

## $N_2O_4$ 真空排放试验研究

刘昌波, 张 涛, 李福云  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 真空状态对高空液体火箭发动机的工作过程具有重要影响, 研究液体火箭发动机高空点火、真空排放等过程时, 必须对所采用的推进剂在真空状态与地面状态下的差别进行仔细研究。本文以某型高空发动机的真空排放过程为研究对象; 根据排放管路中流速相等和流动时间相等的原则, 设计了缩尺试验件, 对  $N_2O_4$  真空排放过程进行了试验研究。结果表明,  $N_2O_4$  真空排放流量的轻微减少对发动机实际排放效果影响很小。

**关键词:** 液体火箭发动机;  $N_2O_4$ ; 真空排放

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2006) 06-0001-05

## Sluicing procedure investigation of $N_2O_4$ in vacuum

Liu Changbo, Zhang Tao, Li Fuyun  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Vacuum environment has great effect on operation procedure of a liquid rocket engine. So when investigate the ignition in high altitude, much more attention should be paid on sluicing procedure in vacuum, differences of propellant properties at sea level or in high altitude. According to the sluicing procedure of a certain high altitude engine, based on the rule of the equivalence of flow velocity and flow time, a subscale system is designed to investigate the sluicing procedure of  $N_2O_4$ . The results show that a little decrease of  $N_2O_4$  sluicing flux in vacuum has slight effect on sluicing procedure.

**Key words:** liquid rocket engine;  $N_2O_4$ ; sluicing procedure in vacuum

### 1 引言

在真空状态下, 液体推进剂的许多物理现象

与地面状态下相差很大。真空状态下的压力一般远远低于液体推进剂的三相点压力, 推进剂在真空条件下流动时, 会发生汽化和冷凝固化的过程。因此, 在研究液体火箭发动机高空点火、真

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-09-10。

作者简介: 刘昌波 (1979—), 男, 硕士, 研究领域为发动机系统设计。

空排放等过程时, 必须考虑真空条件对过程的影响。

目前,  $N_2O_4$  是一种很常用的液体火箭发动机氧化剂, 其三相点温度为 $-11.2^\circ\text{C}$ , 三相点压力为 $0.0184\text{MPa}$  (绝压)。研究  $N_2O_4$  在真空状态下的排放过程, 对于采用  $N_2O_4$  作为氧化剂的高空发动机研究具有重要意义。

某型高空液体火箭发动机以  $N_2O_4$  作为氧化剂, 工作过程中要求进行真空排放。为了保证发动机实际工作的可靠性, 真空排放过程中, 不允许流量出现大的下降, 更不允许出现冻结物堵塞现象。到目前为止, 只进行了地面排放试验, 没有进行真空排放试验研究。因此很有必要对  $N_2O_4$  在“真空”与“地面”两种条件下的排放过程进行详细研究。

## 2 国内外研究情况

上世纪 60 年代, 美国在研究双子座 VI 飞船和 R-4D 发动机以及进行 Apollo 计划时, 由于真空条件的影响, 导致了多次高空点火失败, 甚至出现过飞行失败的重大事故<sup>[1]</sup>, 从而引发了美国航天史上有名的“安全点火计划”的实施, 并在理论认识和实际应用上取得广泛成果。

上世纪 60~70 年代, 为解决飞船和航天飞机废水在轨排放中遇到的问题, 美国和欧洲进行了许多实验研究。Mann 和 Stoll 的实验表明<sup>[2]</sup>: 水或水气混合物排入真空后, 将形成羽流, 羽流张角与液体温度有关, 排放液体温度越高, 张角越大; 为了防止喷雾器冻结, 喷雾器应是圆整的尖唇口并予以加热。Mikatarian 和 Anderson 研究了多种物质的真空排放过程<sup>[3]</sup>, 证实了 Mann 和 Stoll 的结果, 即排放液体温度越高, 膨胀越厉害, 羽流张角越大。发现从排放口流出的液态水, 经过真空室蒸发膨胀, 喷射到一个夹板表面时发生严重的冻结现象。测量获得排放管内的流量数据与假定管内流动介质全部为液体的理论解有所不同, 说明靠近出口的排放管内的流动已为气、液两相流。Fuchs 和 Legge 发现真空环境水柱失稳破碎以及破碎位置与来流温度、排放口直径密切  
万方数据

