

文章编号: 1003-1480 (2009) 05-0030-05

# 某火箭弹长期贮存后点火回路异常原因剖析

樊雪锋, 杜国秀

(中国船舶重工集团公司第七一 研究所, 湖北 宜昌, 443003)

**摘 要:** 为解决某火箭弹长期贮存后因点火回路失效造成火箭弹发射失败的问题, 使用 FMECA 及 FTA 分析了点火回路的失效原因, 提出了可疑故障点检测方法, 并结合数据统计的分析结果, 确定故障点为发动机中电点火头的批次性质量问题。实弹的解剖分析证明了此分析的准确性, 为火箭弹的生产过程质量控制提供了依据。

**关键词:** 电点火头; 火箭发动机; 长期贮存; 点火回路; 失效

中图分类号: TJ45<sup>+</sup>4 文献标识码: A

## Analysis on the Abnormal Ignition System in the Long-term Stored Rocket Projectile

FAN Xue-feng, DU Guo-xiu

(CSIC-NO.710 Research Institute, Yichang, 443003)

**Abstract:** For solving the launching failure problem of rocket projectile, which has been stored for long-term, the failure reason of the ignition system is analyzed using FMECA and FTA, and the detection method of the doubtful fault positions is proposed. Then the batch quality problem of the electric igniter in the engine is confirmed, by referring the analytical result of data statistic. The veracity of the analytical method is proved by anatomizing and analyzing the rocket projectile. The evidence of the quality control in the production for the rocket is offered.

**Key words:** Electric igniter; Rocket engine; Long-term storage; Ignition system; Failure

火箭弹发动机中的电点火头为发动机提供点火能源, 实现其点火功能。存储某部队 2~3a 后的某火箭弹在试验中出现了多枚点火回路阻值变大甚至无穷大的现象, 导致火箭弹发射失效。本文采用 FMECA (故障模式影响和危害分析) 和 FTA (故障树分析) 分析方法, 研究得到该点火回路在长期贮存后引起瞎火失效的原因为电点火头失效, 该结果为从根本上提高某火箭弹贮存可靠性提供了依据。故障弹解剖以及贮存试验结果分析也证实了分析的准确性。

FMECA 和 FTA 是用来分析系统故障 (或失效) 原因和结果之间关系的主要方法。FMECA 按照规定失效分析项目进行填表分析, 因果关系简单、明确、不漏项, 便于找出该火箭弹中最易导致点火回路失效的影响因素。FTA 适宜进行多因素、多层次复杂关系

的因果分析, 还能分析出除该火箭弹以外的其它因素 (如环境温、湿度和人为的一些失误因素等) 对点火回路的影响。合理地利用 FMECA 和 FTA, 能较完善地分析导致点火回路失效的各个影响因素, 并根据重要度分析的结果, 评价出哪些影响因素的存在更易导致点火回路的失效, 以及通过对哪个因素的控制, 就能最大限度地控制点火回路的失效<sup>[1-3]</sup>。

## 1 故障分析

### 1.1 长期贮存后点火回路异常的 FMECA 分析

#### 1.1.1 点火回路及贮存环境描述

某火箭弹工作电路原理如图 1 所示。

收稿日期: 2009-07-07

作者简介: 樊雪锋 (1976-), 男, 工程师, 从事火箭弹设计工作。

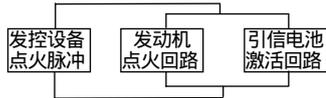


图1 某火箭弹工作电路原理图

Fig.1 Diagram of ignition system of rocket projectile

某火箭弹点火回路由插头、电缆、电点火头、导电螺柱、引信热电池等组成，工作时插头与发控设备上的插座连接，由发控设备提供点火脉冲。电点火头与黑火药一起装于赛璐珞材料制成的药盒中，用于点燃固体火箭发动机的推进剂；电点火头与电缆焊接在导电螺柱上，焊点及导线裸露处用胶与环境隔绝；发动机尾部用堵盖密封。发动机结构见图2，电点火头结构见图3。

