

管路复合环境试验风险评估与预防措施 技术研究

逯志国, 江雅婷, 卫国

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 增强新一代运载火箭液体推进剂增压及输送管路低温振动试验的风险抵抗能力, 降低风险发生概率, 提升管路在低温+内压+振动等复合环境试验的有效性及安全性。**方法** 以项目风险管理相关知识为理论基础, 分解试验系统各组成部分的风险因素, 并加以辨识, 评估各风险因素的危害成因及危害后果, 在此分析的基础上, 提出有效降低风险的改进方法与措施。**结果** 通过风险的辨识、评估及预防方法与措施, 在满足试验需求的基础上优化了试验系统, 加强了应对此类试验风险的能力, 对试验设备进行了有效改进, 降低了风险发生概率, 为新一代运载火箭增压输送管路地面复合环境试验的成功奠定了坚实的基础。**结论** 对风险管理在新一代运载火箭增压管路环境模拟试验中的应用进行了研究, 风险控制可以有效地降低试验中存在的各种风险的发生概率, 包括风险的辨识、分析及项目的风险管理, 不仅可以对人员、设备及产品的安全性提供更可靠的保障, 也可以提升环境模拟试验的效率。

关键词: 管路; 复合环境试验; 风险分析; 风险评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.010

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0061-06

Technical Study on Risk Assessment and Preventive Measures for Pipeline Composite Environmental Test

LU Zhi-guo, JIANG Ya-ting, WEI Guo

(Beijing Institute of Strength & Environment Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: **Objective** To enhance the risk resistance of the new generation of launch vehicle liquid propellant pressurization and low-temperature vibration test of the pipeline, reduce risks, and improve the effectiveness and safety of the pipeline in low temperature + internal pressure + vibration and other composite environmental tests. **Methods** Based on the knowledge of project risk management, the risk factors of each component of the test system were decomposed and identified; and the hazard causes and harmful consequences of each risk factor were evaluated. Based on the analysis, methods and measures for effectively reducing risks were proposed. **Results** Through the identification of risks, risk assessment and risk prevention methods and measures, the test system was optimized on the basis of meeting the test requirements; and the ability to cope with such test risks was strengthened to effectively improve the test equipment and reduce the probability of occurrence of risks. It laid a solid foundation for successful ground-based composite environment test of the new generation of launch vehicle pressurized pipelines. **Conclusion** The application of risk management in the environmental simulation test of a new generation of launch vehicle booster pipelines is studied. Risk control can effectively reduce the probability of various risks in the test, including risk identification and analysis of risks and risk management of project. It can not only provide more reliable protection for the safety

of personnel, equipment and products, but also improve the efficiency of environmental simulation tests.

KEY WORDS: Pipeline; composite environmental test; risk analysis; risk assessment

与传统的运载火箭推进剂相比,新一代运载火箭采用了液氢/液氧作为发动机燃料,具有无污染、无毒性、燃烧充分、推力大等优点。目前,液氢/液氧推进剂也成为了世界各航天大国新型运载火箭的首选燃料^[1-2]。为了使燃料快速、高效地输送,箭体内在燃料储箱与发动机间布置了功能不同的各式连接管路,管路在飞行过程中处于低温高压及振动状态。这种复合环境对管路的强度和可靠性提出了严峻的考验,一旦燃料泄漏,则意味着发射的失败。因此,必须进行有效的地面试验,充分模拟实际工作状态,在试验中充分暴露产品设计或生产的缺陷,为提高产品质量提供有力的数据支撑,确保新型火箭的成功研制。

液氢、液氧温度分别为 20 K (−253 °C)、80 K (−193 °C) 左右^[3-4],对于工作压力高达 13.5 MPa 的某型增压管路振动试验的环境模拟,在之前的运载火箭型号研制中尚属于空白。在确定以液氮、高压氮气作为管路工作环境的模拟介质后,试验过程中存在着低温液体泄漏、高压爆炸冲击等风险就成为了首要的关注重点。

1 管理复合环境试验风险的特征

1.1 风险定义

1901年,美国学者威雷特在其博士学位论文《风险与保险的经济理论》中最早给出风险的定义:风险是关于不愿发生的事件发生的不确定的客观体现。在这个定义中,风险有两个特征:客观性和不确定性^[5]。

