M-R 本构模型。改变环境温度,分别设置 -35、-15、20 °C 以计算不同温度下膜片的刚度。仿真结果如图 4 所示,刚度计算结果如表 2 所示。

表 2 不同温度膜片刚度计算结果

Tab. 2 Computation results of diaphragm stiffness at different temperatures

温度/°C	计算刚度/(N · mm ⁻¹)
20	25.8
-15	44.8
-35	54.6

由上述弹簧刚度及膜片刚度的分析计算可以看出,-35 °C 膜片刚度相对于 20 °C 时的变化量远大于弹簧在相同温差下的变化量,达到了 8.7 倍。因此低温下减压阀由于刚度变化而发生的特性差异主要是由膜片刚度变化引起的。

引入膜片刚度的变化,对减压阀在不同温度下启动过程中的动态特性进行仿真。出口压力随时间变化的仿真结果如图 5 所示。

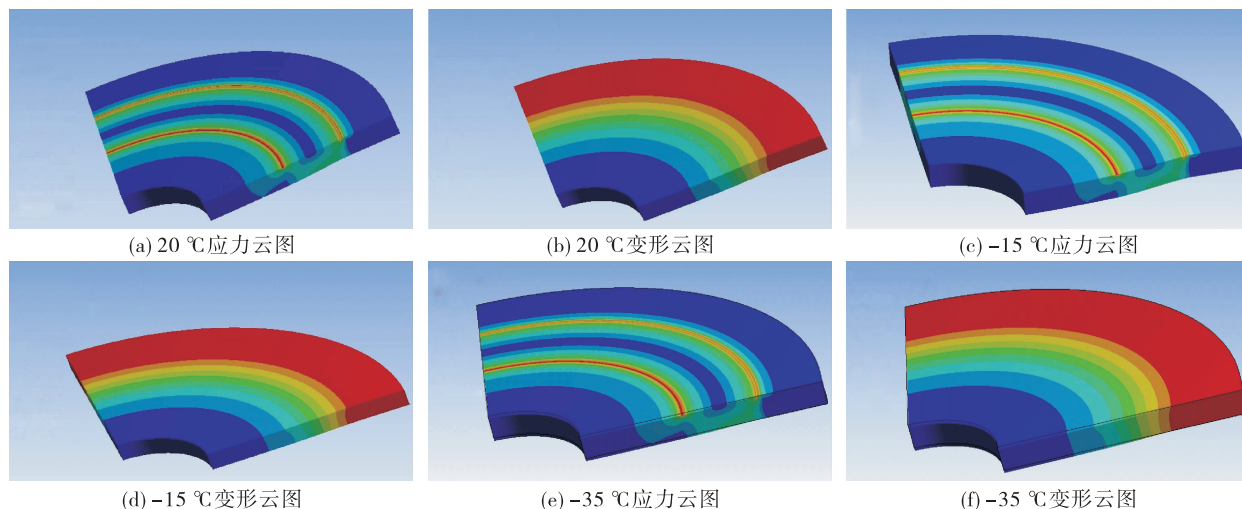


图 4 不同温度下膜片应力与变形仿真结果

Fig. 4 Simulation results of directional deformation and equivalent stress of diaphragm at different temperatures

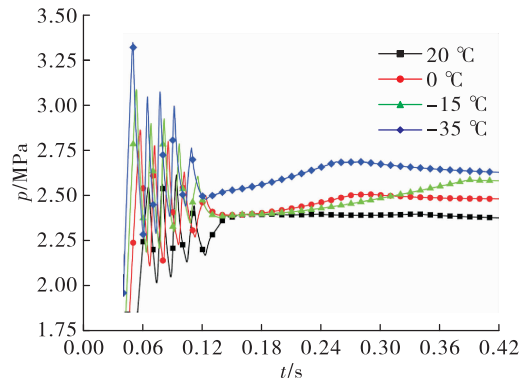


图 5 不同膜片刚度条件下出口压力动态仿真曲线
Fig. 5 Dynamic simulation curve of outlet pressure at different stiffness of diaphragm

