

低温气液分离器水击振动实验研究

刘海飞, 刘照智, 张雷杰, 黄福友

(北京航天发射技术研究所, 北京, 100076, Email: hf_liou@163.com)

摘要: 低温气液分离器在未完全预冷情况下打开排气阀排气时, 易于引起低温液体填充低温气-液分离器的水击振动现象。本文优化设计了低温气-液分离器防水击振动装置, 开展了低温气-液分离器内的液氮填充水击振动实验, 以及防水击振动测试, 实验结果表明所设计的防水击装置可有效抑制低温气液分离器内水击振动的发生, 保障了液氮管路输送系统的安全稳定工作。

关键词: 低温气-液分离器; 水击振动; 节流装置; 实验

1 引言

液氮管路输送系统是低温氮气舞台特效的主要设备之一, 为了达到理想的液氮制雾效果, 液氮进入低温雾机之前需要利用低温气液分离器对管路中流体进行气-液分离。由于液氮的沸点极低(常压下为 -196°C), 在系统运行前, 需要对管路等设备进行充分预冷, 而如果低温设备未得到预冷, 则液氮进入管路系统后将发生剧烈汽化, 进而诱发管路系统出现不稳定振动, 甚至出现低温液体填充水击振动现象, 从而严重危害低温管路系统的安全和稳定运行。

低温管路系统中发生水击振动事故在国内外均有发生过, 如美国土星 5 号液氧加注系统由于水击导致了管路突然断裂和接头损坏^[1]; 俄罗斯低温加注系统也出现了由于水击而导致的气动阀门固定杆断裂、壳体破裂、波纹管变形和容器封头损坏等事故^[2]; 国内在液氢加注过程中也曾发生过水击造成管路法兰连接处漏液现象^[3]。为此, 国内外学者对低温管路中的水击振动问题开展了相关的理论研究^[4-6], 然而从实验上研究低温液体填充过程发生的水击振动问题却较少。本文主要从实验上研究液氮填充低温气液分离器的水击振动现象, 并设计防水击振动装置, 实验研究抑制水击振动的效果, 为低温管路系统工程应用提供理论参考。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602014)资助。

作者简介: 刘海飞(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事低温加注系统及设备的研究设计工作。

2 实验系统及实验装置

2.1 实验系统

实验流程如图1所示，实验系统主要由立式液氮贮罐（ $20\text{m}^3/1.27\text{MPa}$ ）、低温气液分离器、低温绝热管路、低温截止阀（V1、V2）、低温电磁阀（V3）以及数据采集系统等组成。实验管路由13m长的水平管段和垂直管段组成，垂直段用于安装低温气液分离器，主管路预冷排气口高度为0.7m，低温气液分离器入口高度约为1.6m。低温气液分离器为立式圆柱形不锈钢筒，实物如图2所示，圆筒内径为0.15m、高度为0.34m，外部采用聚氨酯发泡绝热保温，筒体上端连接低温电磁阀排放管路。低温气-液分离器基于内部设置的T上、T下温度监测传感器控制电磁阀的启闭，以达到排气的目的。