对于试验风险,本身是由整个试验系统的特点来决定的,整个系统中包括了试验设备、试验人员、试验程序。风险的客观性体现在试验设备本身在运行工作中可能带来的各类风险,试验人员在按照已设定的试验程序进行试验操作时可能产生的风险。不确定性体现在风险在试验过程中出现的时刻、危害的程度及造成的影响后果。

1.2 试验风险性质的判别

管路复合环境试验存在以下四类事件:一类事件是“高可能性,严重后果”;二类事件是“高可能性,轻微后果”;三类事件是“低可能性,严重后果”;四类事件是“低可能性,轻微后果”。对于这四类事件,一类和三类属于高风险,二类和四类属于低风险。

1.3 试验风险管理

威廉姆斯和汉斯合著的《风险管理与保险》把风

险管理定义为:根据组织的目标或目的,以最少费用,通过风险识别、测定处理及风险控制技术把风险带来的不利影响降低到最低程度的科学管理。风险管理是通过对风险进行识别、衡量和控制,以最小的成本使风险损失达到最低的管理活动。理想的风险管理,是一连串排好优先次序的过程,使当中可以引致最大损失及最可能发生的事情优先处理,而相对风险较低的事情则压后处理^[5]。

2 复合环境下管路振动试验风险管理

试验风险管理就是试验项目管理人员通过风险辨识、风险评估等,并以此为基础,合理地使用多种管理方法、技术和手段,对项目活动所涉及的风险实行有效的控制,采取主动行动,创造条件,尽量扩大风险事件的有利结果,妥善地处理风险事件的不利后果,以最小的成本,保证安全、可靠地实现试验项目顺利进行的过程。

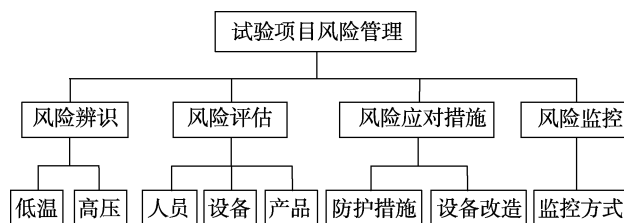


图1 试验项目风险管理

风险的预测,包括了对于环境模拟试验中低温、高压环境会产生风险进行前期的预先判断,并根据预测结果,进行风险的评估。主要针对人员、设备及试验产品安全这三个要素进行,评估风险对于人员、设备及产品产生的最不利影响,后续根据影响的严重程度,从防护措施及设备改造升级方面降低试验风险。在试验的过程中,对风险进行不间断地监控,包括存在破坏性风险情况下应进行监控方式的转变,进而保证人员的安全性。

2.1 试验流程简介

将待试验管路安装在振动台台面,液氮加注管路 P1 将液氮贮存灌的截止阀与管路一端连接,管路另一端通过液氮加注管路 P2 与稳压器连接。高压氮气瓶阀门通过充压软管与稳压器连接,稳压器通过排气管路与手动排气阀连接,并通过电缆与地面控制柜连接。系统连接完毕后,打开稳压器上的放气阀和液氮罐上的单向阀,液氮将通过自增压的方式进行加注,从液氮罐中逐渐流入试验管路,进而流入稳压器中。

通过控制箱观察稳压器中的温度传感器，当温度传感器显示温度达到 $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，稳压器中加满液氮。然后关闭液氮罐上的单向阀，停止液氮加注。打开氮气瓶，持续加入氮气对管路进行增压。当管路压力及温度满足试验要求时，打开振动台功率放大器，并调节增益，进行振动试验，如图 2 所示。

2.2 试验系统风险辨识

如图 3 所示，系统的主要风险为低温、高压、失稳坠落及噪声伤害四点。风险的主要来源为液氮贮存罐、稳压器、各种连接管路、连接法兰盘、试验件、高压气瓶、产品及设备安装支撑系统及振动台。

