

带柱塞泵的过氧化氢气体发生器循环

编译: 杨宝庆

中国航天科技集团公司第六研究院十一所

摘要: 描述了 85% 过氧化氢分解气体驱动的四缸柱塞泵, 泵重为 400 克、在出口压力近 5MPa 下可供水 172mL/s。在压力和流量相当条件下, 对采用该泵的气体发生器循环系统进行了测试。泵靠一小部分泵压过氧化氢的分解气体驱动, 该系统靠 0.2MPa 低压贮箱自身起动, 还评估了蒸汽凝结对系统性能的影响。

关键词: 过氧化氢; 气体发生器; 柱塞泵

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: (2004)01-0044-08

1 引言

本文介绍了泵压式火箭小型推进系统的研究或运载推进技术小型化研究中的最新进展。潜在的应用包括小型上面级、机动飞行器、登月着陆和起飞以及火星探索中^[1]。对于飞行器的液体级, 强调使用低压轻质的贮箱和结构紧凑的高压推力室以减少整个系统硬件重量和改善装配。例如, 取消挤压式推进系统中的气瓶。

大约十年前, 一个泵压式肼系统小型火箭进行了演示飞行^[2]。它的最大缺陷是高温气体从驱动端的活塞处泄漏并且加热气阀。近年的研究进展之一是使用可冷却的软密封来消除这种泄漏。近期有文章^[3]报道了这些进展并给出了最新的四缸泵初步的低压自身起动试验结果。后来, 改进后的该装置在更高压力下运行, 结果泵输出更加平稳。本文也报道了最新的工作, 即在气体发生器循环系统中使用这种防泄漏泵。

对比以前的肼推进剂研究, 另一个明显不同是: 应用无毒过氧化氢大大地简化了试验, 无推力室的小型系统可以在试验室的操作台上运行。

2 柱塞泵

涡轮驱动的离心泵广泛应用于运载器的发动机上。然而, 这种常规机械不宜应用到推力低于 20kN 的发动机上。要保证确定压力, 离心泵的周缘速度必须保持不变, 小尺寸离心泵的粘性损失会降低泵效率。

柱塞泵作为一种可选泵在概念上是简单的。为了产生连续的流动, 泵至少包含一对缸体, 它们交替地通过单向阀在低压下吸入液体和在高压下排出液体。柱塞泵可以由高压气体直接驱动而没有旋转部件, 这符合火箭的轻质要求。

柱塞泵可以被看成小型高压贮箱, 不断地从大的低压贮箱中抽取液体, 所有组件加在一起的质量远小于全增压的大贮箱, 这是因为贮箱的结构质量与它的承压和容积的乘积成正比。总的来说, 研制难点是要使泵缸体与相连的阀门组合成可靠的整体, 并且重量要小、结构紧凑, 以便能应用于火箭。为了保证流体流速很低, 包括阀在内的流道通径必须足够大。

另一个问题就是泵压液体与驱动端气体的隔

收稿日期: 2003-05-21, 修回日期: 2003-06-10。

作者简介: 杨宝庆 (1969—), 男, 硕士, 研究领域为宇航推进理论与工程。

离，这可轻易利用活塞来实现。四缸泵的腔体靠中心块体连接为一体，其中包含大口径的吸入单向阀（以保证在低压时的大流量）和较小排出单向阀，吸入口位于块体的顶部。

块体的底面有四个排出单向阀出口，图1给出组装了驱动端部件的这一面。在每个汽缸末端为气体吸入、排出阀门，由图中细管提供的控制气体操纵。每对相邻的汽缸交替工作，因此位置相对的活塞总是同时相对运动来避免流体在流道中来回流动和减小振动。任何时候都是两个相对的汽缸加压输送推进剂，同时其它两个汽缸从贮箱抽取推进剂。在泵的内部，活塞气体侧有效面积为液体侧有效面积的1.42倍。这个增压的特性使部分泵压推进剂能流到气体发生器来给泵提供动力。

