

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.01.005

引爆装置长期储存失效研究^{*}

丁跃伟 赵洪海 程 涛 同作龙

陕西应用物理化学研究所(陕西西安,710061)

[摘 要] 为提升火工品的作用可靠性,探索储存环境对火工品性能的影响,依据有关标准对某引爆装置进行了长期储存试验。试验结果显示,该引爆装置在高温储存试验后出现了电阻超差现象。采用故障树分析法对失效模式与失效机理进行了分析。研究表明,长期的湿热环境引起了金属焊锡丝、桥丝、脚线界面应力的差异,使得虚焊焊点瑕疵放大,导致电阻超差,从而失效。

[关键词] 火工品;引爆装置;高温储存;加速寿命试验;失效

[分类号] TQ560.7;TH-39

Study on Failure of an Initiating Device in Long-Time Storage

DING Yuewei, ZHAO Honghai, CHENG Tao, TONG Zuolong

Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute (Shaanxi xi'an, 710061)

[ABSTRACT] In order to improve the reliability of initiating devices and explore the influence of storage environment on their performances, the storage test of an initiating device was carried out according to relevant standards. Results show that the resistance of the initiating device is out of tolerance after the high temperature storage test. The failure mode and failure mechanism were analyzed by fault tree analysis. It shows that the long-term humid and hot environment has caused the difference in the interface stress of metal solder wire, bridge wire and pin wire, which magnifies the defects of the faulty solder joint, leading to the excessive resistance and failure.

[KEYWORDS] initiators & pyrotechnics; initiating device; high temperature storage; accelerated life test; failure

引言

火工品的寿命历程一般包括制造、交付、装卸、运输、装配、勤务处理、储存、使用、退出使用或报废等事件,在使用前的绝大部分时间都是处于储存状态。对于军用火工品,储存时间至少为 15 a^[1]。在储存过程中,环境因素(如温度、湿度)的影响可能造成火工品的参数漂移、性能退化甚至失效^[2-6]。火工品在环境因素影响下产生的性能变化包含两个方面:一是火工品的作用可靠性,即火工品在受到指定的能量刺激下能够可靠发火,完成设计目标;二是火工品的使用安全性^[7-8],即火工品在勤务处理或复杂环境(如电磁环境)下不发生意外发火等安全事故。为保证火工品使用的安全性和可靠性,研究它在储存过程中的性能变化十分必要。

常用的火工品储存试验方法有两种。一种是自

然储存试验。这种方法最接近真实状态,数据最为准确;但会耗费巨大的人力、物力与时间。且随着长寿命元器件的出现,采用常规自然储存试验,有时甚至是不可能的。另一种是加速寿命试验。通过加大应力的方法促使退化过程加速,使样品在短期内失效,很大程度上缩短了试验的时间,提高了试验的效率,降低了试验的成本。加速寿命试验的基本原理是在不改变元器件失效机理的前提下,通过适当提高诱发器件失效的应力条件(温度、湿度、振动等中的一种或几种的组合)来加速元器件的退化或者失效。本文中,在自然储存的基础上进行加速老化试验,对某引爆装置进行储存寿命研究。

1 试验设计

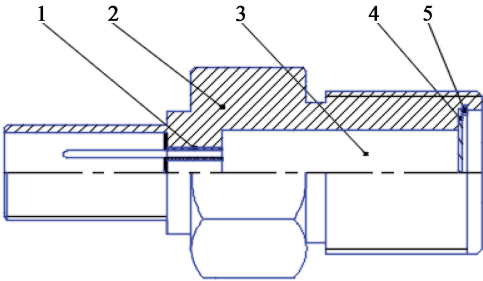
1.1 试验样品

引爆装置由壳体、双桥电雷管、垫片、挡圈等零

* 收稿日期:2021-06-14

第一作者:丁跃伟(1976-),男,硕士,高工,主要从事火工装置技术的研究。E-mail:xieruizhen@126.com

部件组成。双桥电雷管是核心组成部分,由电极塞、桥丝、壳体、输出底帽等组成。桥丝材料为 NiCr。引爆装置已经自然储存 12 a,结构见图 1。



1 - 套管;2 - 壳体;3 - 双桥电雷管;4 - 垫片;5 - 挡圈。

图 1 引爆装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of the detonating device

该引爆装置的作用原理:当接收到预定起爆能量之后,桥丝温度升高,起爆与桥丝紧密接触的始发装药,引爆中间装药、输出装药,爆轰能量逐级放大,最终输出威力可完全起爆下级聚能切割索。