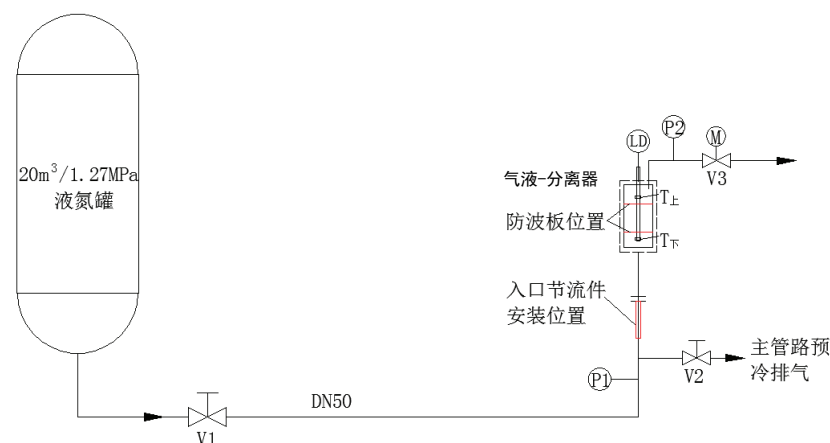


图1 实验系统流程



图2 现场实验装置照片

2.2 实验装置

为了消除低温气液分离器内的水击振动，设计了两种防水击振动装置（图3），分别是低温气液分离器的入口节流件和内部防波板，安装位置如图1所示。图3(a)节流件的主要结构特点为在入口管壁面上设置了上、下两排限流孔，下排限流孔主要用于限制液体快速充填气液分离器内部气腔，上排限流孔用于疏导管内积存的气体进入气液分离器，能及时得到分离；图3(b)防波板设置在低温气液分离器内部，共设置了上、下两层防波板，主要用于限制流体介质进入低温气液分离器后直接冲撞顶部而产生振动。防水击装置安装位置如图1所示。

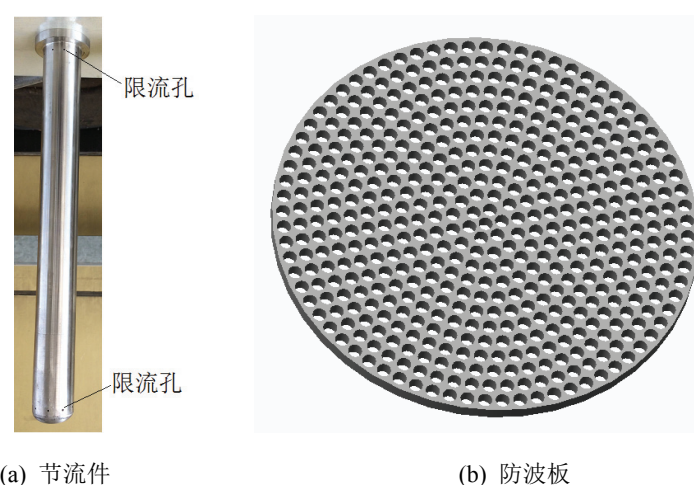


图3 低温气液分离器防水击振动装置

3 实验结果及分析

3.1 气液分离器水击振动实验

模拟低温气液分离器在未完全预冷情况下，开启排气电磁阀后液氮填充气液分离器而发生的水击振动现象。实验过程中液氮贮罐压力约为1.0MPa，主管路通过开启排放截止阀进行预冷，当排放口出液时完成预冷，然后打开气液分离器排气电磁阀，诱生水击振动。

图4为开启低温气液分离器排气电磁阀的压力变化曲线。从图4可以看出，在排气电磁阀开启前气液分离器排气管路上的压力 P_2 与主管路中的压力相当，当排气电磁阀开启后，气液分离器内的气体外排，压力迅速下降，由1.0MPa降低到约0.3MPa，此后在排气约3s后，压力再次下降到约0.12MPa，随后出现压力急剧升高。从主管路上的压力 P_1 曲线上看，在气液分离器排气电磁阀开启时管路 P_1 处保持为系统压力，当电磁阀打开约3s后， P_1 开始出现下降，并随后压力急剧上升，压力峰值达到了3.26MPa。从实验现象可看到，在开启气液分

离器的排气电磁阀排气约3s后，低温气液分离器发生强烈振动，同时排气口处喷出小股液氮，然后持续排出液氮。

这是因为低温气液分离器未经预冷，内部气体及本体结构处于热态，当开启排气电磁阀时，气液分离器内热态的气体排出，表现为 P_2 压力第一次骤然下降，随之主管路中的液氮填充进入气液分离器内腔，低温液氮与热态的气体在气液分离器内发生传热、传质作用，液氮的冷量促使热气腔中的气体发生冷凝，使得压力降低，即 P_1 出现压力下降和 P_2 第二次下降。此后，液氮在气液分离器顶部产生急剧制动，发生水击冲击，压力在短时间内升到最高值，此时液氮充满仍处于热态的气液分离器。在气液分离器内腔壁面与液氮的换热作用下，排放口中的流体处于气液两相流状态，故此时排放口的流体以一股气体、一股液体的顺序向外排出，表现为压力 P_2 值为不断波动的压力曲线，而发生水击后的增压波在管路内传递过程中，逐渐发生衰减，因此 P_1 曲线产生振荡。