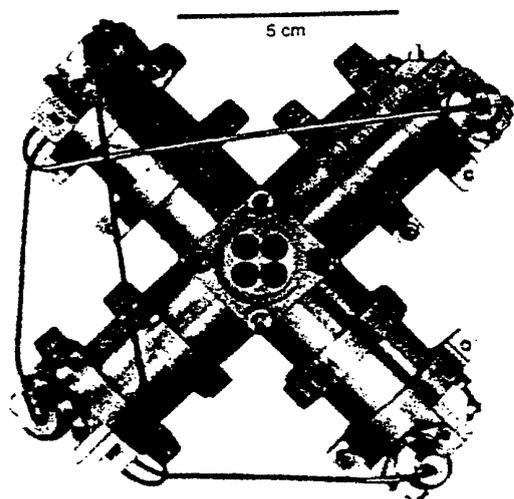


图1 有防漏密封装置的四联柱塞泵（350克）

连同附加的气体分配管（图中未示出）在内，泵的质量是400g，因为这个组件是由早期产品修改而来，存在占总质量10~20%的多余质量。另外，优化结构将会进一步减少它的质量。例如，汽缸和头部在压力远大于所需压力（20.7MPa）的液压试验中没有变形。

与早期的胼泵相比，一项重大的改进是在泵的驱动端消除了高温气体泄漏。这是通过在活塞中使用软密封和使用吸入、排放阀实现的。气体温度接近800K。以泵压流体作为冷却剂，汽缸壁、

头部由导热性好、质量轻、经济性好的铝制造。

1993年胼泵设计时的一个主要原则是防止胼过热。因此对泵的缸体和驱动段缸体采用了精心的隔热措施：一个不冷却的驱动端装配了固体石墨活塞环。但是，气体泄漏的结果意味着热流连续地流向泵，甚至当无液体流动时仍存在。具有讽刺意味的是：对过热的担心反而导致了过热出现。

3 泵最新试验结果

在操作台试验时，泵安装在带压0.35MPa的水贮箱上，并与高压气源相连。与涡轮泵不同，柱塞泵在无流动时仍保持全压，此时，无运动、无耗能，泵保持最大压力。打开泵的排出阀，流体即刻开始流动。泵活塞推动流体运动，阀门的运动周期与活塞每次冲程相一致，其频率完全取决于流体的流动，流体的流量可不断地从零到最大值变化。当阀运动并且每个相邻汽缸开始输送介质时，需要柱塞泵作瞬间转换。输出压力的平稳性是一个关键指标，获得平稳的压力输出一直是个难题。经过几年不断的改善和试验研究使得泵的平稳性取得明显进步。相应于气体驱动压力泵产生的液体平均压力更高了，驱动压力同样也增大了。

实测数据有：压力、温度、排出容积、工作时间、用来驱动泵的高浓度过氧化氢（HTP）消耗量。计算数据包括平均流量、平均压力、气体有效密度。

图2给出了一次试验的压力曲线和其它数据，液体无流动情况下的活塞两侧平均压力比是1.41，基本上与活塞两侧的面积比相同。在全流量情况下这个比率是1.33，这意味着在气体入口阀和液体排出单向阀存在着压降。尽管有这些损失，泵仍有足够的余量使排出的流体进入发生器，然后再来驱动泵（比文献[3]中的泵有很大改进）。泵驱动端入口气体温度达724K（451℃），这使得本试验比文献[3]的试验加热更快（大约2s对4s），这与此处采用轻质气体供应管和较高压力相一致。在图3的试验中，靠热传导冷却的铝部件外壁温度低于380K（107℃）。