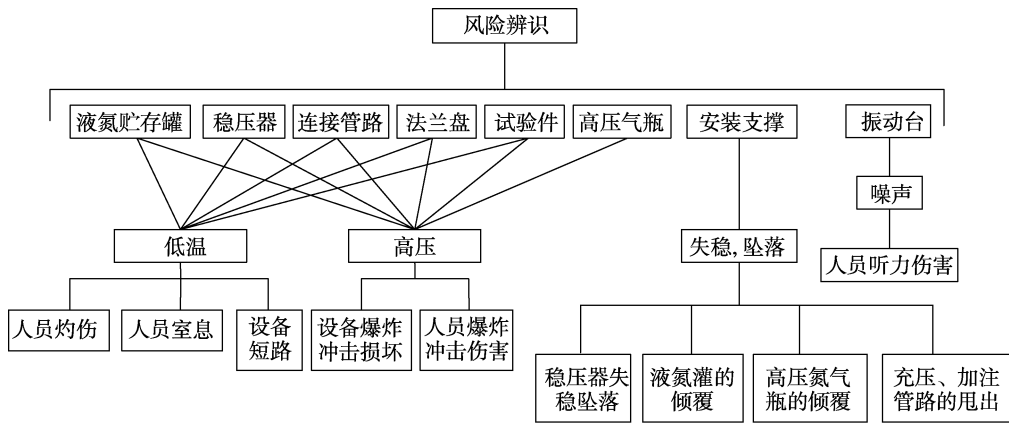
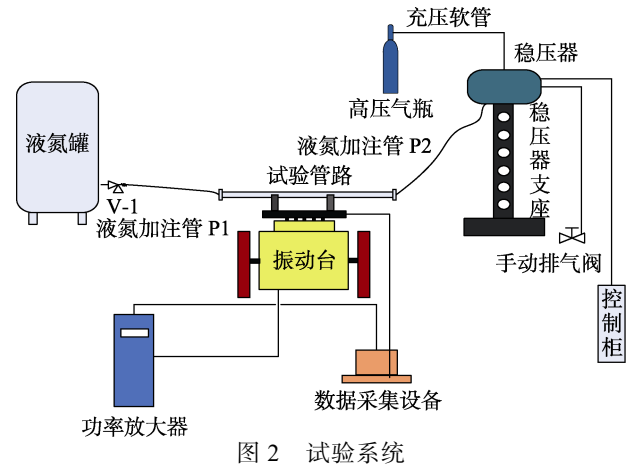


图 3 试验系统风险辨识

2.3 试验系统风险分析评估

2.3.1 风险分析

液氮贮存罐风险主要包括了外部环境影响、质量影响及人为因素，见表 1。

稳压器作为液氮加注时的回流贮存罐，与液氮贮存罐具有类似的特征。加注时，稳压器底部管道接口处液氮的滴落；高压状态下，稳压器上部各种阀门及接口的泄露，碎片冲击。高压气瓶风险主要包括运输风险、贮存风险和使用风险，见表 2。

振动试验设备风险主要包括噪声风险、设备故障风险，见表 3。

连接管路风险主要包括液氮泄露、碎片的爆炸冲击，见表 4。

试验工位风险主要包括搭建的固定支架的失稳风险，吊装风险，见表 5。

2.3.2 风险评估

1) 人员窒息。主要原因是室内封闭环境或通风不顺畅的情况下，由于液氮本身的挥发性使室内空气中氧气含量急剧下降，进而造成试验人员窒息，严重危害人员身心健康及生命安全。液氮喷射，主要因为液氮贮存容器泄露、连接管路发生断裂、试验管路裂纹及法兰盘密封性能降低而发生。其影响范围半径约

为 0.8 m，对附近人员产生灼伤伤害，对仪器设备产生短路及低温破坏。

2) 高压爆炸冲击。产生的主要原因为：在加注系统或试验管路局部应力集中、强度降低；法兰盘连接处密封性能下降使其局部压力增加；液氮挥发较快，致使系统或管路内压力瞬间增高。其主要影响是冲击波的二次伤害，包括碎片残渣、紧固件等，对人员安全及设备安全造成极大的破坏。

3) 温度、压力参数不可控。温度及压力是高压低温管路环境模拟真实度的重要参数。其产生的主要原因为：设备局部设计不合理；系统及管路的保温措施不完善；温度及压力传感器的布局不合理等。其主要影响是地面环境模拟试验的精度下降，管路环境试验过考核或欠考核，进而影响试验有效性。

