温度-湿度-高度环境对航天火工装置性能的影响

唐科，汪锐琼，曲展龙，陈楷，赵宇辉
（北京宇航系统工程研究所，北京 100076）

摘要：目的 研究温度-湿度-高度环境对航天火工装置密封性能的影响机理。**方法** 调研“温度-湿度-高度”环境的由来，对比不同标准中试验方法的差异，分析其作用过程，并分析两起因温度-湿度-高度环境导致的火工装置失效案例的故障原因及机理。**结果** 由于低温、低压与高温、高湿多次相互转化的过程，装置表面的冷凝水因“负压”特性被“压”入装置内部，形成积留水。多次循环后，内部积留水情况越发严重。故障案例表明，温度-湿度-高度环境，容易造成装置密封失效，进而造成工作失效。**结论** 航天火工装置需要采取有效的密封措施，并按照标准要求进行温度-湿度-高度考核，以检验装置的密封性能，并确保装置的贮存寿命。

关键词：航天火工装置；温度-湿度-高度；密封失效；药剂受潮；贮存寿命；密封改进
中图分类号：TJ450 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2022)02-0007-07
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2022.02.002

Influence of Temperature-Humidity-Altitude Environment on the Performance of Aerospace Explosive Devices

TANG Ke, *WANG Rui-qiong*, *QU Zhan-long*, *CHEN Kai*, *ZHAO Yu-hui*
(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The sealing failures in the temperature- humidity-altitude environment has occurred in explosive devices. Therefore, this paper studied the mechanism of temperature-humidity-altitude environment on the sealing performance of aerospace explosive devices. The origin of temperature-humidity-altitude environment was investigated, the differences of test methods in different standards were compared, and the failure causes and mechanisms of two cases of explosive device failure caused by temperature-humidity-altitude environment were analyzed. Due to the process of mutual transformation between low temperature & low pressure and high temperature & high humidity for many times, the condensate water on the surface was “pressed” into the interior of device because of the “negative pressure” characteristic, forming the accumulated water. After multiple cycles, the internal accumulated water became more serious. The fault case shows that the temperature- humidity-altitude environment, which tends to cause the sealing failure of the device, and in turn causes the operational failure. Therefore, it is necessary to take effective sealing measures for aerospace explosive devices and conduct temperature-humidity-height assessment

收稿日期：2021-10-25；**修订日期：**2022-01-25
Received：2021-10-25；**Revised：**2022-01-25
基金项目：国家自然科学基金联合基金（U1737214）；装备发展部共用技术（41419110206）
Fund：Joint National Natural Science Foundation of China (U1737214) and Public Technology of Equipment Development Department (41419110206)
作者简介：唐科（1982—），男，高级工程师，主要研究方向为分离结构及火工品装置设计。
Biography：TANG Ke (1982—), Male, Senior engineer, Research focus: design of separation structure and pyrotechnical device.
引文格式：唐科，汪锐琼，曲展龙，等. 温度-湿度-高度环境对航天火工装置性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 007-013.
TANG Ke, WANG Rui-qiong, QU Zhan-long, et al. Influence of Temperature-Humidity-Altitude Environment on the Performance of Aerospace Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 007-013.

according to the standard requirements to test the sealing performance of the devices and ensure the storage life of the devices.

KEY WORDS: aerospace explosive devices; temperature- humidity-altitude; seal failure; explosive material damp; storage life; seal improvement

温度、湿度和低气压是对航空机载设备影响较大的 3 个气候环境因素，对于航空机载设备，尤其是外挂产品而言，通常使用“温度-湿度-高度”试验方法，模拟机载设备经历的温度、湿度和低气压的交变环境，用于评价温度、湿度及低气压因素对机载设备工作性能影响。国内学者分析了温度-湿度-高度环境的作用机理和适用范围，研究了试验实施方法技术，但应用研究主要集中在对航空机载设备的考核上。航天领域除了对电起爆器进行“温度-湿度-高度”考核外，却很少有其他航天产品按照该试验项目要求进行考核。分析主要原因是飞机相对于航天运载器，其飞行工况和经历环境更加复杂，在反复的起飞、降落过程中，温度、湿度和低气压的影响更为明显，而航天运载器却少有这种交变的环境出现。