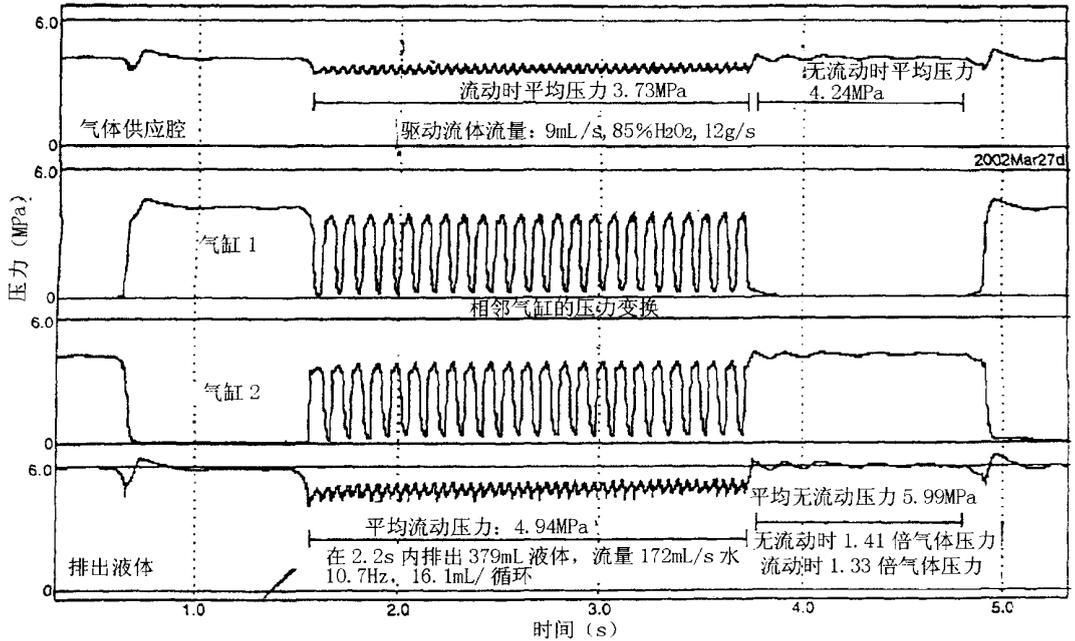


图2 85%过氧化氢分解气体驱动的增压式四联柱塞泵的水流试验

整个运行期间，气体发生器消耗了 31mL 的 85%HTP。其中一些用于最初的空腔充填（主要是 75mL 的气体集合器），后来连同蒸汽凝结水被排空。在无泵循环的试验中，发生器消耗了 11mL 的过氧化氢。这说明 20mL 的 85%HTP 被用于在 4.94MPa 下输送 379mL 水，用于驱动泵的过氧化氢容积仅过总容积的 5%。因为向外传热过程中会产生额外的蒸汽凝结，所以延长试验时间将会减少这一数值。

在活塞行程至末端汽缸处于全充气状态时可以确定气体平均状态。在与前述相同的推进剂密度、活塞面积比条件下，试验数据显示当压力为 3.73MPa 时气体平均容积密度 52g/L (27.4g/530mL)。85%HTP 分解气中氧质量百分比为 40%，即 21g/L。根据很陡的水温度—压力曲线的几次迭代得到此时温度为 460K (187°C)，密度为 21g/L 的氧分压是 2.5MPa，水蒸汽分压是 1.2MPa。它们分压的和即为总压。水蒸汽分子占气相分子的 1/3。

温度为 460K 时饱和蒸汽密度是 6g/L，每升驱动泵的气体中其余的 25g 水蒸气必定会凝结成水，这几乎占气体总质量的一半。令人欣慰的是只需适度提高温度，凝结水就会大大减少。

流经气体发生器的气体流量微 12.5g/s，其中包括 6g/s 凝结水，并释放 12kW 的热量（每对活塞在缸体内运动时产生 6kW 热量），这将会使泵压的 172g/s 水升温 17K。然而，在试验过程中没有发现这么大的温升。很可能是大部分热在排空过程中由于水蒸发带走。

图 3 给出汽缸内各单个压力脉冲曲线，图 4 给出用氢提供动力的一次相似试验。理想情况下，这个脉冲将是方形并有稍许重叠，因此应有近一半时间来从低压贮箱抽水。正如预料，氢气比氧和水蒸气更接近这个理想情况。对于后者，抽水时间受到限制，这限制了泵的最大流量。为了优化性能，吸入、排放阀的设计和时应与驱动流体相配合。通过成倍增大抽水时间，可成倍增大泵流量。