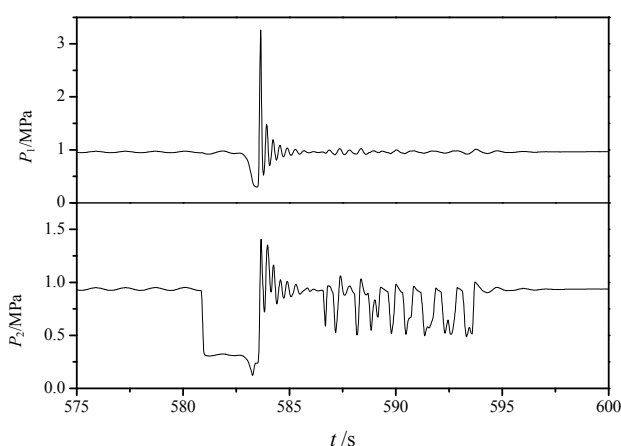


图4 低温气液分离器内液氮填充水击压力曲线

3.2 气液分离器水击预防措施

从水击产生的机理来看，当液氮填充气液分离器的热气腔时，对热氮气传热冷凝，液氮快速充填后发生急速制动，产生水击。因此，可从减缓液氮充填速度上分析预防水击的效果。实验中考虑了在发生水击的低温气液分离器入口管中增设节流件和气液分离器中增加防波板两种抑制水击的措施。

3.2.1 入口处增设节流件

如图1所示在低温气液分离器入口处安装节流件（无内置防波板），实验操作流程与水击振动过程保持一致。

图5给出了入口安装节流件后压力变化曲线。从图5可以看出，安装节流件后的压力变化与上节未安装节流件的压力变化有所不同。实验中开启低温气液分离器排气电磁阀时， P_2 压力从1.0MPa降低至0.4MPa，随后维持不变，直至排气约16s后控制系统关闭电磁阀，

P_2 压力恢复至约1.0MPa，而主管路压力 P_1 在排气电磁阀打开、关闭动作期间，除了发生一定的小扰动变化外，主管路压力维持实验系统的压力。从实验现场现象记录上也可得出，在低温气液分离器安装入口节流件后，打开排气电磁阀时气液分离器和管路均无振动发生。这说明了入口节流件能较好地消除低温气液分离器水击振动。这主要在于入口节流件的结构特点是减缓液体进入气液分离器的速度，即当打开气液分离器排气电磁阀时，分离器腔体内的气体排出，液体通过节流件限流孔补充到分离器腔体内，由于限流孔流通面积较小，液氮不能快速填充分离器，而小流量的液氮填充进分离器后，其携带的冷量也较少，液氮在与气液分离器壁面及内部气体换热作用下，液氮发生汽化蒸发，而不是气液分离器内的热氮气发生冷凝。因此，小流量液氮对气液分离器起到了预冷效果，从而抑制了水击现象的发生。

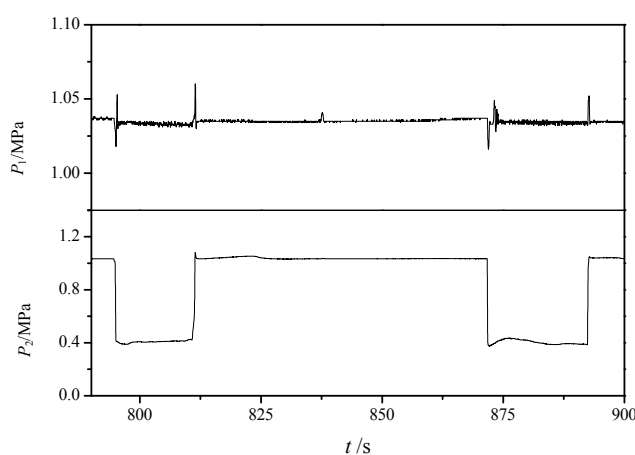


图5 入口节流件对液氮充填过程的影响

3.2.2 内置防波板

如图1所示在低温气液分离器内部设置两层防波板（无入口节流件），实验操作流程与水击振动过程保持一致。

液氮从主管路充填进气液分离器后，由于气液分离器腔体内无其他流向改变装置，液氮将直接冲击气液分离器的顶部。因此，该部分实验旨在通过改变气液分离器内部结构，增设两层防波板，改变液氮填充进气液分离器后的流动方向和减缓冲击顶部的速度。