由于火工装置是一次性作用产品，是决定航天运载器发射成功的重要单机产品，在使用中任何故障或失效都可能导致飞行任务失败，带来灾难性后果。由于火工装置不可检测的特点，只能通过严格控制生产过程和质量一致性检验来保证产品的性能。因此，本文调研了“温度-湿度-高度”环境试验项目的由来，对比了不同标准中的试验方法差异，分析其作用过程，并分析了两起因温度-湿度-高度环境导致的火工装置失效案例的故障原因及机理。经过研究分析，航天火工装置有必要进行 28 d 的温度-湿度-高度环境考核，能够充分暴露产品的密封薄弱环节，考核产品的密封有效性，通过严格的环境试验项目以确保产品的可靠性和贮存寿命。

1 温度-湿度-高度项目分析

1.1 由来

在国军标中，温度-湿度-高度环境试验项目，最早出现在 GJB 150.19—1986[1]和 GJB 344—1987[2]中，是一个低温低气压和高温高湿两个二综合试验组合起来的循环试验项目，用于模拟飞机升降期间非温控、非增压舱内遇到的环境条件[3]，初衷是用于对机载设备的考核。GJB 150 是军用设备通用的试验条件，于 1986 年正式发布，遵循 MIL-STD-810C《空间及陆用设备环境试验方法》[4]，并结合我国实际情况编制而成的。虽然该系列标准主要针对的是飞机等航空装置，但对于航天装置仍然有一定的指导意义。GJB 344 是钝感电起爆器通用规范，于 1987 年正式发布，是在 MIL-I-23659C《电起爆器通用设计规范》[5]基础上编制的，用于指导钝感电起爆器的试验要求，关于温度-湿度-高度的环境试验要求与 MIL-I-23659C 一致。

GJB 344—1987（对应 MIL-I-23659C）中温度-湿度-高度要求的严酷程度相对于 GJB 150.19—1986（对应 MIL-STD-810C）大大增加，低温低压阶段的试验高度由 15 200 m（11.6 kPa）增加到 21 000 m（4482 Pa）（低温均为–54 ℃）；高温高湿度阶段的高温温度由 60 ℃增加到 71 ℃（相对湿度均为 95%），试验周期从约 4 d 提高到 28 d。可见对于电起爆器的试验比军用设备通用的试验要求更严酷，这与电起爆器作为火工品系统首发元件的高安全性与高可靠性要求相关。2003 年美国对 MIL-I-23659C 进行了修订，颁布了新的 MIL-DTL-23659D[6]。在此版标准基础上，美国于 2007 年和 2010 年分别再次对该标准进行修订，最终形成了现行的 MIL-DTL-23659F[7-8]。此系列标准虽然在进行不断修订和完善，内容也丰富了不少，但其中涉及 28 d 温度-湿度-高度试验的内容在历次修订中没有变化，可见此环境试验方法至少早在 20 世纪 70 年代初期已属于一种成熟方法。GJB 344A—2005[9]是 GJB 344—1987 的修订版，对于温度-湿度-高度的环境试验项目要求也延续了美军标的相关要求，没有发生变化。

1.2 作用机理

GJB 344 中规定的温度-湿度-高度试验一共进行 28 d，包括高温高湿（71 ℃，相对湿度为 95%）、常温常湿（21 ℃，相对湿度为 50%）、低温低压（–54 ℃，压力为 4482 Pa）3 种环境，共经历 61 次环境转换，其中高温高湿与低温低压间的转换次数为 20 次，试验流程如图 1 所示[2,9]。

温度-湿度-高度环境试验项目作用机理为：当飞行器在高空飞行时，机载设备处于低温，密封件可能硬化收缩而破坏，设备内部的压力就随设备舱内气压的降低而降低。当飞行器返回湿热的地面时，产品表面温度因低于空气温度而会结冰结霜。随着设备舱内温度和气压的回升，湿热空气中的水分以及设备表面冰霜融化成水。由于外界压力高于设备内部压力，就会造成外表面的水被“压”入设备内部，从而形成积留水现象。这样反复多次，积留水越加严重。积留水在反复高低温交变过程中发生固态液态转换，产生膨胀力，多次反复作用后，对机载设备装置的密封结构产生破坏[3]，作用过程如图 2 所示。