由图 5 可以看出,随着温度降低启动瞬间压力峰值及稳定后出口压力均略有升高,但压力峰值与稳态出口压力的比值为 1.092 ~ 1.259,差别明显(相对变化 15.29%,约在弹簧刚度变化基础上引入了 12.63%)。

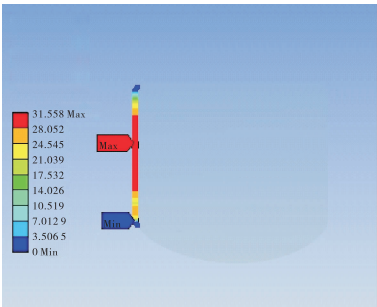
2.3 阻尼变化对调节特性的影响

减压阀阀芯运动阻尼主要由 O 形橡胶密封圈摩擦力提供。低温下,由于密封圈的弹性模量发生变化,会导致密封圈的接触应力和接触宽度发生变化,进而影响密封圈的摩擦力。由于减压阀行程小(不大于 0.3 mm),在该行程下,密封圈属于微动状态^[20],其摩擦力为静摩擦力,可以采用有限元静力分析对密封圈不同温度下接触应力分布进行计算,进而得到不同温度下密封圈的摩擦力。仿真结果如图 6 所示,静摩擦力计算结果如表 3 所示。

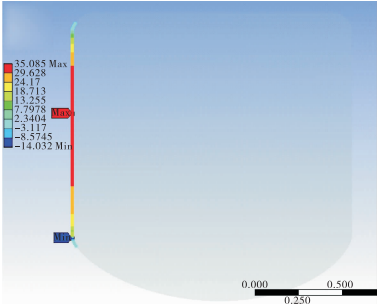
表 3 不同温度 O 形圈静摩擦力计算结果
Tab. 3 Calculation results of O-ring static friction at different temperatures

温度/℃	静摩擦力/N
20	49.6
-15	66.1
-35	77.1

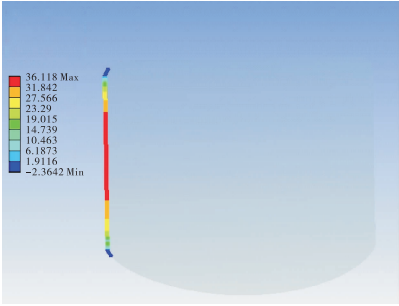
将上述计算结果作为阀芯运动阻尼的条件,对减压阀在不同温度下启动过程中的动态特性进行仿真。出口压力随时间变化的仿真结果如图 7 所示。



(a) 20 °C O形圈接触应力云图



(b) -15 °C O形圈接触应力云图



(c) -35 °C O形圈接触应力云图

图 6 不同温度下 O 形圈接触应力仿真结果
Fig. 6 Simulation results of contact stress of O-ring at different temperatures

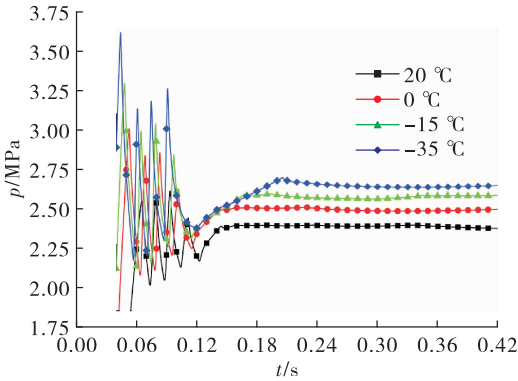


图 7 不同阻尼条件下出口压力动态仿真曲线
Fig. 7 Dynamic simulation curve of outlet pressure at different damping

由图 7 可以看出,随着温度降低启动瞬间压力峰值及稳定后出口压力均略有升高,但压力峰值与稳态出口压力的比值为 1.092 ~ 1.429,差别明显(相对变化 30.86%,约在弹簧刚度变化基础上引入了 15.57%)。

