

基于样品工作状态的爆炸性大气试验方法研究

杨欣磊¹, 王忠^{1,2}, 张玄¹

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610;
2.广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广州 510610)

摘要:目的 验证并改进在爆炸性大气环境工作状态下的样品防爆能力。方法 通过对一种特种环境试验“爆炸性大气试验”的应用背景介绍, 划分与归纳处于工作状态中的受试样品在该试验过程中的工作特征, 以GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第13部分: 爆炸性大气》规定的程序I“在爆炸性大气中工作”作为试验标准, 对其试验程序进行研究说明。结果 通过实际案例对爆炸性大气试验过程进行了描述。结论 爆炸性大气试验属于较少见的特种试验, 缺乏普遍性试验程序, 通过对该试验方法的研究可对我国环境工程领域特种试验实施方法提供理论依据和技术支撑。

关键词: 爆炸性大气试验; 工作状态; GJB 150.13A

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.08.003

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)08-0015-05

Test Method of Explosive Atmosphere Based on Samples' Operating State

YANG Xin-lei¹, WANG Zhong^{1,2}, ZHANG Xuan¹

(1.The Fifth Electronic Research Institute of MIIT, Guangzhou 510610, China; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information Products Reliability Technology, Guangzhou, 510610, China)

ABSTRACT: **Objective** To certify and improve the anti-explosive ability of operative state products in explosive atmosphere condition. **Methods** Operation characteristics of testing samples in test procedure were classified and summarized based on introducing the application background of “explosive atmosphere test” which is a particular kind of environmental tests. The test program of corresponding test samples was illustrated according to national military standard Laboratory environmental test methods for military material—Part 13 (GJB 150.13A): Explosive atmosphere test: Program I. **Results** The process of atmosphere test was described with actual application. **Conclusion** Explosive atmosphere test is a rare special test. It is in shortage of universal test procedures. It provides theory evidence and technical support in our environmental special test, which aims to solutions of lack of typical test program.

KEY WORDS: explosive atmosphere test; operating state; GJB 150.13A

近年来我国新研制和投入使用的武器装备及航空舰船型号设备中,许多处于工作状态的系统产品都曾遭受到爆炸性大气的危害。如导弹装备在实际发射时内部火控系统由于引燃爆炸性气体而受到损坏,海上油田船舶的输送油管路在工作时由于易燃易爆气体爆炸而发生结构损伤,航空产品的燃油装置由于液压传感器产生电火花引燃爆炸性气体导致系统功能

性能丧失等危险事故,都属于产品设计阶段对防爆能力考虑不足导致的恶劣影响,对产品的使用可靠性和人员安全产生危害^[1-2]。爆炸性大气试验开始更加受到研制方和使用方的重视,国家军用民用产品标准及适航标准都将其作为一项装备定型前必须考核的能力项目进行分析评价^[3-6]。

由于受到瞬间工作电流通断作用或者长时间处

于高温环境工作或贮存状态,在综合环境应力(温度、振动、电应力)的相关作用下极易产生电火花。大多数此类产品,如航空发动机、燃油液压阀、温度传感器等核心产品,伴随着燃油或冷却液的作用,使用环境中会出现易燃气体、液体、蒸汽等易燃危险物质,在电火花作用下会发生爆炸对产品造成不可逆转的损坏,严重影响使用安全。正在部署执行工作任务的装备产品在经受爆炸性大气环境时容易发生内部或外部的爆炸,对任务的顺利完成和使用人员的安全都造成了极大威胁和伤害。因此,需要通过环境试验方法来确定产品在混合着易燃物质的爆炸性大气下正常工作而不发生爆炸的能力,由此从设计和验证角度上对产品的防爆能力进行改进与提高^[7]。进行试验的设备为 ETC-1000 型爆炸试验箱。

1 受试样品适用范围及工作特征

可能经受爆炸性大气环境条件下且处于工作状态的受试样品,具有机械结构精密、电路排布复杂、控制方法多样等技术特点^[8]。具体可按照其工作特征分为以下三类。

1.1 通电工作的受试样品

通电工作是爆炸性大气受试样品中最常见的工作方式,因为产品内部线路在设计过程中通常只考虑到热设计或者冗余设计以保证产品正常工作的可靠性水平,而很可能会忽视带电器件的触点或开关接头在通断电过程中产生的瞬间电火花引起的爆炸隐患。为了模拟受试样品工作情况,一般在试验过程中都需要样品按实际工作电压、电流保持通电工作状态。按照 GJB 150.13A 的规定,一般试验方要与承制方约定试验过程中的通断电次数,并间断性的对产品的电路进行通断操作。该类比较常见的产品有电磁阀、电压传感器、电源系统等^[9]。