4) 试验进度延误。其产生的主要原因为：原有设备的设计能力无法满足高压低温管路的试验需要，试验过程中因加注设备的能力制约，导致试验进度的不断顺延。影响研制任务。

2.4 试验风险应对措施

试验风险应对措施就是试验项目管理人员通过风险辨识、分析和评估，以此为基础，合理地使用多种管理方法、技术和手段，对试验项目所涉及的风险

表 1 液氮贮存罐风险分析^[6]

外部 环境 因素		液氮是在空气压缩冷却制成, 气化时能恢复为高温 氮气每升液氮气化, 温度上升 15 ℃, 体积膨胀 高压 约为 180 倍。当外部温度压力超出罐体应承受的 冷却温度和压力时, 就会发生爆炸
	碰撞 振动	液氮容器罐体有专项防震设计, 除静置贮存外, 还可在充装状态下运输使用但液氮罐体在受到 剧烈碰撞和震动后, 会引起保温层或其他部件 破损, 外部环境直接影响气化物, 造成爆炸
	密封 老化, 通风 不良	如果液氮使用和贮存环境通风不好, 会引起室内 氮气和一氧化氮气体含量浓度积聚不散, 达到 爆炸极限, 从而引发爆炸
质量 因素	选材 不当	液氮容器罐体一般采用纯铝箔和不锈钢冷轧 钢板制作, 如果这些重要材料的规格和质量不 符合规范标准要求, 达不到冷冻液氮的承受条 件, 则极有可能发生爆炸
	保温 性能 差	液氮贮存罐由双胆组成, 内胆外表缠绕着多层 绝热体, 一旦反射材料与隔热材料脱落, 就会 造成相邻反射材料与外胆直接接触, 使内胆的 液氮迅速膨胀气化, 直至发生爆炸
人为 因素	附件 老化	在长期使用过程中, 如果对液氮罐的阀门、仪 表等附件不注意经常检修和更换, 一旦这些附 件陈旧老化, 就会造成温度升高或液氮泄漏, 发生爆炸
	贮运 不当	液氮贮存种类一般可分为贮存罐和运输罐两 种, 贮存罐主要用于室内液氮的静置贮存, 不 宜在工作状态下作远距离运输使用
	使用 不当	在操作液氮罐时, 如果未将排气阀打开或打开 程度不够, 液氮经过长时间的蒸发后, 内胆 压力值过高此时若没有安全保护装置, 压力 持续升高, 就有可能导致增压管底部接管原有 缺陷处开裂一旦液氮渗漏到夹层空间后气化, 夹层压力迅速升高, 就会导致外筒体爆炸

表 2 高压气瓶风险分析

运输风险	运输过程中在受到剧烈碰撞和震动后, 会引 起气瓶阀门或瓶体的局部破损, 瞬间压力外 泄, 造成爆炸
贮存风险	由于贮存地点及放置方式的错误, 会是瓶内 压缩气体压力值超限产生危险
使用风险	使用中的操作不当, 固定不牢, 连接管路阀 门密封性不好, 造成风险

表 3 振动试验设备风险分析

噪声风险	试验过程中产生较大的设备运转产生的噪声
设备故障风险	由于试验管路或连接管路内的液氮泄露造 成振动台, 功率放大器等设备的瞬间低温短 路, 爆炸冲击碎片对于设备的冲击破坏, 试 验管路低温传递至振动台动圈

表 4 连接管路风险分析

液氮泄露风险	连接管路局部破损、法兰盘密封失效 造成液氮泄露
碎片的爆炸冲击	由于加注管路及充压管路在爆炸冲 击下, 碎片及管路甩出造成人员受伤 及设备损坏

表 5 试验工位风险分析

固定支座失稳风险	临时作为支撑构件在基础不稳定 造成的风险
吊装风险	吊装作业时, 被吊装物品坠落对人 员及设备产生损坏

实行有效的控制。采取主动行动, 创造条件, 尽量扩大风险事件的有利结果, 妥善地处理风险事件的不利后果, 以最小的成本, 保证安全、可靠地实现试验项目, 顺利进行所采取的应对措施。根据 2.3 节所述, 在通过调研及技术研究的基础上, 分别对风险源进行了有效的应对措施。