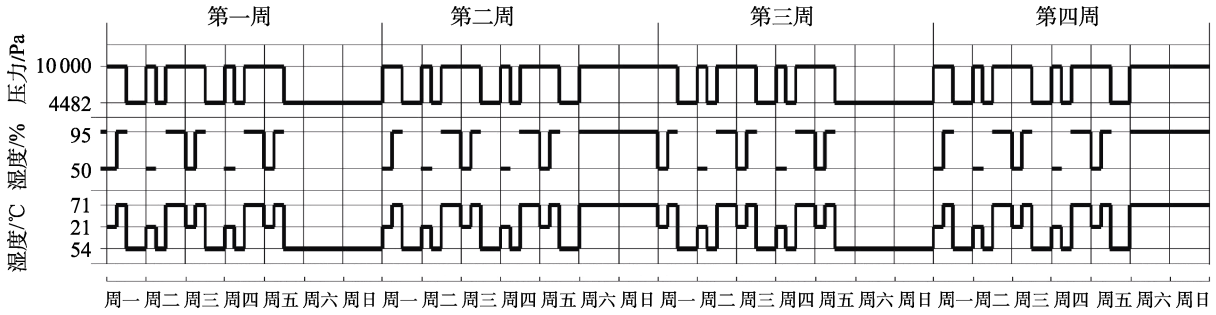


图 1　温度-湿度-高度试验流程

Fig.1 Temperature-humidity-altitude environment test procedure

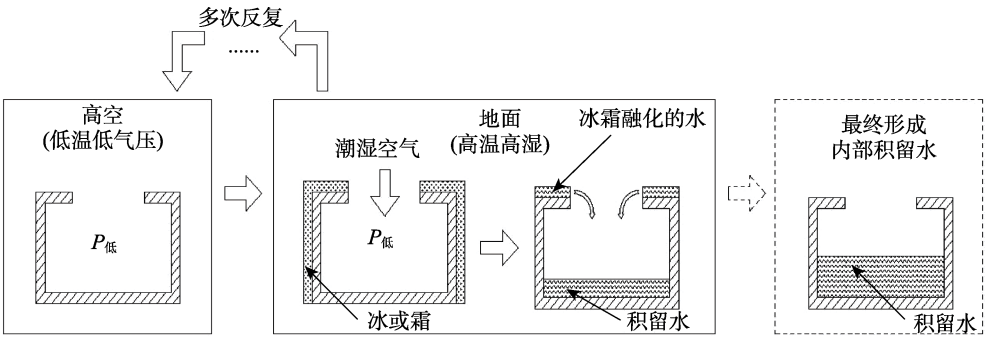


图 2　积留水产生过程

Fig.2 Schematic diagram of internal accumulated water

1.3　对贮存寿命的影响

由于对航天运载火箭可靠性的要求较高，而火工装置又是一次性作用产品，具有最终工作性能不可检、不可测的特点。结合火工装置失效模式及性能演变规律[10-12]，对于火工装置寿命评价，常见的方法有估算法、71 ℃试验法和双因素试验法[13]。学者围绕火工装置老化效应、贮存失效模型、加速试验类型、加速应力、寿命分布、加速系数、应力水平和持续时间等多方面开展了研究[14-19]，评价不同贮存环境对火工装置可靠性的影响，以期获得贮存的敏感参数，得到较为准确的贮存试验方法和结果[20-21]。由于 GJB 736.8—1990《火工品试验方法 71 ℃试验法》[22]规定贮存过程中采取防潮措施后即可简化为单因素贮存问题，但航天火工装置多年的研制经验表明，其贮存失效的机理中，较大比例与湿度有关，仅通过高温进行贮存寿命检验有一定局限性。因此，航天科技集团公司制定了 Q/QJA 748《航天火工品系统研制》系列标准[23]，规定了所有类型的航天火工装置均需要进行温度-湿度-高度试验考核，以充分暴露产品在低气压、湿度和温度等多因素环节中的密封薄弱环节，同时确保产品的贮存寿命。通过 28 d 温度-湿度-高度试验考核后，近似认为装置的密封性和药剂的安定性、相容性等能够满足 10 a 的贮存寿命。因此，为了确保航天运载火箭的可靠性和寿命，需要将航天火工装置置于温度-湿度-高度这个较为严酷的环境条件下进行设计鉴定检验和质量一致性检验考核，以通过严酷的环境，激发火工装置的薄弱环节，确保火工装置的贮存寿命和飞行过程中的工作可靠性满足航天运载火箭的高可靠要求。