1.2 试验仪器

HT201 型低温恒温恒湿试验箱,重庆五环试验仪器有限公司;DMM4050 型电阻测试仪,美国泰克公司;VEGATS5136 型扫描电镜,捷克泰思肯公司。

1.3 试验方法及试验项目

GJB 736. 8—1990《火工品试验方法 71 ℃ 试验法》是国内常用的一种火工品加速储存寿命试验方法,利用加速度系数,由高温下的试验时间推算常温下的储存寿命。而火工品实际储存环境包括温度和湿度两个因素,陕西应用物理化学研究所的企业标准 Q/AH 0180—1993 《火工品加速寿命试验 高温高湿试验法》给出了基于温度、湿度的双因素加速寿命试验方法。为了更准确地考核引爆装置的储存寿命,采用的加速试验时间根据 GJB 736. 8—1990 《火工品试验方法 71 ℃ 试验法》中的确定,试验条件按照 Q/AH 0180—1993 《火工品加速寿命试验 高温高湿试验法》中的确定,即温度 71 ℃、相对湿度 95% 时,加速储存 21 d。

试验样品为 30 发,试验周期 21 d,每 7 d 取出试验样品进行电阻测试、形貌检查。样品取出后,在常温干燥器内放置 24 h,再进行相关测试。测试完毕,样品重新放入低温恒温恒湿试验箱进行储存。

2 结果及分析

2.1 试验结果

试验样品为 30 发,在高温储存 21 d 后,有 1 发产品出现了电阻超差。表 1 给出了 71 ℃、相对湿度

95% 试验条件下产生电阻超差的故障产品的电阻的测量结果。引爆装置采用了双桥冗余设计,两个桥丝的电阻分别为电阻 I、电阻 II。

表 1 故障产品电阻检测

Tab. 1 Resistance detection of faulty products

Ω			
序号	电阻 I	电阻 II	备注
1 [#]	2. 31	2. 33	试验前测试
2 [#]	2. 30	2. 33	试验 7 d 后测试
3 [#]	2. 31	2. 40	试验 14 d 后测试
4 [#]	2. 31	4. 01	试验 21 d 后测试

从表 1 可以看出,在进行完加速储存试验后,故障产品电阻突然增大,跟试验前的电阻相比较,出现了显著性差异,从 2. 33 Ω 变为 4. 01 Ω。采用解剖分析、扫描电镜等手段对故障原因进行了分析,在此基础上对失效机理进行了研究。

2.2 失效模式分析

为分析产生故障的原因,建立的产品故障树如图 2 所示。

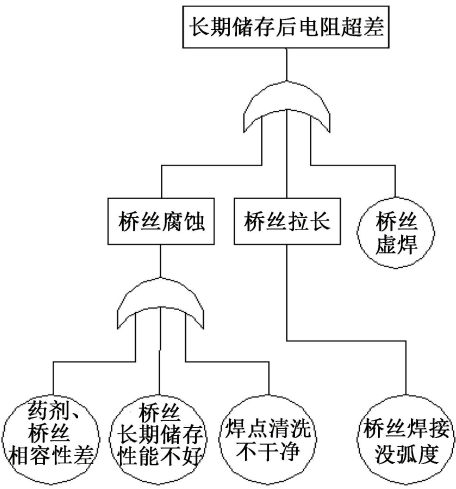


图 2 电阻超差故障树

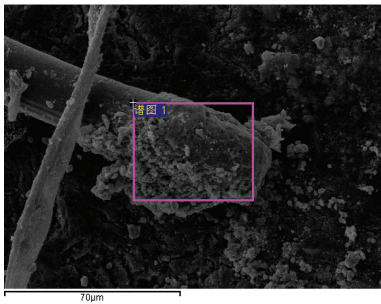
Fig. 2 Out-of-tolerance fault tree of resistance

从故障树看出,产生电阻超差有 3 个原因:

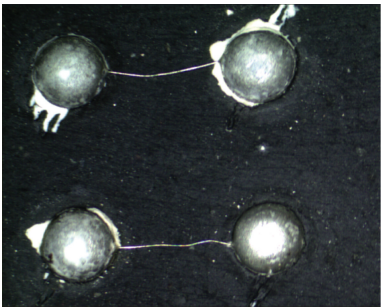
- 1) 桥丝腐蚀。桥丝腐蚀是由于在长期储存过程中材料不相容、自身长期储存性能不好、焊接过程中焊点没有清洗干净等原因造成的。腐蚀后,桥丝电阻变大。
- 2) 桥丝拉长。在焊接过程中桥丝没有弧度,试验过程中桥丝受应力作用拉长,造成电阻超差。
- 3) 桥丝焊接质量不好。在高温储存试验过程中,桥丝与焊点的热膨胀系数有一定的差异,造成桥丝与焊点间虚焊,从而造成电阻超差。

该引爆装置所用桥丝为 6J10 镍铬合金丝;与桥丝接触的药剂为氮化铅,为火工品常用药剂,自身长期储存性能好;且 6J10 桥丝与氮化铅之间的相容性满足要求,不会出现由于自身长期储存性能不好而腐蚀的现象。

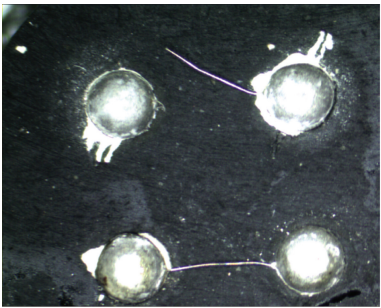
对故障产品解剖后,采用扫描电镜和能谱分析对故障桥丝焊点处进行测试(图 3)。从图 3(a)可以看出,桥丝端头没有出现被拉断或腐蚀现象,验证了电阻超差是由于化学反应引起的。从图 3(b)能谱图看出:焊点处主要成分为 Sn、Pb、Ni、Cr,这是金属焊锡丝和桥丝的主要成分;没有检测出助焊剂的主要成分 Cl,表明该焊点焊接完成之后清洗干净,无氯离子残留。故排除了由于焊液未清洗干净而引起腐蚀造成的电阻超差。



(a)扫描电镜照片



(a)正常桥丝



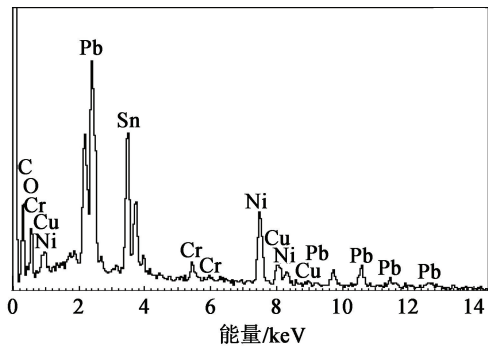
(b)故障桥丝

图 4 桥丝扫描电镜图

Fig. 4 SEM images of the bridge wire



(a)扫描电镜照片



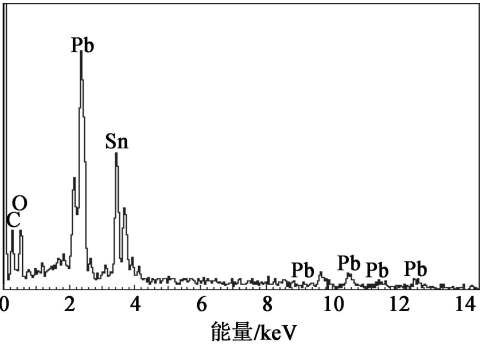
(b)能谱图

图 3 焊点处桥丝扫描电镜照片与能谱图

Fig. 3 SEM image and energy spectrum of solder joint of the bridge wire

在清理桥丝表面药剂过程中,故障桥丝一端从焊点处脱落。对故障桥丝与正常桥丝的长度与横截面面积进行了测量,两者的横截面面积与长度均一致。扫描电镜照片如图 4 所示。从图 4 也可以看出,故障桥丝与正常桥丝外观上没有显著差异。

用扫描电镜对脱落桥丝的端头与桥丝焊点处进行形貌及能谱分析(图 5)。从图 5(b)可以看出,主要成分为 Sn、Pb,为金属焊锡丝的主要成分,无桥丝的成分 Ni、Cr。故焊点处没有残余桥丝成分,表明