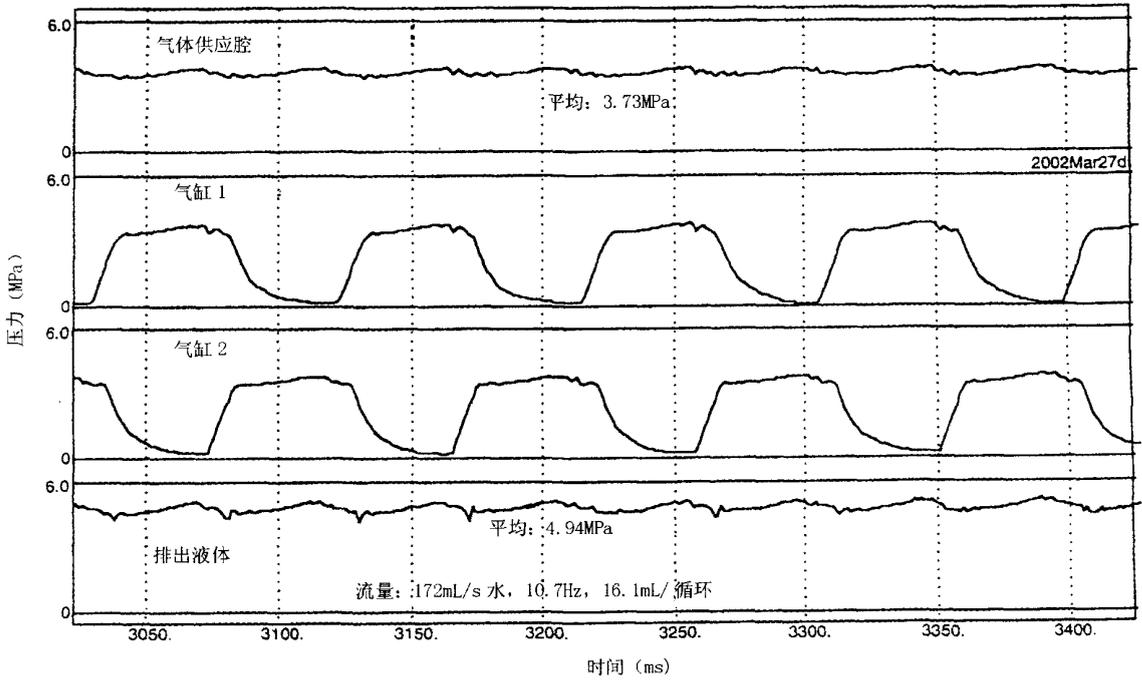


图 3 将图 2 的时间坐标放大的压力试验数据 ($t=3s$ 后)

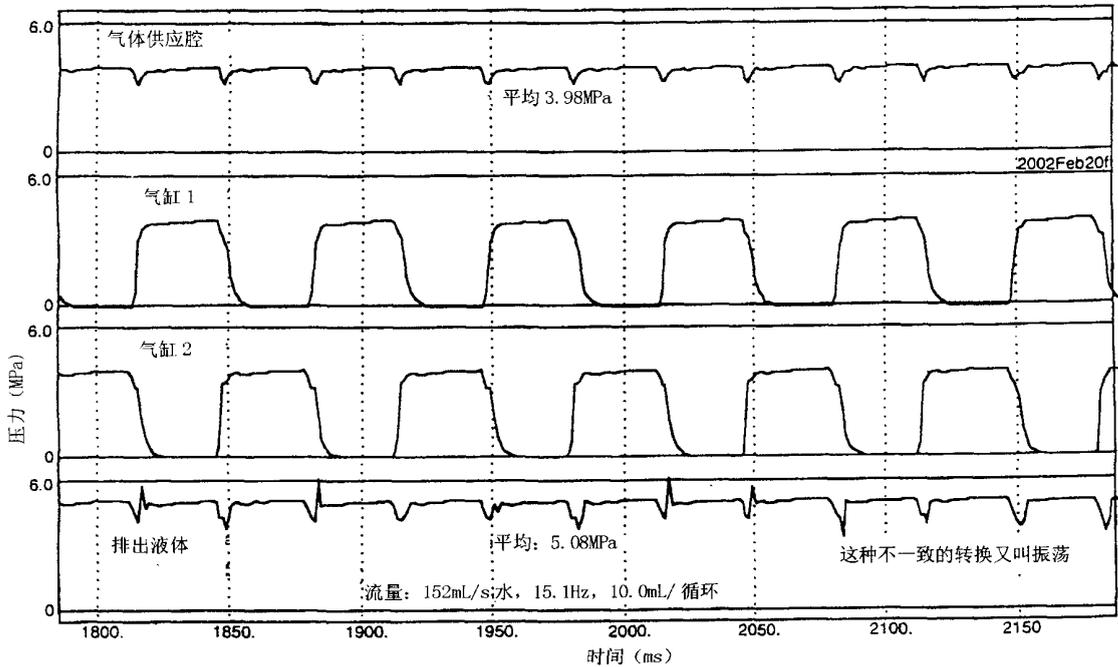


图 4 氮气驱动的水流试验 (与图 3 试验数据对照)

4 单组元气体发生器循环

图5给出了使用这种泵的完整火箭系统简图,对于任何单组元推进剂,只要给定合适相容性材料和包括用在气体发生器的催化剂等,该系统就可以实现。更一般地讲,这个示意图代表了双组元系统的一半。对于气体发生器循环系统来说,重要的一点是泵输出压力必须高于驱动它的气体压力。与气体发生器串联的调节器控制着压力在推力室关闭时不会无休止地放大。