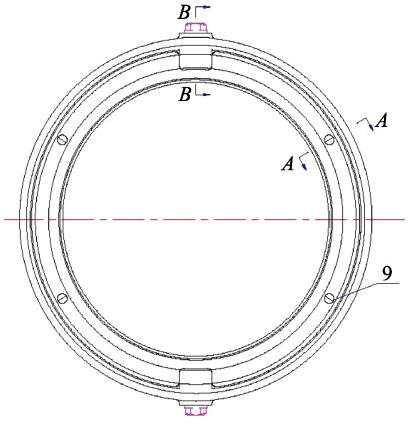
2　某切割分离装置失效原因及改进

2.1　故障定位

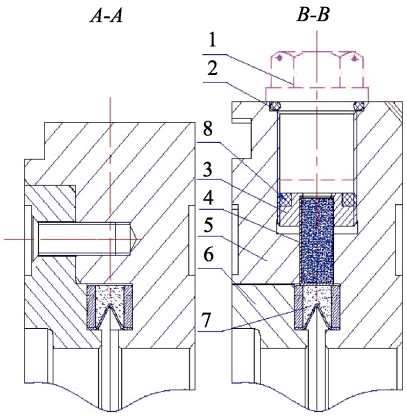
某切割分离装置经历了 GJB 344A—2005 规定的温度-湿度-高度环境后，出现了起爆器未正常引爆传爆管的现象，造成切割装置未正常工作。切割装置为环形结构，如图 3 所示。工作时，起爆器通入额定电流，输出爆轰波，引爆传爆管，将能量放大后引爆切割索，形成聚能射流，将被切割对象切割分离[24]。产品起爆环节为冗余起爆设计，任意一发起爆器工作，即可完成切割功能。

电起爆器一般由起爆器壳体、极针组件、桥带、装药等几部分组成，如图 4 所示。装药通常为 3 部分，与桥带贴合的首层装药为斯蒂芬酸铅，过渡药为氮化铅，主装药为黑索金。工作时，起爆器引爆下级工装置，完成预定的功能[25]。正常工作的起爆器，由于爆轰波作用，在输出端壳体会形成类似于“喇叭口”的扩孔现象。

通过对故障件进行 CT 检查，重点对比起爆器和药室壳体与正常工作产品的差异，发现起爆器输出端壳体未扩孔。切割装置传爆管安装孔无扩孔现象，传爆管内装药剂被冲散，与起爆点正对位置，切割环药



a 外形



b 截面

1-堵头（使用时更换为起爆器）；2-O 形圈；3-传爆管座；4-传爆管；5-药室壳体；6-药室挡板；7-切割环；8-HJY-4 胶；9-M5 螺钉

图 3　产品结构

Fig.3 Product structure diagram: a) outline drawing; b) section

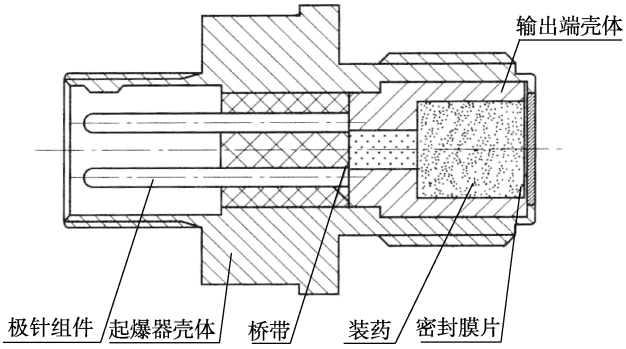
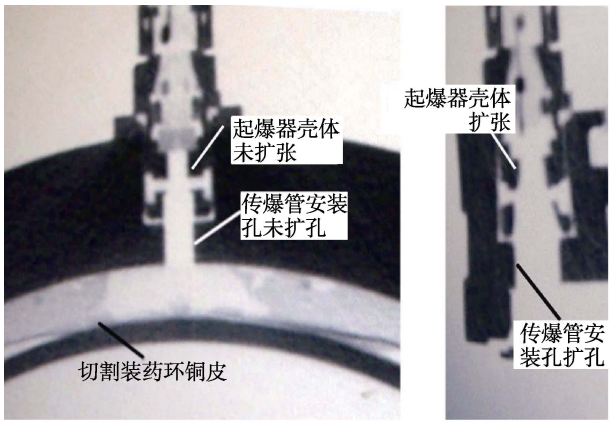