3 特性试验

选取 4 台减压阀,分别进行不同温度下的特性试验,获取启动压力峰值、出口压力以及出口压力偏差的数据。试验系统原理如图 8 所示,将气瓶及减压阀均置于低温箱内,气瓶充气压力为 28 MPa,通过温箱控制气瓶内的氮气及减压阀的温度,在下游通过电磁阀与节流孔控制减压阀不同工况时的流量。试验时依次将氮气及减压阀温度调整至 20、0、-10、-15、-20、-25、-30、-35℃,温度达到平衡后,按预设程序进行特性试验:先以 750 mL/s 流量工作 30 s,关闭待机 20 s,然后以 30 mL/s 流量工作 30 s。测量并记录减压阀出口压力数据。

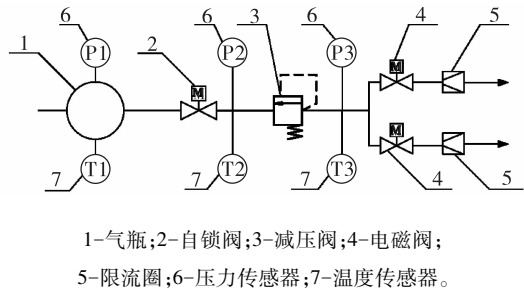


图 8 减压阀低温试验系统

Fig. 8 Low temperature experiment system of PRV

3.1 启动压力峰值试验

不同温度下,减压阀启动瞬间出口压力峰值数据如表 4 所示,温度越低,压力峰值越高。以 750 mL/s 流量工作时稳态出口压力为基准,相对压力峰值 p_k/p_s 随温度变化曲线如图 9 所示。20℃时压力峰值最大为稳态室压的 1.09 倍,而 -35℃时压力峰值最大为稳态室压的 1.36 倍,与仿真结果对比(20℃时压力峰值最大为稳态室压的 1.092 倍,-35℃时压力峰值最大为稳态室压的 1.429 倍),仿真结果偏差不大于 5.07%,仿真分析精度较高。结合仿真分析中对刚度和阻尼要素的研究,综合分析认为随着温度降低,减压阀弹簧刚度增大,作用于膜片上的加载力增大,阀门的初始开度增大,高压

气体瞬间流量更大;膜片橡胶材料刚度增大,发生低温硬化,存在迟滞效应;阀芯运动阻尼增大,关闭需要的压力更大,持续时间更长。因此温度越低启动压力峰值越高。

表 4 不同温度下启动压力峰值数据

Tab. 4 Startup pressure peak at different temperatures

温度 /℃	启动瞬间出口压力峰值/MPa			
	1#	2#	3#	4#
20	2.57	2.56	2.56	2.56
0	2.60	2.62	2.62	2.61
-10	2.66	2.69	2.69	2.67
-15	2.72	2.76	2.75	2.73
-20	2.76	2.83	2.89	2.82
-25	2.84	2.92	3.02	2.93
-30	2.94	3.07	3.20	3.07
-35	3.06	3.33	3.46	3.29