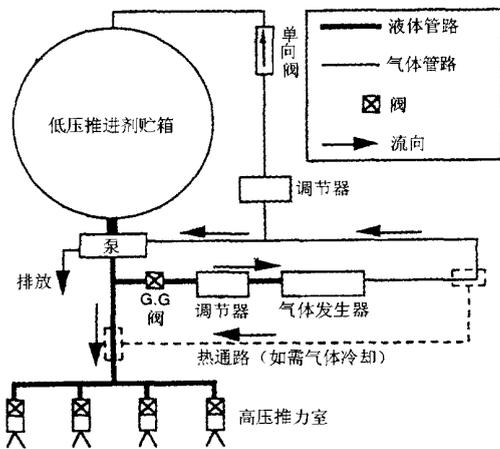


图5 单组元气体发生器循环

当大部分推进剂被泵输送到一个或多个推力室时,剩下的一小部分用于驱动泵工作。因为气体密度的降低可以减少推进剂的需要量,因此理想情况下,气体工作温度要高。泵要直接服从推进系统工作要求,所以设计泵的其它困难是泵重量轻,渗漏要少,体积要小。

目前的HTP试验没有包含图5中的一些部件,没有用来冷却气体的热交换器,贮箱的气体增压系统也没有应用。要注意的是,以下给出的数据是在系统没有连接推力室时获得的。这是为了准确测得输出的推进剂流量而需要减小声学噪音。

图5省略了主要用于试验的气体管线。在试验用推进系统中包含40mL的气体集合器,它作为一安全装置,用来减弱起动时可能发生的压力过击现象,这种现象在第一次试验时曾经出现。气

体集合器比用于泵试验的集合器要小,在对系统的运行有了充分了解和做相应调整后,该气体集合器很可能就不需要了。气体集合器还连接一个防爆板和常开排空阀。

Tescom 调节阀上其余的孔用于安装压力传感器,泵排放口和气体供应管的安装与泵试验时的相同。在所有的试验中,气体的插入式热电耦与紧靠缸体压力测点相邻。

所示的装置被放置在带防护罩的盒子里,盒子又放在带喷淋的容器内,盒子顶端安有数字电子秤。气体集合器也放在喷淋的容器内。为了获得准确的质量数据,与外部相联系的仅是设备线和遥控给贮箱增压的柔性乙烯空气管。后者的远距离排放可使系统回到安全、完全无压的状态。

在多次试验中,系统的质量是在系统每次加载推进剂特定时刻记录的。由此可以得出的数据包括泵输出的总质量、排空流量和泄漏量(在很多情况下都忽略)。另外,每次试验后收集器被移开单独称重。

5 系统试验结果

当完成了系统连接、加注了85%HTP、用空气对贮箱增了压、排空阀关闭、气体发生器阀门打开之后,就可以实现系统组件的起动。开始时虹吸管、泵和其它管线中原有的空气必定会流经气体发生器,因此在加载推进剂后第一次起动需要几秒时间。

图6给出短时间试验的结果。注意,液体初始排出压力等于贮箱压力。在气体发生器供应阀打开后,调节器压力和气体压力在0.8s多一点的时间内依次升高。然后,作用在活塞的气体压力超过贮箱作用在活塞上的压力,并且在活塞的一次行程之内,反作用力的作用下迅速使系统压力达到工作压力。调节器关闭,系统在泵无运动时保压。在这2秒内,调节器提供的压力与泵出口压力相等,从调节器出口到驱动端的损失是可以忽略的。以前,由于气体泄漏到泵,超过10%的调节阀出口压力被损耗掉^{[4][5]}。

