

doi: 10.7690/bgzdh.2015.01.010

## 火箭弹尾焰对炮尾点火触点的烧蚀与防护分析

王 焱<sup>1</sup>, 张春成<sup>1</sup>, 刘 女<sup>2</sup>, 李佐金<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻重庆地区军代局, 成都 610110; 2. 中国兵器装备集团第一六七厂, 成都 610110)

**摘要:** 针对火箭弹尾焰引起的炮尾点火触点的烧蚀的问题, 建立一种火箭弹尾焰对炮尾点火触点的烧蚀与防护的有限元模型。对点火触点工作环境、受高温烧蚀情态和防护措施都进行了论述和分析, 且用实验进行了验证。验证结果表明: 点火触点选用 40Cr 作为材料, 并进行镀铬处理, 在射击过程中点火触点经受住了机械损伤、以及高温烧蚀, 未见异常。

**关键词:** 火箭弹; 尾焰; 烧蚀; 有限元分析

**中图分类号:** TJ415 **文献标志码:** A

## Analysis of Rocket Breech Ignition Contact Ablation and Protection Against Breech Flash

Wang Ye<sup>1</sup>, Zhang Chuncheng<sup>1</sup>, Liu Nv<sup>2</sup>, Li Zuojin<sup>2</sup>

(1. PLA Military Presentation Bureau in Chongqing District, Naval Armament Department, Chengdu 610110, China; 2. No. 167 Factory, China Ordnance Equipment Group Corporation, Chengdu 610110, China)

**Abstract:** This paper focuses on the rocket breech ignition contact ablations caused by the breech flash, to establish a finite element model of ablation and protection for rocket breech flash against rocket breech ignition contact. The discussion and analysis of working environment, ablation under high temperature and protection measures of ignition contact were taken, and with tests carried out for verification. The verification results show that the ignition contact, choosing the 40Cr as ignition contact material with chromate finish, withstands the mechanical damage, ablation at high temperature, without abnormal conditions.

**Keywords:** rocket; breech flash; ablation; finite element analysis

## 0 引言

多管火箭炮以其火力猛、机动性好等特点, 一直备受世界各国青睐, 并作为主要武器装备之一大力发展。火箭炮设计采用无后坐炮的发射原理, 在射击过程中, 膛内的火药气体一方面推动弹丸向前运动, 另一方面又从炮尾喷管中高速流出。由于部分火药气体的流出, 不可避免地带来了一个问题: 射击时炮尾形成一个火焰区, 而且火焰对火箭炮尾部的点火触点容易造成烧蚀, 可能影响点火触点工作的可靠性和使用寿命。基于此, 笔者结合实际研制工作情况, 就某型火箭炮发射时火箭弹尾焰对点火触点的烧蚀情况进行分析。

## 1 发火触点工作环境

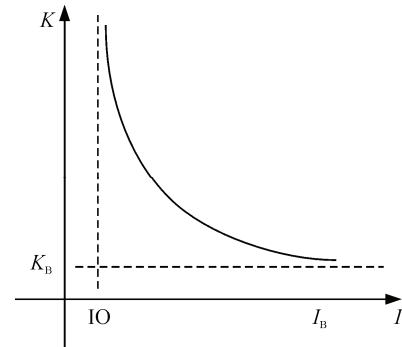
某火箭炮采用电点火方式击发, 其点火电流  $I \geq 4.5 \text{ A}$ , 点火脉冲宽度  $\geq 30 \text{ ms}$ 。火箭弹电点火具的发火原理为: 电点火具为了使火药达到被引燃的最低温度, 则通电后的灼热桥丝所产生并传递给引火药的热量应累计达到大于引火药分子所需要的小

的热量。对于通电后的灼热桥丝所产生的热量可以由下式表示:

$$Q=0.24I^2Rt$$

经过变换形式  $Q/0.24R=I^2t=K$ ,  $K$  为点火冲量,  $KI=C$  (其中  $C$  为常数, 与点火具类型有关,  $KI$  成反比例关系)。