图6给出了低温气液分离器内安装防波板后压力变化曲线。从压力曲线上可知，在低温气液分离器内设置防波板后压力变化趋势与入口安装节流件的压力变化基本相同。实验中开启排气电磁阀后， P_2 压力从0.84MPa降低至0.68MPa，随后保持小幅度波动；当排气电磁阀关闭后， P_2 压力恢复至约0.84MPa；主管路压力 P_1 在排气电磁阀动作瞬间存在一个开阀和关阀水击压力，然而该压力变化值对整个管系的振动影响非常小，而在排气过程中， P_1 基本维持在小幅值波动。此外，从实验现象记录上也可得知，当开启气液分离器排气电磁阀时，排放口首先排放低温气体，然后排出低温液体，整个管路系统处于稳定状态，没有发

生水击振动。这也说明了低温气液分离器内设防波板可有效抑制水击的发生。采用相同的方法,经过多次实验验证,在该工况下低温气液分离器均不发生水击振动。

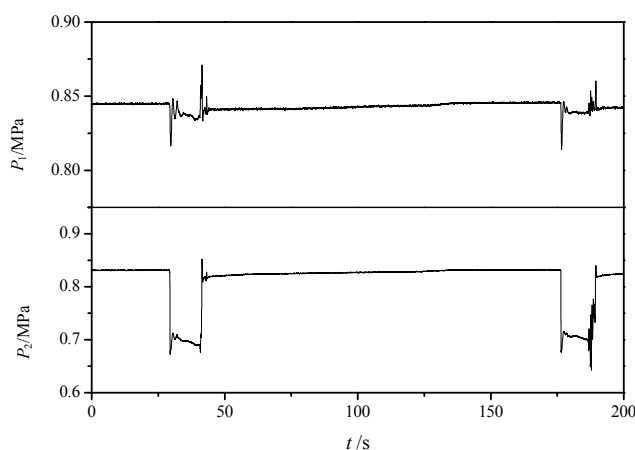


图6 防波板对液氮填充的影响

4 结论

本文通过实验方法诱发了低温气液分离器中液氮填充水击振动,并设计了防水击振动装置。实验结果表明,当低温气液分离器处于热态时,液氮从主管路对低温气液分离器的填充易于发生剧烈的水击振动,而当低温气液分离器完全冷却时,液氮填充低温气液分离器较为稳定;低温气液分离器的入口处增设节流件和内置防波板,可有效抑制低温气液分离器内液氮填充水击振动,有利于低温管路系统稳定安全运行。

参考文献

- 1 Moore W I, Arnold R J. 土星V的液氧加注故障[J]. 导弹与航天运载技术, 1979, 2:69-74.
- 2 尼·瓦·菲林, 亚·波·布拉诺夫. 液体的低温系统[M]. 北京:低温工程编辑部, 1993.
- 3 刘照智, 丁鹏飞, 田青亚. 液氢加注系统水击问题数值分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2010, 4:10-12.
- 4 Renaud Lecourt, Johan Steelant. Experimental investigation of waterhammer in simplified feed lines of satellite propulsion systems[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(6): 1214-1224.
- 5 Alok Majumdar, Todd Steadman. Numerical modeling of thermofluid transients during chilldown of cryogenic transfer lines[C]. //SAE Technical Papers, 2003:1-16.
- 6 程谋森, 刘昆, 张育林. 低温推进剂供应管路预冷充填瞬变流计算[J]. 推进技术, 2000, 21(5):38-41.

Experimental study on water hammer in cryogenic gas-liquid separator

LIU Hai-fei, LIU Zhao-zhi, ZHANG Lei-jie, HUANG Fu-you

(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, Email:hf_liou@163.com)

Abstract: The water hammer phenomenon will be induced by the cryogenic liquid filling the separator, when the cryogenic gas-liquid separator is not precooled and the exhaust electromagnetic valve is open. In this paper the throttling devices are designed to avoid water hammer phenomenon in the cryogenic gas-liquid separator, and water hammer experiments are studied. The experimental results show that when the cryogenic gas-liquid separator is in hot state, the cryogenic liquid filling water hammer will be induced by exhausting from the top of separator; the throttling device, such as the throttle and the wave board, can effectively suppress water hammer vibration.

Key words: Cryogenic gas-liquid separator; Water hammer; Throttling device; Experiment.