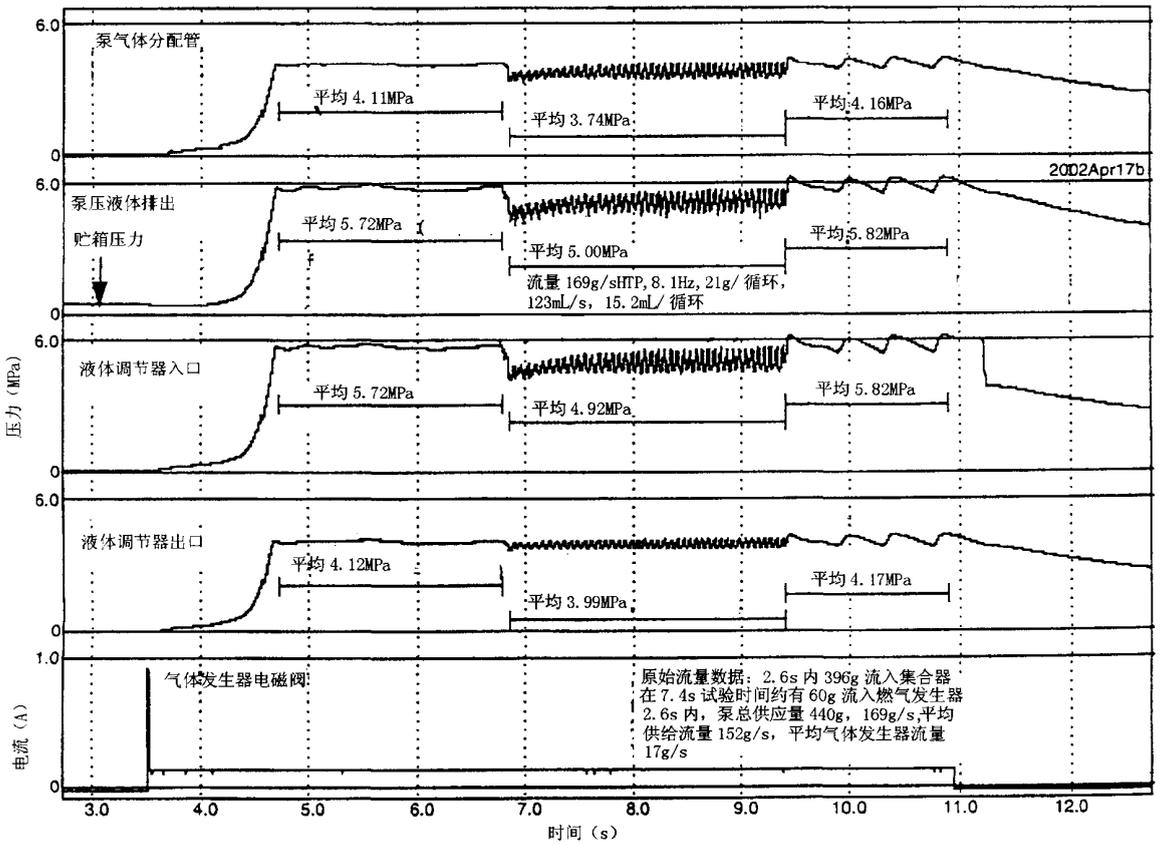


图 6 由箱压自身起、气体发生器循环系统输送高压推进剂的试验

在 $t=6.8s$ 时，推力室控制阀打开。流体开始流动，泵迅速开始工作，但泵平均压力下降。这个下降有两个原因：一是与流体的流动有关；二是泵的瞬时转换同样也会使得平均压力轻微减少，在调节器的出口这个瞬间很小，提高调节器动作，这个损失会进一步减少。考虑到在整个过程中有很大余量，可以采用更小的调节器。另外在气体发生器及其供应阀内的压降是很小的。

推力室阀门关闭后，泵循环减慢。但是压力显示，气体发生器仍有可以忽略的流量。这很可能是某个吸入阀的位置设置的不好，导致泄漏的气体不能被及时排出。当气体发生器阀门关闭后，调节阀的出口压力保持了一段水平，然后正如所预计的压力陡然下降。随后，随着系统的冷却和蒸汽的凝结，所有的压力都逐渐衰减。

图 7 给出了一项推进剂流动时间超过 5 秒的相似的试验曲线，试验中贮箱最后被排空。两次试验中，推进剂开始流动的 0.5s 到 1s 期间，压力降到最低。这是热效应造成的，即在驱动端温度升高前，气体温度越低、密度越大则损失越大。

在图 6、图 7 所示试验中，记录到的最高气体温度分别是 628K (355°C) 和 673K (400°C)，这比图 2 所示泵试验的温度有些低。实际上，相对于泵排出容积流量，气体发生器总耗量却比图 2 试验的高，对此还没有透彻理解，造成这种现象的可能原因似为不明原因导致气体发生器催化剂活性下降。图 7 试验中气体发生器的流量是图 6 试验的 70%，而且对图 2 试验温度的推断发现它们的效率相近。图 7 试验的另一个不同之处是当贮箱推进剂耗尽时，气体发生器回路中的压力相继下降。要注意的是稍后压力有部分恢复的现象。