当经过一定时间, 达到火药分子所需要的点火冲量时, 电流值是逐渐减小的, 其  $K-I$  曲线是双曲线, 如图 1 所示。

图 1  $K-I$  曲线

收稿日期: 2014-08-11; 修回日期: 2014-09-15

作者简介: 王 焱(1974-), 男, 山西人, 研究生, 高级工程师, 从事兵器装备质量监造研究。

其中垂直渐进线对应的电流  $I/O$  为最大安全电流,  $I_B$  为最小冲量时对应的电流, 水平渐进线对应  $K_B$  为最小冲量值。

发火元件的内阻都是小值, 一般为几欧姆。此处取值根据实际情况为  $1.6 \Omega$ ;  $t=30 \times 10^{-3} s$ 。根据  $Q=0.24I^2Rt$  可以计算出引燃点火药所需要的最小热量为:

$$Q=0.24 \times 0.45^2 \times 1.6 \times 30 \text{ ms} = 2.33 \times 10^{-3} \text{ J}$$

$$K=I^2t=0.45^2 \times 30 \text{ ms} = 6.07 \times 10^{-3}$$

由于热传递, 电流热作用传给点火触点的热量为  $2.33 \times 10^{-3} \text{ J}$  (不计算热损失), 此数值非常小, 不会对点火触点产生烧蚀作用。发射火箭弹瞬间, 尾部火焰温度可达上千度, 因此主要考虑在瞬间高温作用下, 触点的变化情况。

## 2 触点工作运动及受热和散热分析

### 2.1 相关零件运动规律分析

该火箭炮尾部相关零部件主要有炮尾壳体、弹尾部导电环、卡弹制止器、点火触点等 (见图 2), 当进行发射时, 点火触点与导电环接通, 火箭弹在定向管内向前运动, 火箭弹的后喷高温瞬时火焰, 会对点火触点造成烧蚀。此处对后喷火焰造成的烧蚀作用进行分析计算。

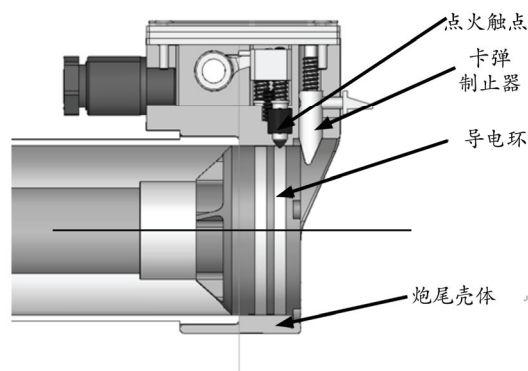


图 2 点火触点结构

#### 2.1.1 火箭弹向前运动规律

火箭弹发射初始运动及火焰烧蚀效果如图 3。

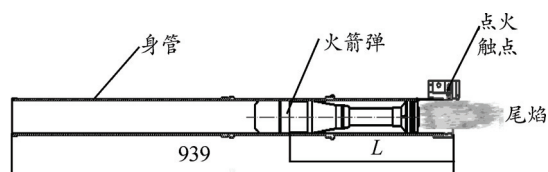


图 3 发射后火箭弹的运动和火焰烧蚀

火药气体状态方程如下:

$$sp(l+l_{\psi}) = RT\omega(\psi - \eta) = f\tau\omega(\psi - \eta)$$

其中

$$\tau = \frac{T}{T_1} = \frac{RT}{f}$$

各参量的含义分别为: 温度  $T$ 、 $T_1$ ; 气体常数  $R$ ; 火药力  $f$ ; 装药量  $\omega$ ; 火药燃去百分数  $\psi$ ; 气体相对流量  $\eta$ ; 炮膛横断面积  $S$ ; 膛压  $p$ ; 行程长  $l$ ; 药室容积缩颈长  $l_{\psi}$ 。