图 4　电起爆器结构

Fig.4 Structure diagram of electric detonator

剂被冲散，铜皮被压垮。正常件与故障试验件 CT 照片对比情况如图 5 所示。正常工作试验件的起爆器壳体、传爆管安装孔有明显扩孔现象。分解检查时，工作后的起爆器能够轻松拆卸，说明安装螺纹未变形。上述现象表明，切割装置起爆环节未正常爆轰，原因是起爆器未形成正常爆轰输出，造成传爆链路未正常爆轰传爆，导致切割装置工作失效。对故障件安装堵头一端，分解后发现内部存在大量积留水，如图 6 所示。说明起爆器未正常爆轰的原因是切割装置经过温度-湿度-高度试验后，发生密封泄露，造成起爆器受潮失效，未正常工作。



a 故障件　　b 正常件

图 5　故障件 CT 检查

Fig.5 CT inspection of faulty parts

图 6　堵头一侧的积留水

Fig.6 Internal accumulated water on one side of the plug

2.2　原因分析

根据产品结构示意图可知，切割装置药室挡板、药室壳体及切割环接触位置通过刷涂 HYJ-4 胶，依靠胶液进行密封，存在密封不可靠的情况，为“半密封”结构。产品使用时，一端安装堵头，一端安装起爆器，均采用“O 形圈密封+金属面限位”的标准密封结构[26]。对于涂胶环节，无法保证产品密封的有效性，在 28 d 的温度-湿度-高度环境中，试验件内部与外界环境可能存在气体交换通道，如图 7 所示。经过温度-湿度-高度考核后，起爆器安装孔的通道形成积留水。积留水在反复高低温交变过程中发生固态液态转换，产生膨胀力，导致起爆器输出端卷边面的 HYJ-14 胶和三防保护剂被破坏，使起爆器输出端密封失效。

电起爆器的装药中，斯蒂芬酸铅是一种单质弱起爆药，不易吸湿和分解，具有良好的安定性。根据起爆器结构，斯蒂芬酸铅作为传爆序列中的第一层装

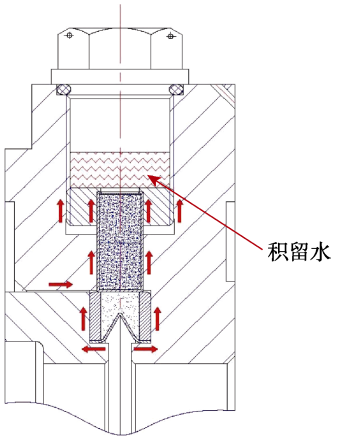


图 7　气体交换通道
Fig.7 Gas exchange channel

药，如果其变质，将造成起爆器无法工作，无法输出能量将传爆管和对应位置切割环内装药剂冲散，因此故障起爆器内装起爆药斯蒂芬酸铅未发生变质。

一般情况下，过渡药氮化铅不易吸湿和分解，具有良好的安定性。根据《起爆药化学与工艺学》[27]，在高温（70 ℃）条件下，氮化铅会与水和 CO_2 作用，引起化学反应，生成对火焰不敏感的碱式碳酸盐，同时分解出游离的迭氮酸而导致失效，反应机理为：

$$3PbN_3+4H_2O+2CO_2 \rightarrow Pb_3(OH)_2(CO_3)_2 \text{ 或 } [Pb(OH)_2\cdot Pb_2(CO_3)_2]+6HN_3 \quad (1)$$

主装药黑索今对火焰不敏感，需在爆轰作用下引爆和传爆。根据《炸药学》[28]，黑索金分子式为 $C_3H_6N_6O_6$，称环三亚甲基三硝胺，其炸药性能稳定，不溶于水及四氯化碳，微溶于乙醇、乙醚、苯、甲苯、氯仿、二硫化碳和乙酸丁酯等，易溶于丙酮、二甲基二酰胺、环己酮及浓硝酸等，不会与水、碳酸等酸性溶液发生反应而变性。黑索今在常压下煮洗都不会发生分解，只有在高压下煮洗。当温度高于 150 ℃时，会水解成甲醛、氨和硝酸，如式（2）所示。当环境温度大于 60 ℃时，黑索今与水遇酸碱溶液会发生反应。由于黑索今的制造常用硝化法，本身就含有酸性成分，因此只要遇水和高温就会发生反应，使得药剂变质。而故障起爆器虽经历 28 d 的温度-湿度-高度试验，最高温度为 71 ℃，存在使黑索金变质的可能。同时，潮气进入黑索金装药后，逐渐渗入黑索今药剂晶体颗粒间的微间隙中，使得药芯体密度下降和颗粒间隙被非爆物质水填充，降低了药芯单位体积内的能量密度和能量传递的连续性，可能导致出现起爆器能量输出不足的现象。

$$C_6H_6N_6O_6+6H_2O \xrightarrow[\text{酸液}]{\Delta} 3NH_3+3HCHO+3HNO_3 \quad (2)$$