液氮贮存罐风险应对措施见表 6。

表 6 液氮贮存罐风险应对措施

外部 环境 因素	高温高压	液氮罐要存放在通风良好的阴凉处, 不能 在太阳光下直晒, 避免接触高温物品
	碰撞振动	实现放置位置的固定, 设置警戒线, 并 与其它物品保持有效距离
	密封老化 通风不良	启用前应对附属阀门、压力表、温度表等 进行有效性检查, 及时更换老化密封圈, 保证其存放处的通风良好
质量 因素	选材不当	贮存罐应由正规厂家生产其具备完成的出 厂说明及相关安全证书, 其附件及容器的
	保温性能 差	压力仪表应定期送计量检定机构检验
人为 因素	附件老化	
	贮运不当	安全管理人员和设备作业人员应接受必要 的安全培训, 熟悉有关安全生产规章制度 和安全操作规程, 具备必要的安全生产知 识, 掌握本岗位的安全操作技能, 增强预 防事故、控制危害和应急处理能力

稳压器的风险应对措施除表 6 所列外, 操作人员在试验操作时还必须佩戴安全防护服及安全帽; 试验前对稳压器系统检查, 及时更换密封垫, 对安全阀进行紧固; 对稳压器引出各种管路进行绑扎固定, 防止甩出; 对超高压试验时, 人员应撤离至安全区域内。

高压气瓶风险应对措施见表 7。

表 7 高压气瓶风险应对措施

运输风险应对	专人负责; 运输工具有明显安全标志; 运输 时人员必须佩戴安全帽
贮存风险应对	通风干燥, 避免阳光直射; 不得靠近热源; 采取防倾倒措施; 设立警告标识牌
使用风险应对	使用前进行安全检查; 使用中严禁敲击碰 撞; 使用中设立安全警戒线; 对减压阀进行 定期标定; 对充压管路进行固定绑扎

振动试验设备风险应对措施见表 8。

表 8 振动试验设备风险应对措施	
噪声风险	试验过程中人员应撤离至隔音控制间内进行操作
设备故障风险	对振动台台体、功率放大器进行防液氮喷射防护 ^[8]

连接管路风险应对措施见表 9。

表 9 连接管路风险应对措施	
液氮泄露风险	连接管路在启用前进行常温低压测试，使用专用侧漏仪进行检查
碎片的爆炸冲击	对管路进行多点的绑扎，并搭建防爆隔离网。

试验工位风险主要包括搭建的固定支座的失稳风险，吊装风险，见表 10。

表 10 试验工位风险分析	
固定支座失稳风险	在进过承载力设计计算后进行固定支座搭建，搭建所用铸块进场前进行严格的质量检查 ^[9]
吊装风险	吊装作业时，工作人员应佩戴安全帽，作业范围内严禁人员站立

为确保试验过程中人员的安全，试验开始后，进

行清场，非操作人员不得进入试验区域。划定半径为安全距离的危险区，系统增压后，所有人员不得靠近液氮设备，不得进入危险区。人员操作时应穿戴防护服，需要靠近管路时，佩戴头盔，携带盾牌等。试验中佩戴氧气浓度检测仪，保证试验场地通风顺畅。

对于高压爆炸冲击的应对措施，改进了工位的安全防护措施，设计了双层防爆隔离网如图 4 中虚线所框范围。将存在低温、高压等风险的试验设备放置在隔离网中，可以有效降低爆炸冲击以及低温对于人员与其他设备的伤害^[10]。

改进了低温充压设备，将低温液体加注与充压进行了分离，在试验中减少了稳压器内部压力值，使稳压器附属的电磁阀、压力表、温度表、连接管路等部件承受压力值大大降低。将高压氮气瓶直接与试验管路连接，并对其进行充压，降低了发生高压爆炸冲击的风险。

图 4 为技术改造后的试验系统。在进行管路液氮加注时，关闭低温电磁阀 V2 和低温电磁阀 V1。当管路及稳压器内为满液氮状态时，关闭低温截止阀 V1 与低温截止阀 V3，与此同时，打开低温电磁阀 V2 与 V1，通过高压气瓶对管路进行充压。在转接三通 S1 和 S2 处分别设置了温度传感器与压力传感器，实现对于系统的远程监控。