相关<sup>[4]</sup>。出口水柱温度越高或排放口直径越大, 越容易失稳破裂; 水柱破裂形成的水滴, 进一步蒸发成为冰粒。上述实验结果表明, 在排放管出口附近, 液体发生汽化产生气液两相流动, 会导致液体排放流量的降低。

由于真空试验需要庞大的真空设备且价格十分昂贵, 因此, 国内对推进剂的真空试验进行较少, 并且只能对一些三相点压力较高的推进剂 (如  $N_2O_4$ ) 进行试验。上世纪 70 年代, 为了研制某型高空发动机, 曾经进行过  $N_2O_4$  的真空失重蒸发试验和发动机的真空点火试验, 积累了一定的工程经验。林革研究员对某型高空发动机的推进剂真空排放过程进行了比较详细的理论计算, 通过仿真结果认为在排放管中不会发生冻结<sup>[5]</sup>。

## 3 试验系统设计

整个试验过程中, 至少应保证真空舱中的压力小于  $N_2O_4$  的三相点压力, 并能够持续时间。而某型高空发动机  $N_2O_4$  的排放流量约  $1\text{kg/s}$ , 现有的真空设备无法满足直接真空排放的要求, 因此必须根据一定的原则将整个试验的流量降低。根据现有真空设备的试验能力, 最终确定试验过程中  $N_2O_4$  流量不超过  $100\text{g/s}$ , 这样能够保证真空舱的初始压力小于  $1\text{kPa}$ , 整个试验过程的压力小于  $N_2O_4$  的三相点压力, 并能够维持约 10 分钟时间。

根据推进剂流动速度和在管路中的流动时间相等的原则, 可以算得试验排放管路直径约为  $3.0\text{mm}$ , 长度为  $1360\text{mm}$ ; 氧化剂模拟泵内径约为  $14\text{mm}$ , 根据氧化剂泵实际容积和入口管直径可以算出模拟泵长度约为  $176\text{mm}$ 。设计状态下,  $N_2O_4$  的排放流速约为  $6.6\text{m/s}$ , 则可以计算出排放管路中的流量约为  $68\text{g/s}$ 。

真空排放试验系统见图 1 所示。主要由增压气体、推进剂贮箱、模拟泵、排放管路、真空舱、阀、压力表、流量计及保温设备等组成, 此系统能够进行不加热  $N_2O_4$  和加热  $N_2O_4$  的“真空”和“地面”排放试验。

当进行地面排放试验时, 真空引射装置不工

作；真空排放试验时，首先打开真空引射装置，当真空舱的压力小于 1kPa 时，分别打开不加热 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和加热 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的截止阀，进行真空排放试验。

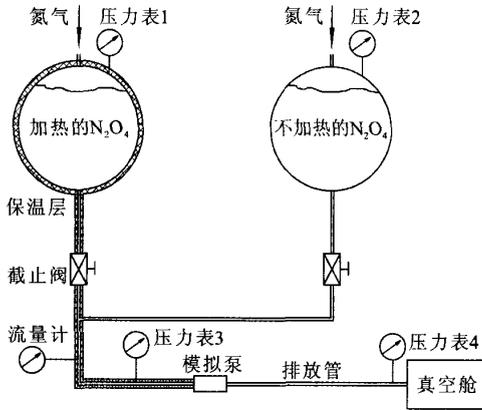


图 1 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放试验系统示意图

Fig.1 Schematic of N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> sluing procedure in vacuum

次试验，每次试验时间 10s。

(2) 真空排放试验

接真空舱，调整两贮箱压力到计算值，先启动真空引射系统，当真空舱压力小于 1kPa 时，打开截止阀，进行真空排放试验。

一共进行了九次真空排放试验，包括三次加热 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的真空排放和六次不加热 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的真空排放。各次试验时间如表 2 所示。