1.2 通液工作的受试样品

由于燃油、飞机清洁剂、冷却液、润滑剂等溶液的蒸发气体容易在高温下生成爆炸混合气体,因此在通液条件下工作的受试样品也具有进行防爆性能测试的必要性,其引发爆炸的隐患甚至比电火花引爆的模式更加具有风险和危害性。在此类受试样品进行爆炸性大气试验时,需要在试验前做好对样品连接通液管路的准备,试验中要保持对样品进行液体输送和排出。由于试验箱在试验过程中一直处于密封状态,因此需要在试验箱的连接孔处做好特定的连接工装,连接原理与低气压试验类似,但密封的程度需要更严格。该类比较常见的产品有燃油换热器、集水器、液压传感器等^[10]。

1.3 通气体工作的受试样品

部分受试样品在工作状态下需要对其供给氧气,属于活泼气体的氧气在浓度达到一定含量后,在高温和电应力的综合作用下同样具有引发爆炸的隐患。此类受试样品在试验前也需要准备特定供氧设备如氧气瓶、输氧器等,同时为了密封效果也需要在试验箱连接孔处安装特定工装。需要注意的是,试验中为了保持试验箱中模拟试验高度的压力值,因此通进箱内的气体必须直接进入处于工作状态的受试样品内部,再由管路导出箱外,而不是直接输入箱内。该类比较常见的产品有氧气开关、充氧接头、氧源转换器等^[11]。

除了以上三种主要类型的适用于进行爆炸性大气试验的受试样品工作状态之外,还有将上述工作方式综合的工作状态,比如有的液压传感器在通液时也要对其进行通断电操作,有的充氧接头在持续通入氧气的同时也要接入直流电源。综合工作状态的受试样品由于在爆炸性大气中工作时产生爆炸危害的可能性更高,因此对于其防爆设计和改进的要求也更加严格。

2 试验条件分析

由于文中重点研究受试样品在爆炸性大气中工作的试验条件与方法,因此需要根据 GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分:爆炸性大气》中的来确定试验条件,并且以其中的程序 I“在爆炸性大气中工作”来确定试验程序^[12-14]。针对不同类型的受试样品,试验条件会有区别,但基本要包含以下三类参数。

1) 试验温度。在试验开始前要求加热燃料和空气混合气体,温度取值采用受试样品在实际工作中可能经受的最高环境温度,并在此温度达到稳定的水平上完成所有试验。对于空气强制制冷的试件,采用装备在无风冷情况下,能正常操作和工作的最高温度作为试验温度。

2) 试验模拟高度。该试验实际上是通过调节试验箱内气压的高低来模拟受试样品工作状态下处于不同海拔高度的防爆能力,对于航空产品来说加入高度(气压)的环境应力才能更加真实地模拟其实际工作状态。GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分:爆炸性大气》要求至少使用两种模拟高度来完成试验:第一是受试样品实际工作中预期经受的最高使用高度,但不得超过 12 200 m(约 18.7 kPa,超过此高度后爆炸几乎不会发生);第二是代表地面正常海拔高度的 78~107 kPa 之间的压力点。

3) 试验燃料体积及质量浓度。爆炸性大气试验

通常采用正己烷作为燃料进行试验，正己烷在可燃性大气中的引燃特性相当于敏感于辛烷值为 100/130 的航空燃油、宽馏分喷气燃料和高闪点喷气燃料，具有易挥发、扩散快、闪点低的特点，是目前检验工作状态下的受试样品是否引起爆炸的最佳试剂^[15]。

使用比例适当的正己烷与空气混合可以制成爆炸性大气试验气体，该试验气体的特点是只需要一个极小的能量就能点燃，等同于工作状态中受试样品可能产生的电火花引爆效果。按照 GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分：爆炸性大气》的规定要求，每一试验高度下液态正己烷用量通过式（1）进行计算：

$$\frac{95\% \text{正己烷的体积}(\text{mL}) \times 4.27 \times 10^{-4} \times \text{试验箱净容积}(\text{L}) \times \text{试验高度对应压力}(\text{Pa})}{\text{试验箱温度}(\text{K}) \times \text{正己烷质量浓度}(\text{g/mL})}$$

(1)

其中正己烷的质量浓度依据标准规定近似符合以下与燃料温度有关的线性经验函数：

$$\text{正己烷质量浓度}(\text{g/mL}) = -[0.9 \times \text{燃料温度}(\text{℃}) - 677.5] \times 10^{-3}$$

(2)