在整个射击过程中, 随着时间变化气体流量不断的减少, 同时, 一部分气体随弹丸向前运动, 另一部分向喷管方向运动, 形成了 2 个相反方向的气流。两股气流之间存在速度为 0 的滞止点, 气体从喷管中流出的速度总是大于弹丸运动的速度, 所以该滞止点随弹丸的运动从弹底向炮膛中间移动。在这 2 种气流作用下, 必然有某一时刻膛内压力最大, 火药气体燃烧温度最高的点, 随后气流压力逐渐减小, 温度越来越低。上述对运动规律公式的分析, 压力最大温度最高的时刻出现在发射后某一时刻, 此处为 4 ms 前后。该数据可从温度与时间变化图中确定出, 证实在 4 ms 时刻, 温度达到了最大值, 见图 4。

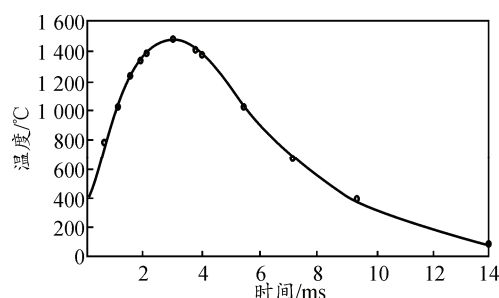


图 4 气流温度随时间变化

#### 2.1.2 点火触点向下运动规律

当装弹完成后, 触点与弹尾导电环接触, 弹簧受一定的压力, 被压紧, 当点火发射火箭弹后, 弹簧压缩做功, 将触点推出, 突出在身管内。点火触点尺寸连如图 5 所示。

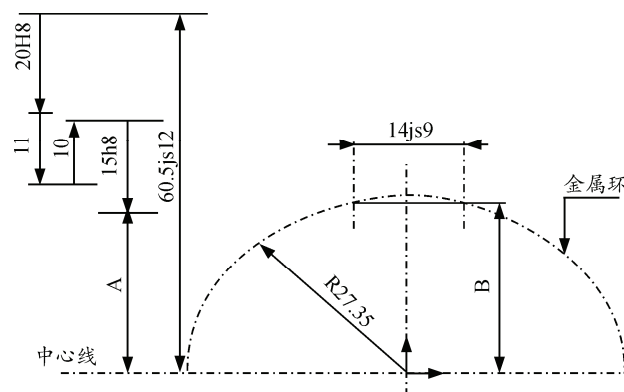


图 5 点火触点尺寸链

火箭弹发射后, 点火触点伸出量, 通过尺寸链计算如下:

点火触点顶点距炮管中心线的距离:

$$ES(A)=(60.5+0.15)-20-(11-0.35)+(10+0.29)-(15-0.027)=25.317$$

$$EI(A)=(60.5-0.15)-(20+0.033)-(11+0.35)+(10-0.29)-15=23.677$$

点火触点顶点处弹尾金属环距炮管中心线的距离:

$$ES(B)=\{27.352-[(14-0.021)/2]^2\}^{1/2}=26.442$$

$$EI(B)=\{27.352-[(14+0.021)/2]^2\}^{1/2}=26.436$$

点火触点弹簧压缩量:

$$\text{最大: } H_1=26.442-23.677=2.765 \text{ mm}$$

$$\text{最小: } H_1=26.436-25.317=1.119 \text{ mm}$$

其间, 弹簧受力情况, 可通过胡克定律进行计算(不考虑摩擦影响), 由公式  $F=kx$  ( $k=1.18$ ,  $x$  为弹簧变形量) 得:

$$F=kx=1.18 \times (2.765-1.119)=1.94 \times 10^{-3} \text{ N}$$

但因为火药气流的冲击作用, 触点并不完全遵循胡克定律, 而会随着气流的跳动形成震荡曲线, 最终逐渐平稳。

### 2.1.3 点火触点被火焰烧蚀的时间分析

从点火触点最小伸出量到最大伸出量、温度由最高到最低变化量, 探讨烧蚀情况。

火箭弹点火瞬间, 尾焰喷向后方, 此时, 还未到达气体温度最高点, 随着时间变化, 弹丸向前运动, 4 ms 范围火药气体温度升高到最大, 假设此刻时刻弹簧压缩量最大, 为 2.765 mm, 突出在身管部分受尾焰影响也最大, 4 ms 之前, 由于气流的变化, 温度处于逐渐上升但存在跳动变化的状态, 在 4 ms 时刻点时, 火箭弹尾部形成的火焰区域, 温度至少在 1 400 °C 以上。过了 4 ms 时刻点后, 温度开始下降, 所以触点接触高温时间只有几个毫秒, 瞬间即开始降温。在此过程中, 触点的受热变化规律如图 4 所示。