通过分析，故障分离装置发生密封失效后，在温度-湿度-高度环境下，内腔形成积留水。在反复高低温交变过程中，积留水发生固液态转换，产生膨胀力，导致起爆器输出端卷边面的 HYJ-14 胶和三防保护剂发生破坏，使潮气进入起爆器内部，与氮化铅和黑索金药剂发生化学反应变质，黑索金主装药体密度也可能降低，导致能量输出不足，造成起爆器失效。

2.3　改进措施

改进措施围绕起爆器安装孔的密封性进行。在产品装配时，在传爆管周围填充约 3 mm 厚的硅橡胶，然后拧上传爆管座，压紧传爆管，如图 8 所示。固化后，从起爆器孔通入 1 个大气压的氦气进行检查，泄露率不大于 5×10^{-7} Pa·m^3/s。通过增加涂一定厚度的硅橡胶和氦质谱检查的措施，能够防止潮气从壳体缝隙进入起爆器安装孔，确保密封的有效性。改进后的产品通过了 28 d 温度-湿度-高度试验考核，起爆器孔内无积留水，产品发火性能正常，提高了产品的环境适应能力，确保了装置的可靠性。

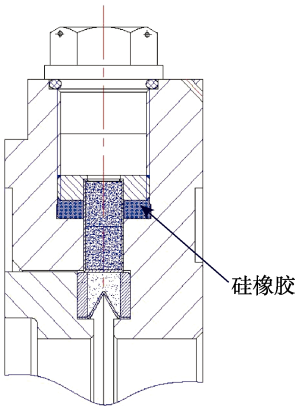


图 8　改进措施
Fig.8 Improvement measures

3　某非电传爆组件输出接头失效原因及改进

某型非电传爆系统进行质量一致性检验时，3 套产品按要求进行了温度-湿度-高度试验和力学环境试验考核后，依次进行常温、高温及低温发火试验。常温组正常工作，高温组出现了终端隔板点火器无测压数据的现象。经检查，隔板点火器输出端未正常工作。试验残骸如图 9 所示。

隔板点火器由 4 部分组成：施主装药、受主装药、输出药、隔板壳体。当施主装药起爆后，产生的冲击爆轰能量通过隔板壳体上的金属隔板传递到受主装药，激发受主装药，最终引爆（燃）输出药。隔板点火器施主装药和受主装药均为氮化铅，输出装药为烟火药 Al/$KClO_4$。产品结构如图 10 所示[25]。

输出接头和隔板点火器的组装结构如图 11 所示。输出接头外螺套通过螺纹与隔板点火器连接，两者之间无密封圈密封。根据产品结构可知，输出接头螺套与隔板点火器之间无密封圈，仅靠螺纹连接，使

图 9　试验件残骸
Fig.9 Test piece debris

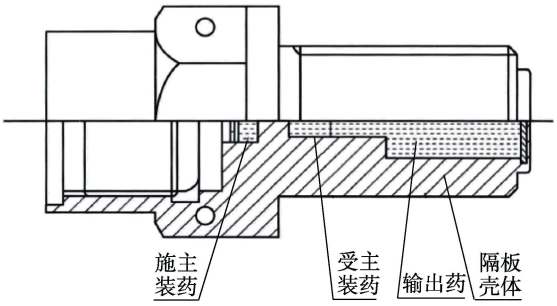
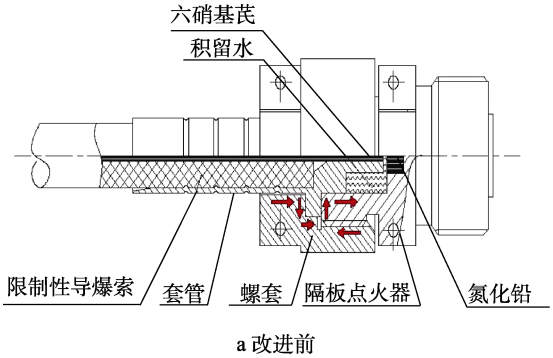