由上述公式可得到不同温度和不同模拟高度条件下试验所需正己烷的体积值，选取典型的温度与高度值，归纳到表 1。

表 1 温度、气压条件下正己烷含量对应值

高度/m	气压/Pa	温度/℃	质量浓度/(g·mL ⁻¹)	体积/mL
12 200	187 30	60	0.623	37.54
		70	0.614	36.44
		75	0.610	35.92
8 000	35 599	60	0.623	71.34
		70	0.614	69.26
		75	0.610	68.27
5 000	54 020	60	0.623	108.26
		70	0.614	105.10
		75	0.610	103.59
2 000	79 494	60	0.623	159.31
		70	0.614	154.67
		75	0.610	152.45
0	101 325	60	0.623	203.06
		70	0.614	197.14
		75	0.610	194.31

除此之外，试验箱内湿度对可燃气体也有影响，但基本可以不作考虑。因此，只要确定了基于受试样品工作特点的以上三个试验参数，则基本确定了爆炸性大气试验的开展。

3 试验方法程序设计

3.1 试验前

对于非工作的受试样品，直接将被试品放入试验箱并密封即可开始试验。对于工作状态的受试样品，试验前必须根据其工作特征来采取不同的样品安装放置方法，使之能通过连接工装在外部操作对受试样品工作状态进行控制。

对于通电工作的受试样品，按照其工作时的额定电压准备好相应电源设备和导线，通过试验箱接线柱对样品进行内部到外部的连接。对于通液或通气工作的受试样品，通过连接工装和通液管路来满足样品通液、通气条件，并保证经过受试样品的液体、气体能顺利排出试验箱外形成闭环导通模式。

3.2 试验中

按照 GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分：爆炸性大气》程序 I 规定的试验程序，大体可以将基于工作状态受试样品的爆炸性大气试验分为如图 1 所示的程序步骤。

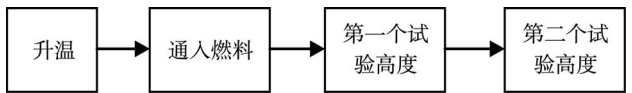


图 1 试验中程序步骤

1) 升温。将试验箱温度升至受试样品实际工作状态下所经历的最高温度并达到稳定。

2) 通入燃料。将试验箱内气压降低，模拟比试验高度 12 200 m 高 2 000 m 的高度，并在达到此模拟高度后开始使高度下降，以便对箱内通入根据式（1）确定体积的正己烷溶剂。完全通入后等待 3 min，使正己烷溶剂充分气化并与箱内高温空气混合，形成合适的爆炸性混合气体。

3) 第一个模拟试验高度降低过程。在比试验高度高 1 000 m 的高度点采集试验箱内爆炸性气体并点燃，如不能点燃，则重新进行所有试验程序。调整试验箱内气压，使模拟试验高度以不大于 100 m/min 的速率下降。此时使受试样品处于工作状态，按照其工作状态种类区别进行通断电/通液/通气操作，该阶段可对受试样品进行功能性能的检测。在低于试验高度 1 000 m 的高度点停止降低试验箱内高度，并使受试样品恢复到非工作状态。在该点再次采集箱内气体并尝试点燃，通过前后对照的方法，以验证该试验高度下降过程中箱内爆炸性气体的有效性。若不能点燃，则重新进行所有试验程序。

4) 第二个模拟试验高度降低过程。该过程的模拟试验高度为海拔地面高度，与前一模拟试验高度下降过程的试验方法程序完全相同。从 1 000 m 的高度

点开始降低模拟高度，直至海拔地面高度。由此类推可得出试验中试验高度点与各个操作点之间的关系（见表 2）。

表 2 试验中各高度点对应操作内容

高度点（段）	操作内容
试验高度+2 000 m	通入燃料
试验高度+1 000 m	第一次采样并点燃气体
高度下降阶段	箱内通入空气，降低试验高度
试验高度-1 000 m	使受试样品保持工作状态
（最低为0 m）	停止降低高度
	使受试样品恢复工作状态
	第二次采样并点燃气体

3.3 试验后

确保受试样品恢复到非工作状态，根据样品通电/通液/通气的工作特征，将外部控制样品的设备（如电源、通液车管路、通气瓶管路）关闭，将试验箱温度气压恢复至常温常压，打开试验箱。当内部爆炸性混合气体全部散尽后，观察受试样品外观形态是否受到损伤，并拆除试验箱内箱外的连接工装，将受试样品移出箱外。最后对受试样品的功能性能进行检测，并做好相关试验记录。

3.4 合格判据

根据 GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分：爆炸性大气》的规定可知，该试验的合格判据是处于工作状态的受试样品在所有试验过程中在试验箱内不会将高温的爆炸性气体引爆，模拟试验高度的降低同样不会使受试样品在工作状态下点燃爆炸性气体。

4 工程实例

选取工作状态为通气体受试样品的爆炸性大气试验实施过程作为工程实例进行试验方法设计与程序说明。

某飞机装备公司生产的某型氧气减压器按照

GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分：爆炸性大气》程序 I 为标准进行爆炸大气试验。受试样品氧气减压器最高工作温度要求为 70℃，在试验过程中保持通入氧气循环的工作状态，试验要求在全部试验过程中氧气减压器不能将试验箱内爆炸性气体引燃发生爆炸。