## 2.2 烧蚀分析

触点伸出量比较大, 发射时, 在高温、高压及火药气体化学反应等作用下烧蚀会比较严重, 从而引起触点表面材料的损伤和外形尺寸的变化, 最终

影响点火的可靠性, 导致使用寿命下降。文中的点火触点选用的是 40Cr 材料, 烧蚀过程中, 点火触点的受热主要因素, 可以从 3 个方面考虑: 热因素、化学因素和机械因素。

热因素: 是触点烧蚀的主要因素。对于低射速的炮, 材料的表面软化问题, 随发射次数增加; 高温不仅降低了材料的强度, 也加快了化学反应, 引起金属相变导致体积变化, 同时高温气体与热变化层反应会生成白层, 因为碳的存在形成渗碳体, 导致材料的剥离。

化学因素: 化学反应是第二大影响因素在高温\高压气体作用下, 从射击第一发开始, 点火触点表面即发生了化学反应现象, 随着射击数量的增加而增加, 在表面形成白层, 使得熔点下降, 在射击数量不断增加的情况下, 导致点火触点表面的材料被高速气流冲刷, 使得点火触点逐渐被烧蚀。

机械磨损: 在瞬间高热作用下, 点火触点硬度降低, 此时火箭弹亦处于高速运动状态, 从而使得点火触点与弹体接触间发生机械磨损(这种现象发生在连射的过程中, 对于单射则不存在这种现象)。

笔者主要考虑热因素, 对于瞬间发射的高温作用, 进行热力学有限元分析。热分析的基本方程为

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{q} = 0 \quad [2]$$

由于发射过程是瞬间的, 进行瞬态热分析, 研究随时间变化的温度场中各种参数随时间变化的数值。

材料参数和已知条件如表 1 所示。

表 1 材料参数

已知条件		条件参数
炮尾(铸铝 114A)的属性	热传导率/(W/(m·K))	50
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	7 820
	比热/(J/(kg·K))	880
点火触点热导率(40Cr)/(W/(m·K))	0 °C	12
	850 °C(932F)	15
	950 °C(1 562F)	36
	1 000 °C	40
点火触点(40Cr)焓密度/(J/m <sup>3</sup> )	0 °C(32F)	600
	850 °C(932F)	1 500
	950 °C(1562F)	3 600
	1 000 °C(2372F)	4 200
初始条件	触点初始温度/°C	1 300
	炮尾初始温度/°C	27
	对流系数/(W/(m·K))	134.66
	周围空气温度/°C	27