(b)能谱图

图 5 脱落桥丝焊点处的扫描电镜照片与能谱图

Fig. 5 SEM image and energy spectrum of solder joint of the falling bridge wire

桥丝端头不是被拉断或腐蚀,桥丝是在清理表面火工药剂时受到外力作用后从焊点处自由脱离的。

通过对图 3~ 图 5 结果的分析,可以判定引爆装

置电阻超差是由于桥丝虚焊引起的。

2.3 失效机理分析

桥丝与引爆装置脚线焊接通过软钎料润湿结合金属表面,利用扩散作用在界面产生合金层(金属间化合物),从而结成一体。润湿是指软钎料借助毛细管现象在接合金属表面上充分铺展开。为使熔融的软钎料润湿固体金属表面,被焊金属表面必须是洁净的,这样软钎料与被接合的基体金属的原子间距离才能接近到原子间力作用的程度。接合过程中,在发生润湿现象后立即伴有扩散作用,因而形成了界面层或合金层。扩散是指晶格中金属原子从一个晶格向其他晶格自由移动,移动的速度及数量与温度和时间有关。由扩散而形成的合金层,对接合部的物理、化学性能,特别是机械性能、抗蚀性能有很大的影响。扩散数量与浓度梯度、扩散系数、扩散面积、扩散时间等有关。

因此,引起虚焊的条件:1)脚线、桥丝表面不洁净,表面氧化既不发生润湿又不发生扩散;2)焊接温度偏低或焊接时间偏短。

从图 3、图 5 中可以看出,桥丝端头没有被拉断或腐蚀,且未出现焊液成分。因此,判断引起桥丝虚焊的原因是焊接温度偏低或者焊接时间偏短。长期储存前,桥丝焊点光滑圆润,有一定弧度,电阻正常。在长时间高温、高湿环境加载下,尤其是多次湿热环境加载下,因桥丝与焊点的热膨胀系数有微小的差别,桥丝受热应力的影响造成焊接瑕疵部分被放大,开始表现为电阻逐渐增大至出现电阻超差,进而表现为桥丝与焊点接合松动,最终桥丝从焊点处脱开,桥丝连接开路,造成失效。

3 结论及建议

依据 Q/AH 0180—1993《火工品加速寿命试验高温高湿试验法》和 GJB 736.8—1990《火工品试验方法 71℃试验法》对某引爆装置进行了储存试验。结果显示,该引爆装置在高温储存试验后出现电阻超差现象,表明:高温、高湿环境引起的界面应力差异使得产品微缺陷放大,以致性能参数发生改变。

采用故障树分析法、扫描电镜测试、能谱测试等对失效模式与失效机理进行了分析,表明电阻超差带来的失效是在湿热环境应力加载下由虚焊引起的焊点瑕疵放大造成的。通过对失效机理的分析,获得失效原因是焊接温度偏低或焊接时间偏短。

依据失效模式、失效机理的分析,结合该失效模式在生产和试验过程检测难度较大的情况,建议:

1)焊接前进行电极塞脚线端、桥丝的可焊性测试;2)进一步完善工序传递规范、焊接流程与工艺,提升焊接的自动化程度;3)在生产和装配过程中,对完成的焊桥进行一定周期的高温老化试验。

参 考 文 献

[1] 王凯民,温玉全. 军用工工品设计技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
WANG K M, WEN Y Q. Design of initiators and pyrotechnics for weapon systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[2] 涂小珍,周美林,张巍耀,等. 材料老化对火工品性能影响研究[J]. 火工品, 2017(4): 16-18.
TU X Z, ZHOU M L, ZHANG W Y, et al. Effect of materials aging on the performance of some initiator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(4): 16-18.

[3] FOLTZ M F. Aging of pentaerythritol tetranitrate (PETN): LLNL-TR-415057[R]. Livermore, CA, US: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009.

[4] 李芳,张蕊,都振华,等. 不同贮存环境下 SCB 电极塞的失效机理[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 168-172.
LI F, ZHANG R, DU Z H, et al. Failure mechanism of SCB electrode plugs under different storage conditions[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(2): 168-172.

[5] 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, 30.
ZHANG F G, CUI X T, HONG L. Influencing factor analysis of storage life of missile initiating explosive devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27, 30.

[6] 侯晓静,黄少波,唐顺厚. 某点火器贮存寿命研究[J]. 火工品, 2014(2): 1-4.
HOU X J, HUANG S B, TANG S H. The research on storage life of igniter[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(2): 1-4.

[7] 李陵,但波,倪保航,等. 火工品安全性影响因素分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(5): 545-548.
LI L, DAN B, NI B H, et al. Analysis on the safety influence factors of pyrotechnics[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(5): 545-548.

[8] BUTLER J K. The cardinal rule of explosives safety[J]. Journal of Chemical Health & Safety, 2014, 21(3): 16-21.