首先按照标准规定计算试验所用正己烷试剂体积。该次试验的试验高度是 12 200 m 和地面高度，对应气压为 18.73 kPa 和 101.3 kPa，燃料温度为 70℃，试验箱净容积为 953.78 L。

因此根据式（2）计算正己烷的质量浓度：

$$\text{正己烷质量浓度}(\text{g/mL}) = -[0.9 \times \text{燃料温度}(\text{℃}) - 677.5] \times 10^{-3} = -(0.9 \times 70 - 677.5) = 61.45$$

由此可根据式（1）或表 1 数据，得出 12 200 m 试验高度下正己烷试剂体积：

$$\begin{aligned} \text{95\%正己烷的体积}(\text{mL}) &= 4.27 \times 10^{-4} \times \\ &\frac{\text{试验箱净容积}(\text{L}) \times \text{试验高度对应压力}(\text{Pa})}{\text{试验箱温度}(\text{K}) \times \text{正己烷质量浓度}(\text{g/mL})} = \\ &4.27 \times 10^{-4} \times \frac{953.78 \times 18.73 \times 10^3}{(70 + 273.15) \times 61.45} = 36.44 \end{aligned}$$

同理可求出地面试验高度所用的正己烷试剂体积为 197.14 mL。

按照计算结果配置好正己烷试剂后，接着进行受试样品的安装与氧气通路的连接，连接时注意试验箱的密封程度。

按照试验方法程序的步骤，对照表 2 中的操作点依次进行试验。在 14 200 m 高度通入正己烷试剂，第一次试验高度从 13 200 m 下降至 11 200 m，第二次试验高度从 1 000 m 下降至 0 m。在两次模拟试验高度的下降过程中确保受试样品处于工作状态。高度下降过程的前后均用采样方法对制备的爆炸性气体进行有效性验证。

试验过程中处于工作状态的氧气减压器未引爆试验箱内气体，因此表明该产品在爆炸性大气中工作而不使易燃气体发生爆炸的能力达到 GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13 部分：爆炸性大气》规定的合格要求。具体试验记录见表 3。

表 3 试验记录

试验高度/m	温度/℃	样品工作状态	试验过程中是否引起可燃气体爆炸	试验气体是否能点燃
12 200	70	通入氧气循环工作	否	是
现场地面高度	70	通入氧气循环工作	否	是

5 结语

部分航空、机电产品处于易燃气体的工作环境，在工作状态下能保持正常功能性能且不引起爆炸的

能力是爆炸性大气试验考核的主要目的。现阶段我国实施爆炸性大气试验的能力还比较有限，文中通过对不同种类的工作状态受试样品进行分类分析，并以 GJB 150.13A《军用装备实验室环境试验方法 第 13

部分：爆炸性大气》为标准对试验方法程序进行了设计和解读说明，结合具体工作状态受试样品的工程试验实例，对我国环境工程领域特种试验实施过程提供理论上的可行性和技术上的可实现性。

参考文献：

- [1] 伍良. 城镇燃气事故风险评价研究[D]. 福建: 福州大学, 2001.
- [2] 张凤维, 李耀庄, 杨志. 易燃易爆气体泄漏的危险性分析[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(1): 30-32.
- [3] 冉建华. GJB150A 的发布对产品设计及试验工作的影响[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 71-75.
- [4] RTCA/DO-160F, 机载设备环境条件和试验程序[S].
- [5] GJB 241A—2010, 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S].
- [6] 骆爱英, 刘风云. 舰船行业环境试验标准实施分析[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 105-107.
- [7] 李岳, 毕明树, 王淑兰, 等. 处理易燃易爆气体设备安全设计[J]. 石油化工设备, 2002, 31(2): 30-33.
- [8] 徐刚. 论防爆电气设备选型与安全应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2009, 29(1): 13-20.
- [9] 陈学敏. 工程中电磁阀的应用探讨[J]. 石油化工自动化, 2009, 45(4): 58-61.
- [10] 任峰志. 冲压发动机中燃料/空气换热器设计方法研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] 姚志成, 李磊, 吴圣. 可靠性增长技术在某型气体转换阀上的应用[J]. 航空标准化与质量, 2007(1): 34-36.
- [12] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [13] 王忠, 陈晖, 张铮, 等. 环境试验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [14] 郭振华, 王忠. 机载电子产品爆炸性大气试验方法研究[J]. 环境技术, 2012(6): 23-26.
- [15] 哈兰. 爆炸性气体环境危险区域数值模拟辅助划分方法研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2008.