地面排放试验中，N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的汽化量很少，绝大部分都被收集桶收集。真空排放试验中，由于真空舱压力低于 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的三相点压力，从试验录像可以明显地看出，排放管口外，绝大部分 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 发生了汽化，形成了约 120° 扩散角，但没有发现明显的结冰现象；关机后排放管出口有白色冰出现，如图 2 所示。真空排放试验完毕，发现收集桶中约有 300ml 的冰块，约占总排放量的 6%。

4 试验情况

2005 年 12 月，试验按预定程序分别进行了不加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 地面排放、加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放和不加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放试验。

试验时，贮箱内的推进剂密度、温度及环境参数见表 1。

表 1 贮箱内推进剂密度、温度及环境参数

Tab.1 Propellant density, propellant temperature and environmental parameters

不加热状态下 N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		加热状态下 N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		环境参数	
密度 g/cm <sup>3</sup>	温度 ℃	密度 g/cm <sup>3</sup>	温度 ℃	大气压 kPa	温度 ℃
1.472	8.73	1.460	14.7	95.8	7.27

整个试验步骤如下：

(1) 地面排放试验

对不加热的推进剂贮箱进行增压，打开截止阀，进行地面排放试验，试验时间为 10s。根据计算得到的流量系数，调整不加热的推进剂贮箱压力，使排放流量保持为约 68g/s，重复进行三

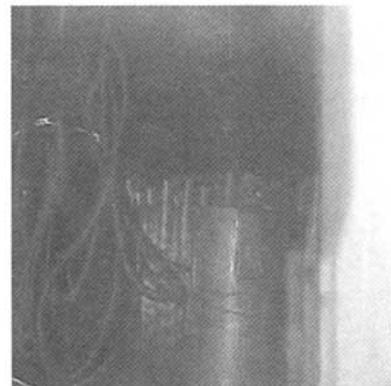


图 2 关机后排放管口出现了结冰

Fig.2 Freeze at exit of the sluing pipe after shutoff

表2 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>真空排放时间表Tab.2 Time of N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>sluicing procedure in vacuum

试验序号	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 状态	排放时间/s	与下次排放间隔/s
1	加热	15	5
2	加热	15	5
3	加热	15	5
4	不加热	15	5
5	不加热	7	5
6	不加热	15	5
7	不加热	7	600
8	不加热	7	5
9	不加热	7	结束

## 5 排放试验结果分析

### 5.1 真空舱压力对N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>真空排放的影响

综合整个试验,相对于地面排放,真空排放时N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的流量有所降低,这是由于在排放管出

口N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>发生了汽化,形成了气液两相流动,从而增大了管路的流阻系数所致。从表3可以看出,不加热的N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>真空排放时管路的流阻系数比地面相同情况下增大了约6.4%,当加热时,管路的流阻系数增大了9.4%。但是从试验的结果看,排放管路流量降低的幅度并不大,对不加热的N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,真空排放流量比地面相同情况下降低约3.1%。

试验还发现,当环境压力小于N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的三相点压力后,环境压力继续降低对排放流量没有明显的影响。图3是加热N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的真空排放流量曲线,试验结果是在真空舱压力约为500~1700Pa的情况下测得的,从图中可以明显地看出,整个排放过程中,N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的流量十分平稳(图中每次启动时,排放流量都有一个尖峰,达到了约120g/s,这是由于试验过程中采用了涡轮流量计的缘故,从测得的模拟泵前压力可以判断排放流量并没有超调现象),没有出现流量明显下降的现象。因此,当真空度接近零时,也可以利用此次试验数据对不同温度N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的真空排放情况进行线性插值推算。

表3 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>排放试验结果Tab.3 Results of N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>sluicing procedure

	地面排放试验	真空排放试验	
		加热的N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	不加热的N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
推进剂温度/℃	8.73(贮箱)	14.7(贮箱)	8.73(贮箱)
实际降压/MPa	0.402	0.417	0.423
实际流量/(g/s)	66.99	65.19	66.57
流速/(m/s)	6.44	6.40	6.38
流阻系数/MPa/(kg/s) <sup>2</sup>	89.59	98.05	95.35
流阻系数增大/%	—	9.4	6.4
流量降低/%	—	4.6	3.1