某火箭弹外套泡沫塑料后装入塑料包装筒中，再放入木箱，未采取特别的防潮措施。

1.1.2 点火回路 FMECA 分析

针对某火箭弹长期贮存后点火回路异常现象，对点火回路的各组成元件按 FMECA 表进行分析，结果见表1。

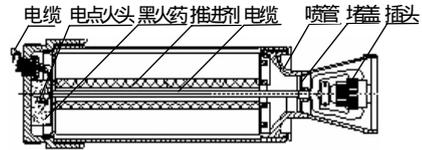


图2 某火箭弹发动机结构

Fig.2 Structural schematic of engine of rocket projectile

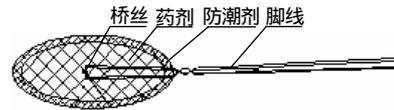


图3 电点火头的结构

Fig.3 Schematic of electric ignitor structure

表1 某火箭弹长期贮存后点火回路异常的 FMECA 表  
Tab.1 FMECA of abnormal ignition system in long-term stored rocket projectile

部件名称	功能	失效模式	失效原因	任务剖面	失效影响		检测方法	预防措施	严酷度类别
					局部	最终			
插头	与点火设备连接	1.插针锈蚀	受潮	贮存阶段	回路电阻不合格	瞎火	目测 手触检查	密封包装贮存 加强装配工艺过程控制	
		2.插针松动	尾夹夹持不紧	生产阶段					
黑火药	点燃做功	点不燃	药剂受潮，含水量过大	生产阶段	药剂不发火	瞎火	药剂成分及含水量分析	1.加强装配工艺过程控制 2.密封包装贮存	
				贮存阶段					
脚线	固定桥丝构成回路	1.与桥丝接触不良 2.被腐蚀变细，回路电阻变大	1.焊冒被腐蚀 2.桥丝焊接不牢，脚线受力不合理 脚线芯线裸露	贮存阶段	回路电阻不合格	瞎火	测电阻	1.加强焊桥质量管理，焊桥后焊液清洗干净； 2.控制装配工艺和用力	
				生产阶段					
				生产阶段					
桥丝	电热转换加热药剂	1.断桥	1.药剂变质膨胀 2.脚线受力不合理 3.药头受损不	贮存阶段	不能将电能转换为热能	瞎火	测电阻	1.对电点火头密封贮存 2.控制装配工艺和用力 3.防止药头受震	
				生产阶段					
电点火头		2.被腐蚀变细，通电时断桥，点火头不发火	1.残留导电腐蚀 2.药剂及靶变质腐蚀	贮存阶段	通电桥丝断	瞎火	测电阻 X 光无损检测	1.焊桥后将焊液清洗干净 2.对电点火头密封贮存	
				贮存阶段					
药剂	点燃做功	1.点不燃	1.药剂受潮，含水量过大 2.药剂及靶变质 3.药头药剂分层，感度降低	贮存阶段	药剂不发火	瞎火	药剂成分及含水量分析	1.密封包装贮存 2.提高混药质量，混药过程中及时搅拌均匀防止药剂分层	
				生产阶段					
		2.熄火	1.药头药剂分层，感度降低	生产阶段	药剂不发火	瞎火	药剂成分分析	提高混药质量，混药过程中及时搅拌均匀防止药剂分层	
防潮漆	包裹药剂，起防潮作用	不能完全防潮，药剂受潮	1.防潮性不良； 2.防潮漆脱落	生产阶段	药剂不发火	瞎火	1.防潮漆防潮性能分析； 2. X 光无损检测	1.选择性能好的防潮漆 2.装配时防止磕碰掉漆	

从表1可以得到导致某火箭弹长期贮存后点火异常的各元部件的失效模式，同时分析出各个失效模式的影响因素、检测方法以及预防这些影响因素的控制措施。FMECA 还从任务剖面上分析出导致某火箭弹贮存后点火异常的原因来自于贮存、运输、生产各阶段。

1.2 点火回路异常的 FTA 分析

实际上导致该点火回路异常的影响因素是多方面、多层次的，同一影响因素还可能导致多种失效模式的出现。FMECA 仅分析出了各个组成元部件的失效对该点火回路系统失效的影响，为了全面分析出导致某火箭弹长期贮存后点火回路异常的影响因素，对

点火回路进行 FTA 分析。

1.2.1 建立故障树

某火箭弹的发火过程是：该火箭弹插头与发控设备连通，通过系统给火箭弹通电，发动机内的电点火头在电流的作用下做功点燃药盒内的黑火药，从而点燃发动机主装药，主装药燃烧所产生的动力将该火箭弹运送到预定的位置。从发火过程分析，整个回路电

阻合格与否以及药剂能否被点燃，是决定火箭弹发火成功的直接影响因素。下面就以某火箭弹长期贮存后点火回路异常作为故障树的顶事件，以回路电阻不合格、药剂未点燃作为顶事件的直接影响因素，建立故障树，如图 4 所示。