首先对于触点和炮尾建立了简化的分析模型, 如图 6。

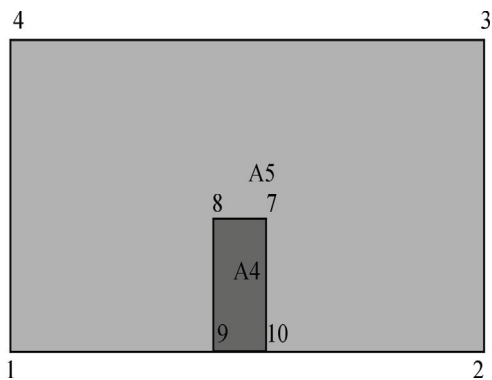


图 6 点火触点和炮尾简化模型

由以上数据对烧蚀情况进行瞬态热分析，得到各种数据如图 7~9 所示。

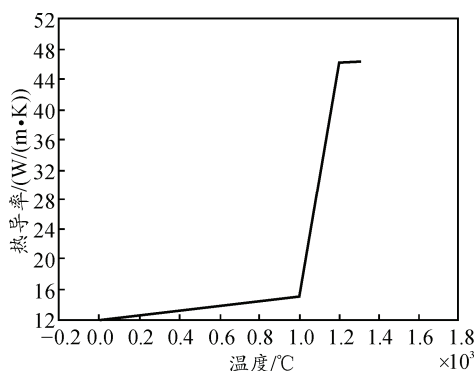


图 7 热导率随温度变化

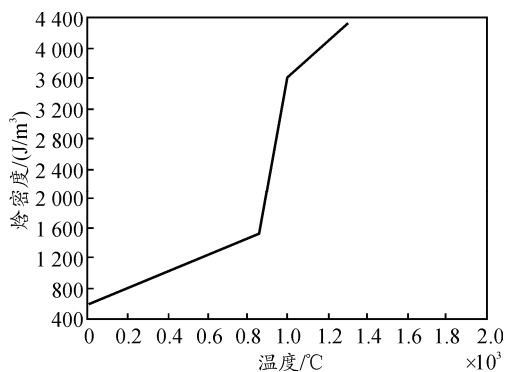


图 8 焓密度随温度变化

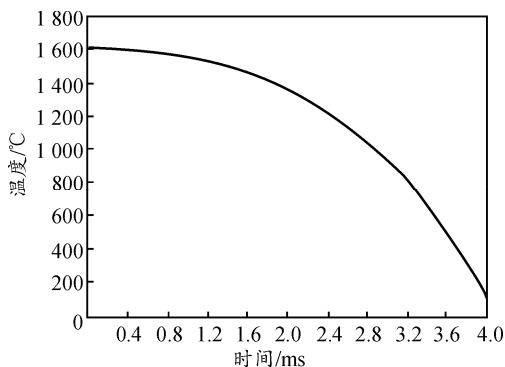


图 9 节点温度随时间变化

根据以上分析结果得出：金属一直处于固态稳定状态，即使在高温(1 300 °C 以上)作用下，由于高温时间持续短，触点不存在发生金属相变的可能，由此得出高温对于触点的烧蚀作用很小。只要采取必要防护措施，可有效抵抗其在长期使用中的烧蚀。

### 3 点火触点防烧蚀的常用防护措施

针对烧蚀的热、化学和机械因素，为了减少烧蚀，可以从材料的选择、表面处理和弹药的组成方面进行防护处理。

从材料看，40Cr 是一种常见的合金调质钢，其  $\sigma_b \geq 980 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s \geq 785 \text{ MPa}$ <sup>[3]</sup>，具有良好的综合机械性能，能满足瞬态高温、摩擦、防腐等复杂环境的要求。

在表面处理上，可选择对点火触点进行镀铬。铬是一种优良的耐烧蚀材料，它的熔点很高，可以使用电镀工艺进行，且铬材料与 40Cr 钢的结合性很好，当镀铬层有足够厚度时，可以防止过多的热量传递，镀铬不仅可以防烧蚀，而且还增加了零件的防腐性能。

弹药方面，采用低爆温的火药。单基火药是以硝化棉(含氮量为 11%~13%)为基础的低爆温火药，其优点是爆热和爆温低，烧蚀作用小<sup>[4-5]</sup>。在药形结构尺寸和装药量方面，因为低爆温的火药能量较低，采用棒状结构药，可以满足装药量，有更好的装填性能。

### 4 试验及验证结果

为了验证点火触点的工作可靠性和使用寿命，进行了实弹射击试验。射击试验项目分强度射击试验、最大/最小射程试验，火箭弹药温为常温、高温和低温 3 种状态。试验先后发射了约 300 发火箭弹，通过试验数据及对炮尾等各个部件的测量，以及从试验结果来看，火箭发动机点火性能、火箭弹的飞行稳定性、弹的密集度、火箭弹与弹道炮接口匹配性以及发射回路的可靠性、初速、射程及密集度等各项指标均达到了要求，没有出现指标超差现象。试验表明在射击过程中点火触点经受住了机械损伤、以及高温烧蚀，未见异常。从以上射击的弹丸数量保守推算，点火触点寿命至少可达到 1 500 发以上。

### 5 结论

从设计计算、有限元分析和射击试验结果来看：