图 10　隔板点火器结构
Fig.10 Structure diagram of TBI

该环节处于“半密封”状态，存在与外部潮湿空气交换的通道。在温度-湿度-高度试验过程中，产生“呼吸效应”，导致水汽进入，使该环节容腔内产生积留水。输出接头及隔板点火器输入端上的胶漆在积留水的浸泡及高温条件作用下，积留水、空气中 CO_2 与药剂接触，在高温条件下发生反应，从而变质失效。隔板点火器输入端的药剂为氮化铅，具体失效机理与反应机制与式（1）相同，均为氮化铅受潮而变质失效。同时，输出接头内的药剂为六硝基芪，在输出接头端头出现积水后，在长时间高低温反复交变条件下，在端头造成药剂疏松，也存在一定的失效概率。相关的改进措施为增加 O 型密封圈，采用“O 型圈+金属面限位”的标准密封设计结构，防止潮气进入隔板点火器内部，确保密封的有效性。



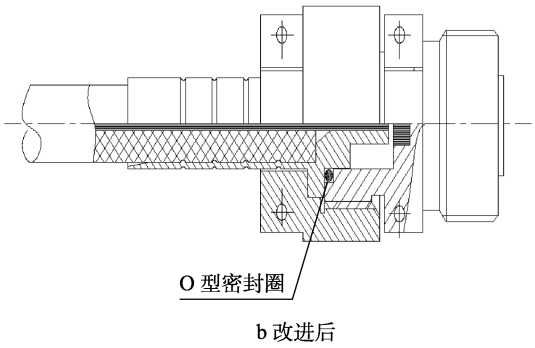


图 11　产品组装结构
Fig.11 Assembly product structure diagram: a) before improvement; b) after improuement

4　结论

1）航天火工装置有必要进行 28 d 的温度-湿度-高度环境考核，能够充分暴露产品的密封薄弱环节，考核产品的密封有效性，通过严格的环境试验项目以确保产品的可靠性。

2）由于 28 d 温度-湿度-高度试验的特殊性，一旦存在密封薄弱环节，湿热空气中的水分以及试验件表面冰霜融化产生的水都会被“压”入内腔而无法排出，从而产生积留水，反复多次后，积留水会越来越严重。

3）火工装置内腔形成积留水后，起爆器内部氮化铅药剂发生受潮，在 28 d 的温度-湿度-高度环境中，存在氮化铅和黑索金发生化学反应的条件，导致药剂化学反应失效。采取涂硅橡胶或采取 O 型圈等密封结构设计措施，通过氦质谱检查，能够进一步提升装置的密封有效性。

参考文献：

[1] GJB 150.19—1986, 军用设备环境试验方法温度-湿度-高度[S].
GJB 150.19—1986, Laboratory Environmental Test Methods for Military Maateriel: Temperature-Shock-Humidity-Altitude[S].

[2] GJB 344A—2005, 钝感电起爆器通用规范[S].
GJB 344A—2005, General Design Specification for Insensitive Electric-Initiators[S].

[3] 傅耘. 浅析“GJB150.19 温度-湿度-高度试验”[J]. 环境技术, 1999, 17(4): 26-30.
FU Yun. Brief Analysis of "GJB 150.19 Temperature-Shock-Humidity-Altitude"[J]. Environmental Technology, 1999, 17(4): 26-30.