表 2 为其相应的基本事件表。

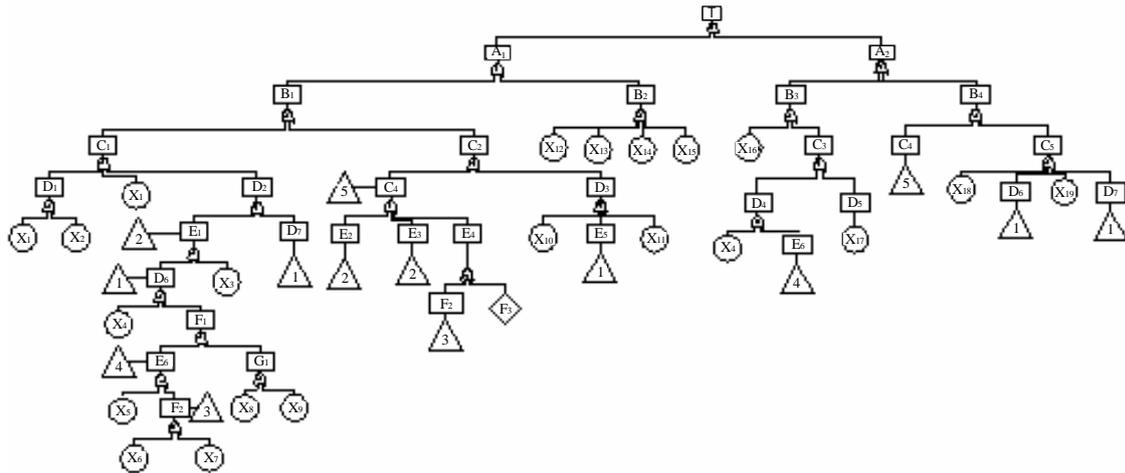


图 4 某火箭弹贮存后点火回路异常 FTA  
Fig.4 FTA of abnormal ignition system

表 2 某火箭弹长期贮存后点火回路异常故障树事件名称表序号  
Tab.2 FTA event name and sequence of abnormal ignition system

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
47 A2	电点火头阻值合格但发火瞎火	46 A1	回路阻值异常
45 B4	电点火头故障	44 B3	黑火药未点燃
43 B2	接口故障	42 B1	电点火头阻值增大
41 C5	电点火头药剂未点燃	40 C4	桥丝被腐蚀
39 C3	黑火药吸湿	38 C2	药剂吸湿变质
37 C1	脚线与桥丝接触不良	36 D7	桥丝电阻不合格
35 D6	药剂吸湿	34 D5	装配过程吸湿
33 D4	贮存过程吸湿	32 D3	桥丝断
31 D2	焊帽被腐蚀	30 D1	脚线与桥丝脱离接触
29 E6	发动机不密封	28 E5	药剂变质膨胀撑断桥丝
27 E4	发动机中有害气体腐蚀桥丝	26 E3	药剂变质腐蚀桥丝
25 E2	焊液腐蚀桥丝	24 E1	焊液腐蚀焊帽
23 F3	电点火头与推进剂环境不相容	22 F2	药盒不密封
21 F1	电点火头贮存密封性不好	20 G1	电点火头自身不密封
19 X19	蘸药头时药剂分层、感度降低	18 X18	桥丝和药剂间有较大间隙
17 X17	装配环境湿度大	16 X16	电点火头未埋入药剂
15 X15	线缆断线	14 X14	插针锈蚀
13 X13	插针松动	12 X12	接口虚焊漏检
11 X11	药头受损	10 X10	脚线受力不当
9 X9	防潮漆防潮性不好	8 X8	药头装入药盒时掉漆
7 X7	贮存时间长后药盒变质	6 X6	本体胶未封严
5 X5	封盖不密封	4 X4	贮存环境湿度大
3 X3	残留焊液未洗净	2 X2	桥丝焊接不牢
1 X1	桥丝虚焊、漏检		

1.2.2 定性分析

a 求最小割集

根据故障树图用上行法利用布尔代数化简，得出

该故障树的结构函数如下：

最底层  $F2=X6 X7$ ；

上 1 层  $E6=X5 F2=X5 (X6 X7)$

$= (X5 X6) (X5 X7), G1=X8 X9$ ；

上 2 层  $F1=E6 G1=(X5 X6) (X5 X7)$

$X8 X9$ ；

上 3 层  $D6=X4 F1$

$= (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9)$ ；

上 4 层  $E1=D6 X3=(X4 X5 X6) (X4$

$X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3, D7=E5=D6, E2=E3=E1, E4=F2 F3$ ；