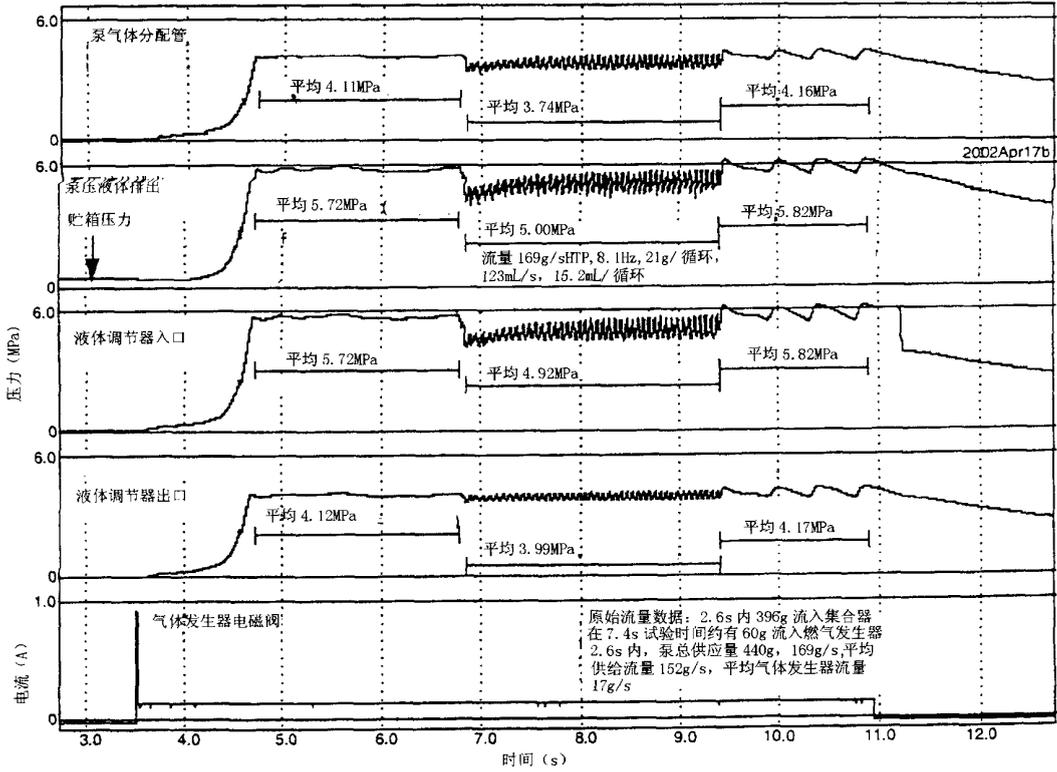


图7 排空贮箱的长程系统试验

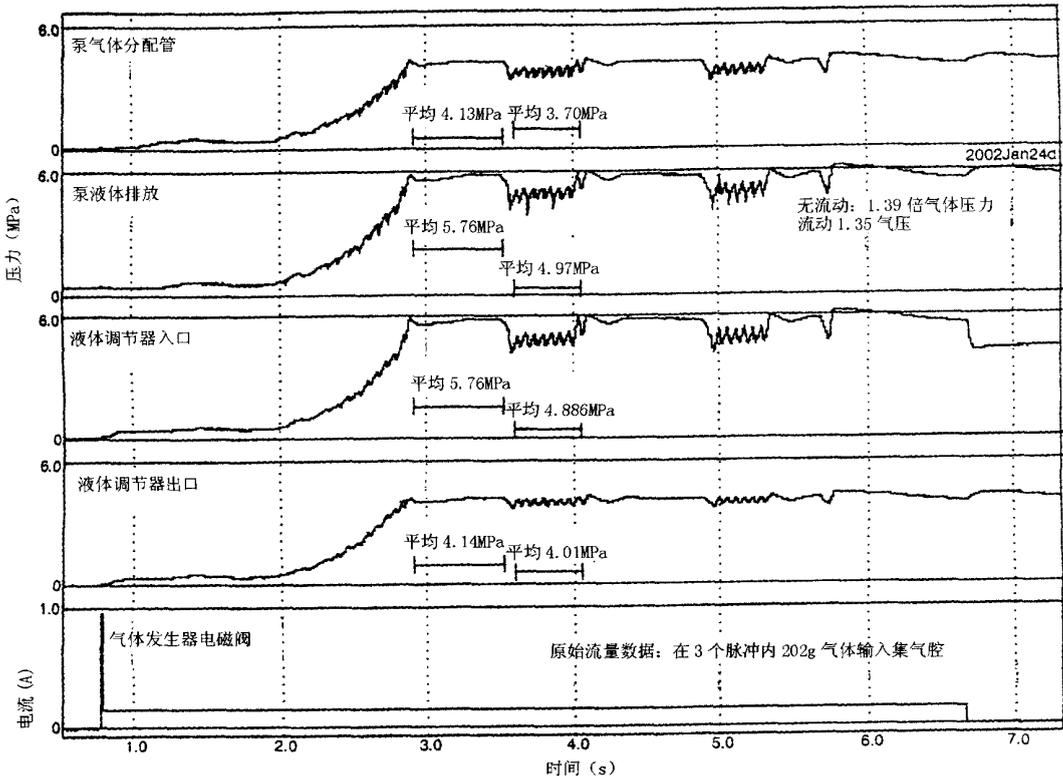


图8 间歇地推进剂供应 (在系统起动期间液体排出阀打开)

图8给出了不正常的试验状态,此试验中系统反应粗糙。由于不明原因系统起动延迟。推进剂输送的前3个脉冲叠加在起动过程。泵循环得很快,压力变化没有象图6、图7的那么陡。

一般来说,经过许多与本文所描述相似的试验后泵的运动件和密封件没有磨损或过热,这些部件不需要重新处理。因此,在硬件许用范围内,系统可在更高温度下工作更长时间。

6 讨论

本文给出了小型化、气体发生器循环、采用柱塞泵的泵压推进剂系统的初步试验结果,这是自从在1993~1994年间^{[2][4][5]}肼试验以来的首次类似试验。这也是这种试验系统第一次成功运用于过氧化氢。所有试验结果与肼试验相近,但消除了气体泄漏。泵硬件的质量大致相同,但更便宜了,这是因为用铝质机加件取代了钛焊接件。然而泵出口流量有所减少,这很可能是由于在吸入-排出阀处存在两相流和在排出阀打开后需要额外时间再蒸发和排空冷凝液。

无毒过氧化氢名副其实,它使得复杂、不易成功系统的试验变得相对容易。最近用试验用推进系统完成的试验次数与小型泵压肼系统曾经做过的试验总数相当。这主要是肼试验需要用专门测试装置,按特定的规程进行,该规程走完需要数天的时间。由于产生的蒸汽有毒,因此试验中不适宜即刻做出调整和重做试验,所以后续试验可能需要等待几个月。

HTP试验使用的低压贮箱非常小且轻,而泵压肼试验使用很重的贮箱设备,这是因为担心有毒的推进剂放在很薄的贮箱会产生不良的后果。另外,分开测量输出流量和气体发生器流量也是不易的。

如果该系统没有采用过氧化氢,而是采用肼,并对该系统进行同样的改进工作,则工作进展可能不会如此顺利。当然,两种推进剂将继续拥有它们各自的优势。后者的一个优点是在泵的驱动端没有凝结现象发生,这将使工作效率较高。

计划进行的下一步工作是对带一个或多个高压HTP推力室的系统进行试验,推力室今年已经由分包商研制。相信现在进行的工作有利于将来可能的应用,其中之一是小型飞行器,它能够把火星地质样本运送至返回地球的轨道上。

参考文献:

- [1] Whitehead J C, Brewster G T. High Pressure Pumped Hydrazine for Mars Sample Return. *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.37.No.4,pp.532-538, July 2000.
- [2] Whitehead J C, Pittenger L C, Colella N J. Design and Flight Testing of a Reciprocating Pump Fed Rocket. AIAA 94-3031,1994.
- [3] Whitehead J C. Test Results for a Reciprocating Pump Powered by Decomposed Hydrogen Peroxide. AIAA 2001-3839, July 2001.
- [4] Maybee J C, Swink D G, Whitehead J C. Updated Test Results of a Pumped Monopropellant Propulsion System. JANNAP Propulsion Meeting Proceedings, CPLA Pub.602 Vol.1, p.131, November 1993.
- [5] Frei T E, Maybee J C, Whitehead J C. Recent Test Results of a Warm Gas Pumped Monopropellant Propulsion System. AIAA94-3393,1994.