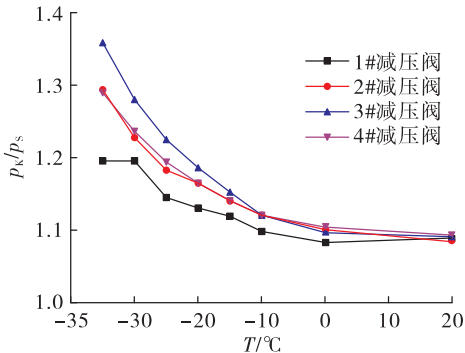


图 9 启动压力峰值相对值随温度变化曲线

Fig. 9 Relative value of startup pressure at different temperatures

对减压阀启动出口压力最大峰值与温度变化量进行最小二乘拟合,其相对变化符合指数函数关系

$$\frac{p_k}{p_s} = 1.08 + 0.01e^{\frac{20-T}{14.63}} \quad (6)$$

式中: p_k 为低温启动压力峰值; p_s 为相应温度 750 mL/s 流量下稳态出口压力; T 为低温温度。

3.2 出口压力试验研究

不同温度下,减压阀大流量(750 mL/s)、小流量(30 mL/s)工况出口压力数据如表 5 所示,温度降低,减压阀出口压力上升。以 20℃时减压阀出口

压力为基准,出口压力相对值 p_T/p_{20} 随温度变化的曲线如图 10 所示。大流量工况下,在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,减压阀出口压力较 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时升高了 $8.47\%\sim 8.97\%$;小流量工况下,在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,减压阀出口压力较 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时升高了 $7.85\%\sim 9.17\%$ 。4 台试验产品在相同温度下出口压力相对差值不大于 1.92% ,具有较好的一致性。与仿真结果进行对比, $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减压阀稳态出口压力仿真结果为 2.63 MPa , $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减压阀稳态出口压力仿真结果为 2.38 MPa ,升高了 10.5% ,与试验结果一致性较好。结合仿真分析中对刚度和阻尼要素的研究,综合分析认为随着温度降低,减压阀弹簧刚度增大,作用于膜片上的加载力增大,相应的与之平衡的出口稳态压力升高,因此温度越低出口稳态压力越高。

表 5 不同温度下出口压力数据
Tab. 5 Outlet pressure at different temperatures

温度 / $^{\circ}\text{C}$	出口压力/ MPa							
	1#		2#		3#		4#	
20	2.36	2.42	2.36	2.40	2.35	2.44	2.34	2.41
0	2.40	2.44	2.38	2.44	2.39	2.47	2.36	2.43
-10	2.42	2.47	2.40	2.45	2.40	2.48	2.38	2.45
-15	2.43	2.47	2.42	2.47	2.39	2.50	2.39	2.46
-20	2.44	2.48	2.43	2.49	2.44	2.52	2.42	2.47
-25	2.48	2.52	2.47	2.52	2.47	2.55	2.45	2.51
-30	2.51	2.56	2.50	2.56	2.50	2.60	2.48	2.55
-35	2.56	2.61	2.57	2.62	2.55	2.66	2.55	2.61

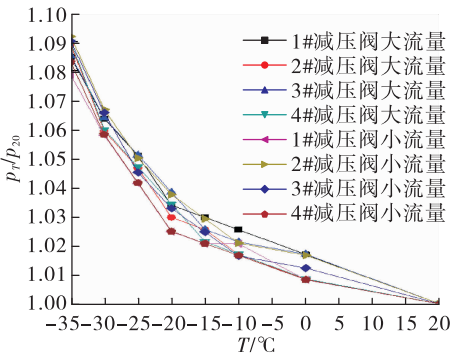


图 10 出口压力相对值随温度变化曲线
Fig. 10 Relative value of outlet pressure at different temperatures

对减压阀低温条件下出口压力增量的最大值

与温度变化量进行最小二乘拟合,其变化符合指数函数关系

$$\frac{p_T}{p_{20}} = 1.00 + 0.005e^{\frac{20-T}{19.10}}$$

(7)

式中: p_T 为低温时的稳态出口压力; p_{20} 为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时稳态出口压力; T 为低温温度。

4 结论

通过减压阀低温环境下影响因素和工作特性的仿真分析与试验研究,获得了不同低温条件下减压阀启动压力峰值和出口压力的变化趋势,有以下结论:

- 1)减压阀启动出口压力峰值随温度的降低而快速升高,与温度变化呈指数函数关系;在不改变出口压力的条件下,可以通过减小阀芯运动组件上的摩擦力 (15.57%) 或更换低温性能好的膜片 (12.63%) 的方法,降低温度对出口压力峰值的影响。
- 2)减压阀稳态出口压力随温度的降低而升高,低温环境下橡胶膜片特性的变化是影响减压阀出口压力的主要因素,降低温度对橡胶膜片的影响,可以有效减小对出口压力的影响。
- 3)获得了减压阀低温环境下启动压力峰值和稳态出口压力的拟合函数,可根据常温出口压力预估低温启动峰值和稳态出口压力,满足了发动机低温环境系统参数设计。

参考文献:

[1] SUTTON G P. Rocket propulsion elements[Z]. 2016.