上 5 层  $D1=X1 X2, D2=E1 D7=E1, C4=E2$

$E3 E4=(X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3,$

$D3=X10 E5 X11=X10 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X11, D4=X4$

$E6=X4 (X5 X6) (X5 X7) = (X4 X5$

$X6) (X4 X5 X7), D5=X17$ ；

上6层 C1=D1 X1 D2=X1 X2 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3, C2=C4 D3=(X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3 X10 X11, C3=D4 D5=(X4 X5 X6) (X4 X5 X7) X17; C5=X18 X19 D6 D7=X18 X19 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9);

上7层 B1=C1 C2=X1 X2 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3 X10 X11; B2=X12 X13 X14 X15; B3=X16 C3=X16 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) X17; B4=C4 C5=(X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3 X18 X19;

上8层 A1=B1 B2=X1 X2 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X3 X10 X11 X12 X13 X14 X15, A2=B3 B4=X16 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) X17 (X4 X8) (X4 X9) X3 X18 X19;

最顶层 T=A1 A2=X1 (X4 X5 X6) (X4 X5 X7) (X4 X8) (X4 X9) X10 X11 X12 X13 X14 X15 X16 X17 X18 X19。

从上面的结构函数得该故障树的最小割集有 15 种 ([X4, X8]、[X4, X9]、[X4, X5, X6]、[X4, X5, X7]、[X1]、[X10]、[X11]、[X12]、[X13]、[X14]、[X15]、[X16]、[X17]、[X18]、[X19])，即导致该火箭弹贮存后点火异常的原因有这 15 种可能：电点火头桥丝虚焊而在检测中未被检测出、电点火头药头受损、回路接口虚焊漏检、插头的插针松动、插头的插针锈蚀、回路线缆断线、电点火头未埋入药剂、装配环境湿度大、电点火头桥丝和药剂间有较大间隙、电点火头生产过程中蘸药头时药剂分层使敏感度降低；另外两种原因是由两种因素组合在一起造成某火箭弹贮存后点火异常，即贮存环境湿度大与电点火头装入药盒时药头掉漆两者的组合，及贮存环境湿度大与电点火头防潮漆防潮性不好两者的组合；还有两种原因是由 3 种因素组合在一起造成某火箭弹贮存后点火异常，即贮存环境湿度大、封盖不密封、药盒赛璐珞本体胶未封严 3 者的组合，及贮存环境湿度大、封盖不密封、贮

存时间长后药盒变质三者的组合。在故障树结构中共有 17 种基本事件，然而在定性分析某火箭弹贮存后点火异常的影响因素的结果中，未出现基本事件桥丝焊接不牢和残留焊液未清洗净。这不是说这两种基本事件对某火箭弹贮存后点火异常没有影响，而是因为只有药剂吸湿，焊液中的 Cl 才对桥丝和焊帽具有腐蚀性，也就是说只要药剂吸湿就会导致某火箭弹贮存后点火异常。同样，当脚线受力不当时，即使桥丝焊接质量好，都可能导致桥丝与脚线脱落或断桥。因此，在求最小割集的过程中，这两项被脚线受力不当和药剂吸湿合并。

b 底事件的结构重要度  $I(i)$

为了分析各个底事件对顶事件发生所产生的影响程度，以下进行底事件结构重要度分析。这里采用近似判别式近似计算各底事件的结构重要度：

$$I(\lambda) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k \frac{1}{m_j(itK_j)} \quad (1)$$

式(1)中： $K$ 为最小割集数量； $m_j(itK_j)$ 为包含在最小割集中基本事件的个数。按式(1)计算各底事件的结构重要度，见图5。

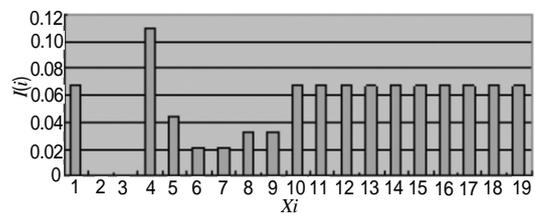


图5 结构重要度直方图

Fig.5 Histogram of structural importance

图5中纵坐标表示结构重要度，横坐标1、2、3.....、18、19分别代表底事件X1、X2、X3.....、X18、X19。从直方图可以看出，底事件X4的结构重要度最大，其次是X1、X10、X11、X12、X13、X14、X15、X16、X17、X18、X19，再次是X5，再次是X8、X9，最后是X6、X7。即贮存环境湿度大对导致某火箭弹贮存后点火异常的危害性最大；其次是电点火头桥丝虚焊而在检测中未被检测出、电点火头脚线受力不当、电点火头药头受损、电点火头桥丝和药剂间有较大间隙、电点火头生产过程中蘸药头时药剂分层使敏感度降低、回路接口虚焊漏检、插头的插针松动、插头的插针锈蚀、回路线缆断线、电点火头未埋入药剂、