[4] MIL-STD-810C, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
[5] MIL-I-23659C, Initiators, Electric, General Design Specification for[S].
[6] MIL-DTL-23659D, Initiators, Electric, General Design Specification for[S].
[7] MIL-DTL-23659E, Initiators, Electric, General Design Specification for[S].
[8] MIL-DTL-23659F, Initiators, Electric, General Design Specification for[S].
[9] GJB 344A—2005, 钝感电起爆器通用规范[S].
GJB 344A—2005, General Design Specification for Insensitive Electric-Initiators[S].
[10] 严楠. 火工品失效分析概论[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(1): 10-14.
YAN Nan. Generality of Analysis on Initiating Explosive Device Failure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(1): 10-14.
[11] 赵伟, 王成. 火工品失效模式[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(7): 14-16.
ZHAO Wei, WANG Cheng. Failure Modes of Initiating Explosive Devices[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(7): 14-16.
[12] 文雷鸣. SCB 火工品贮存失效及性能演变规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
WEN Lei-ming. Research on the Failure and the Law of Perfor-Mance Variation during Storage of Semiconduc-Tor Bridge Initiators[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
[13] 张福光, 崔旭涛, 洪亮. 导弹火工品贮存寿命的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 24-27.
ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao, HONG Liang. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27.
[14] 陈明华. 加速老化对电火工品电阻与发火时间的影响[J]. 火工品, 2008(5): 37-38.
CHEN Ming-hua. Influence of Aging on Electric Resistance and Firing Time of Electric Igniter[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(5): 37-38.
[15] 赵婉, 杨静. 基于性能退化数据评价火工品贮存可靠性的方法[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 406-408.
ZHAO Wan, YANG Jing. Evaluation on Storage Reliability of Pyrotechnics Based on Performance Degradation Data[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(4): 406-408.
[16] 赵崇斌, 王帅, 唐科, 等. 火工品产品化通用验证试验方法探讨[J]. 航天工业管理, 2017(5): 52-54.
ZHAO Chong-bin, WANG Shuai, TANG Ke, et al. Discussion on the General Verification Test Method for the Commercialization of Initiating Explosive Devices[J]. Aerospace Industry Management, 2017(5): 52-54.
[17] 冯国林, 吴建国, 李海波, 等. 基于模糊理论的火工品贮存敏感应力排序方法[J]. 强度与环境, 2017, 44(4): 55-59.
FENG Guo-lin, WU Jian-guo, LI Hai-bo, et al. Study on Initiating Explosive Device Storage Sensitive Stress Sequencing Based on Fusszy Theroy[J]. Structure & Environment Engineering, 2017, 44(4): 55-59.
[18] 涂小珍, 李敬明, 韦兴文, 等. 某火工品贮存老化效应分析研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 539-542.
TU Xiao-zhen, LI Jing-ming, WEI Xing-wen, et al. Study on the Aging Effect of a Detonator[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 539-542.
[19] GB/T 40542—2021, 航天火工系统及装置设计要求[S].
GB/T 40542—2021, Standardization Administration of the People's Republic of China[S].
[20] 杨森, 王晓方, 赵晓利. 制导弹药火工元件加速寿命试验技术研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 61-64.
YANG Sen, WANG Xiao-fang, ZHAO Xiao-li. Study on Accelerated Life Test Technology of Guided Ammunition Initiating Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 61-64.
[21] 刘朝阳, 赵晓利, 杨岩峰, 等. 制导弹药火工品单应力水平加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 29-31.
LIU Chao-yang, ZHAO Xiao-li, YANG Yan-feng, et al. Study on Single Stress Level Accelerated Life Test of Guided Ammunition Initiating Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 29-31.
[22] GJB 736.8—1990, 火工品试验方法 71 ℃试验法[S]
GJB 736.8—1990, Initiating Explosive Device Method of the Test at 71 ℃[S].
[23] Q/QJA748—2020, 航天火工品系统研制[S].
Q/QJA748—2020, Aerospace Initiating Explosive Device System Development[S].
[24] 唐科, 吴锦涛, 吴立志, 等. 某火焰雷管传爆序列的失效机制及优化改进[J]. 爆破器材, 2021, 50(4): 23-29.
TANG Ke, WU Jin-tao, WU Li-zhi, et al. Failure Mechanism and Optimization Improvement of Detonation Sequence of a Flame Detonator[J]. Explosive Materials, 2021, 50(4): 23-29.
[25] 刘竹生, 王小军, 朱学昌. 航天火工装置[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
LIU Zhu-sheng, WANG Xiao-jun, ZHU Xue-chang. Aerospace Pyrotechnics Devices[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2012.
[26] 唐科, 孙璟, 张志峰, 等. 一种可实现防雨功能的非电传爆系统密封结构: CN205279895U[P]. 2016-06-01.
TANG Ke, SUN Jing, ZHANG Zhi-feng, et al. Seal Structure of System is Exploded in Non-Telex that can Realize Rain-Proof Function: CN205279895U[P]. 2016-06-01.
[27] 劳允亮. 起爆药化学与工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
LAO Yun-liang. Chemistry and Technology of Primary Explosive[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
[28] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
OU Yu-xiang. Fried Pharmacy[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2006.