注:表中“流阻系数增大”和“流量降低”都是以地面不加热N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>排放的数据为基准计算的。

### 5.2 温度对N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>真空排放的影响

从排放试验结果可以看出,影响真空排放的另一个重要因素是推进剂温度。图4是加热N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>真空排放的温度曲线,从温度的测量数据来看,

真空排放过程中,模拟泵及排放管路的结构温度都高于N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>三相点温度-11.2℃,排放管出口的结构温度也只有-5~0℃,因此在排放过程中不可能有冰出现;关机后,排放管口温度迅速下降,

最低降到-15℃以下，从试验录像可以看到，在排放管出口有白色的冰不断飘落，此时管路中的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 是一个排空过程，由于 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的汽化吸收了周围大量的热量，使得排放管出口温度迅速降低，从而导致排放管出口出现结冰，但从图 3 可以看出，结冰不会影响下一次排放的正常进行。

增大到约 4.6%。

## 6 结论

通过 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的真空排放试验，可以得到如下结论：

(1) 真空排放时，在排放管出口发生汽化现象，但未出现明显的结冰，整个排放过程中 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 流量十分平稳；

(2) 关机后的排空过程中，排放管出口会发生结冰现象，但不影响下一次排放的正常进行；

(3) 真空环境对排放流量有一定影响，当采用不加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放时，流量比地面相同情况下减小约 3.1%；但当环境压力小于 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的三相点压力后，真空度对真空排放流量没有明显的影响；

(4) N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的温度对排放流量也有影响，当采用加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放时，流量比地面不加热时降低约 4.6%。

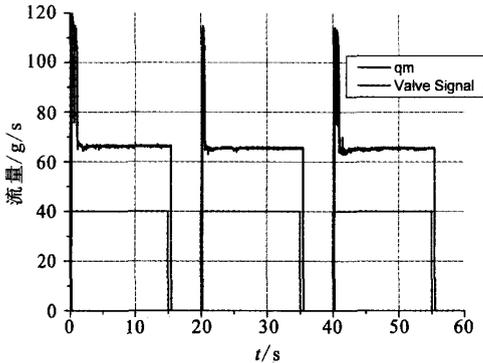


图 3 加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放流量

Fig.3 Sluicing flowrates of heated N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> in vacuum

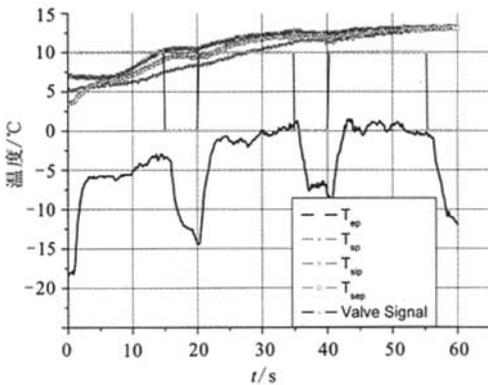


图 4 加热的 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放温度

Fig.4 Temperatures of sluicing procedure in vacuum using heated N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

对比加热及不加热条件下 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 真空排放结果，可以看出，N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 温度越高，对排放流量的影响越大，这与国外用水进行真空排放的试验结果一致。从表 3 可以看出，当 N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的温度由 8.73℃ 上升到 14.7℃ 时，真空排放流量的降低由约 3.1%

## 参考文献：

- [1] 周军. 双组元四氧化二氮/肼类推进剂空间点火特性 [J]. 火箭推进. 1998 (3) .
- [2] Mann B L, Stoll O T. Experimental investigation of the freezing problem presented in discharging water based fluids to space [R]. Society of Automotive Engineers, 912 D,1964.
- [3] Mikatarian R R, Anderson R G. An experimental investigation of a liquid jet expelled into vacuum [R]. AIAA Unmanned Spacecraft Meeting 12, 255-259,1965.
- [4] Fuchs H, Legge H. Flow of a water jet into vacuum [J]. Acta Astronautica 6:1226-1231.
- [5] 林革. 推进剂真空排放与冷却套充填特性研究 [D]. 西北工业大学硕士学位论文. 2003 年 4 月.

(编辑：王建喜)