[2] 李晓瑾,常小庆. 姿控发动机减压阀出口压力偏差计算方法研究[J]. 火箭推进,2008,34(6): 19-22.
LI X J, CHANG X Q. Research on outlet pressure deviation calculation of pressure reducing valve for attitude control engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008, 34(6): 19-22.

[3] 曾维亮. 航天姿控发动机减压阀的研究[J]. 火箭推进, 2001, 27(5): 6-11.
ZENG W L. Research on pressure reducing valve of aerospace attitude control engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2001, 27(5): 6-11.

[4] 尤裕荣,曾维亮. 逆向卸荷式气体减压阀的动态特性仿

- 真[J]. 火箭推进,2006,32(3): 24-30.
- YOU Y R, ZENG W L. Simulation on reverse balanced pneumatic pressure reducing valve dynamic characteristic[J]. Journal of Rocket Propulsion,2006,32(3): 24-30.
- [5] 曹明. 某减压阀静态特性分析[J]. 火箭推进,2006,32(3):24-30.
- CAO M. Static characteristic analysis of a pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(3): 24-30.
- [6] 朱建国,魏学峰,孙亮. 某减压阀高压冲击超调问题仿真分析与试验研究[J]. 火箭推进,2015,41(5): 72-76.
- ZHU J G, WEI X F, SUN L. Simulation and experiment research on high-pressure shock overshoot phenomenon of pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015,41(5): 72-76.
- [7] 包钢. 直动型高压反作用式气体减压阀静、动态特性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1986.
- [8] RYUICHI S, MINORU M, RYOU N. Pressure oscillation analyses of the pressure regulator for the H-II A propulsion system[R]. AIAA 2003-4600.
- [9] 王定军,袁洪滨,董苑. 贮箱充填过程仿真和分析[J]. 火箭推进,2008,34(1): 23-25.
- WANG D J, YUAN H B, DONG Y. Simulation and analysis of the tank filling process[J]. Journal of Rocket Propulsion,2008,34(1): 23-25.
- [10] 徐传凯. 解决减压阀振动问题的一个实例[J]. 航天推进与动力,2008(4):38-40.
- [11] 冯晓迪. 液压阀动态特性试验回路仿真研究[J]. 流体传动与控制,2009(4): 12-14.
- [12] 赵双龙. 调节阀特性研究[J]. 火箭推进,2010,36(2): 40-42.
- ZHAO S L. Characteristics study of a regulating valve[J]. Journal of Rocket Propulsion,2010,36(2): 40-42.
- [13] 郭珣,樊蕾. 气体减压阀动静压差研究[J]. 液压与气动,2019(5): 87-91.
- [14] 胡长喜. 反向卸荷式减压阀动态建模与仿真[J]. 火箭推进,2014,40(1): 60-64.
- HU C X. Dynamic modeling and simulation for converse unloading pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion,2014,40(1): 60-64.
- [15] 尹文娟,魏延明. 减压阀动态响应特性与稳定性研究[J]. 空间控制技术与应用,2013,39(3): 24-29.
- YIN W J, WEI Y M. On response characteristic and stability of pneumatic pressure-reducing valve[J]. Aerospace Control and Application,2013,39(3): 24-29.
- [16] TASORA A, PRATI E, MARIN T. A method for the characterization of static elastomeric lip seal deformation[J]. Tribology International,2013,60: 119-126.
- [17] EHAB E, BONFILS F, AYMARD C, et al. Modelling of Mooney viscosity relaxation in natural rubber[J]. Polymer Testing,2005,24(5): 620-627.
- [18] YAN X Q. Non-linear three-dimensional finite element modeling of radial tires[J]. Mathematics and Computers in Simulation,2001,58(1): 51-70.
- [19] 傅海明. 载人飞船舱门及其主轴密封结构的有限元分析与优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [20] 吴琼,索双富,刘向锋,等. 丁腈橡胶O形圈的静密封及微动密封特性[J]. 润滑与密封,2012,37(11): 5-11.