装配环境湿度大；最后是药盒赛璐珞本体胶未封严、贮存时间长后药盒变质。药盒不密封的情况下，环境湿度影响最终结果，故 X7 也归结到 X4 中。

某火箭弹贮存后点火可靠性降低的可能原因综合成以下两点：（1）贮存环境的湿度不满足要求，造成电点火头吸湿后点火异常；（2）电点火头生产过程质量控制失控，电点火头的固有可靠性不够。

## 2 故障点的确定及验证

### 2.1 故障点的确定

以上分析显示贮存环境、生产过程、设计状态均影响到某火箭弹贮存后点火可靠性。因故障弹与非故障弹在贮存环境、设计状态上具有相同性，故分析所有服役中产生的故障弹的生产批次性可以为故障点的确认提供线索：若是贮存环境引起的，则所有批次中都有故障弹，且概率分布有一定的规律；若是电点火头的质量控制问题，则故障弹应集中在某批次中。

通过对火箭弹的使用数据统计以及储存仓库检测结果进行综合分析，发现使用某一固定批次电点火头生产的火箭弹长期贮存后在使用过程中因点火回路失效而导致发射失败的概率高达 16.96%；而使用除该固定批次外的其它电点火头生产的火箭弹长期贮存后，在使用过程中因点火回路失效而导致发射失败的概率仅为 0.68%。由此，确定故障点为电点火头生产过程质量控制失控，电点火头的固有可靠性不够。

### 2.2 验证

#### 2.2.1 贮存试验弹检测和解剖情况

3a 后，对贮存试验火箭弹进行了检测和解剖，发现使用与故障弹同批次电点火头的火箭弹点火回路阻值异常的故障概率为 11.8%；使用其它批次电点火头的火箭弹点火回路阻值均正常。

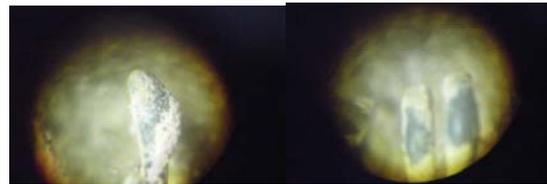
#### 2.2.2 环境湿度影响分析

在对服役故障弹实施解剖时，发现发动机内部存在少量棕黑色液体，对该液体进行分析，确定了棕黑色液体中不含水分。这表明发动机内部结构密封，外

界环境湿度不是引起电点火头阻值异常的原因。

#### 2.2.3 故障弹电点火头解剖情况

为详细了解电点火头的失效原因，对故障电点火头进行了解剖，显微镜下观察药头防潮层颜色鲜艳、外观完好；内部药剂颜色和状态正常；药头内两电极锈蚀，桥丝断桥。



(a) (b)

图6 电点火头解剖后的桥丝情况

Fig.6 Bridge wire in anatomized electric igniter

#### 2.2.4 结论

故障电点火头药头颜色鲜艳、外观完好，药剂颜色和状态正常，说明电点火头的锈蚀不是由于贮存过程中吸湿造成，而是生产过程中残留焊液未洗净造成的，属于电点火头生产过程质量控制问题。

## 3 结语

通过 FMECA 和 FTA 的分析，得到了导致某火箭弹长期贮存后点火回路异常的各个原因及原因组合、点火回路各个部件的失效模式及影响因素，以及各底事件导致顶事件发生的严重程度，为故障定位提供了依据及方向。在此基础上，通过数据统计分析，找到了故障点。后续对贮存试验故障弹的解剖结果验证了分析定位的准确性，为生产质量控制提供了依据。

### 参考文献：

- [1] 李东阳,刘占岭.火工品长期贮存失效情况分析[J].火工品, 1996(2):28-30.
- [2] 王少平编著.工程可靠性[M].北京:北京航空航天大学出版社,2000.
- [3] 涂小珍,严楠.电点火头贮存后瞎火的 FMECA 和 FTA 综合分析[J].含能材料,2004(22):362-365.