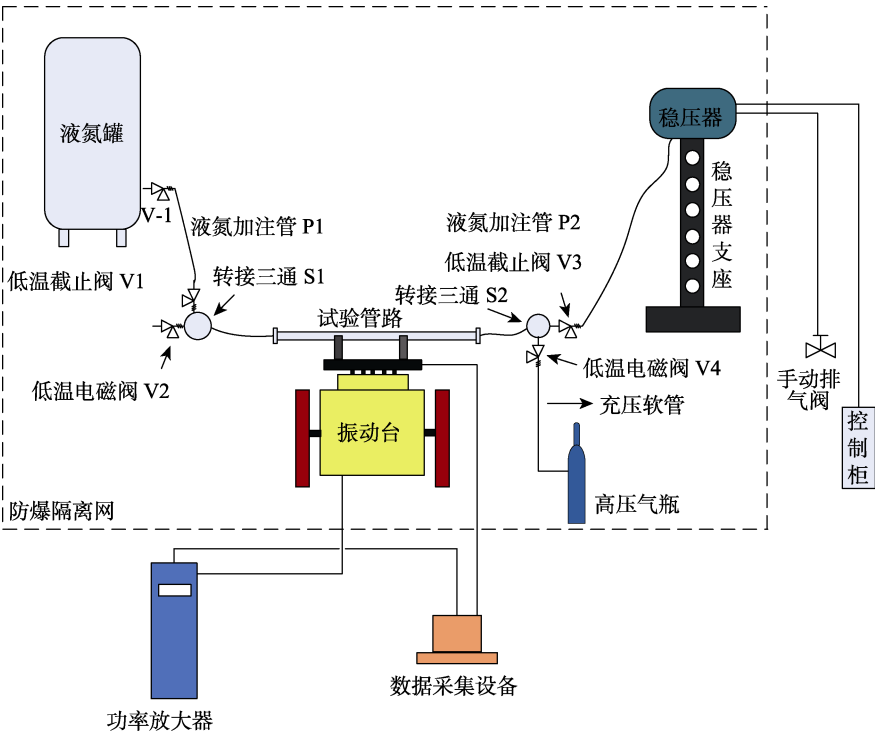


图 4 改进后的试验系统

4 结语

文中在对常规复合环境下，管路振动试验风险分析的基础上，结合新一代运载火箭增压管路环境模拟

试验对风险管理在管路试验项目中的应用进行了研究，并依据了研究的成果进行了低温高压加注设备的改进，有效地规避了试验项目的风险，提升了试验的安全性及有效性。因此可以认为，风险控制可以有效

降低试验中各种风险的发生概率,包括风险的辨识、分析及项目的风险管理,不仅可以对人员、设备及产品的安全性提供更可靠的保障,也可以提升环境模拟试验的效率。

参考文献:

- [1] 范瑞祥, 容易. 我国新一代中型运载火箭的发展展望[J]. 载人航天, 2013, 19(1): 1-4
- [2] 张庆伟. 面向 21 世纪的中国航天运载技术[J]. 中国航天, 2001(1): 4-8.
- [3] 于韶明, 芦田, 韩文龙, 等. 管路振动试验的低温防护[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(1): 102-105.
- [4] 卫国, 于韶明, 芦田, 等. 管路系统环境试验技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(5): 93-96.
- [5] 孙立新. 风险管理原理、方法与应用[M]. 北京: 经济管理出版社, 2014.
- [6] 潘六林. 液氮容器爆炸事故与预防[J]. 劳动保护, 2009(3): 104-105.
- [7] 刘新民, 刘瑞敏. 高压低温容器的航天应用[J]. 低温工程, 2004(2): 18-19
- [8] 于韶明, 芦田, 韩文龙, 等. 振动设备低温防护系统: 中国, 201420376988.7[P]. 2015-06-17.
- [9] 芦田, 卫国, 董理, 等. 一种管路内力平衡系统: 中国, 201420401360.8[P]. 2014-12-10.
- [10] 逯志国, 夏江宁, 卫国, 等. 低温推进剂输送管路振动试验中的复合环境试验协调加载系统: 中国, ZL201510920029.6[P]. 2015-12-11.