

文章编号: 1006-9941(2014)06-0824-04

电流激励 Ni-Cr 桥带式电火工品发火模型

周庆¹, 焦清介²

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为优化设计桥带式电火工品, 研究了其换能发火模型, 基于傅里叶传热定律, 建立了 Ni-Cr 金属桥带式电火工品发火的数理模型, 并给出了临界发火电流的理论计算方法。在 5 min 和 50 ms 恒流激励下, 采用 D-最优法测试了两种不同尺寸 Ni-Cr 桥带的临界发火电流, 将测试结果与理论计算值进行了对比, 结果表明两者的误差在 14% 以内, 数理模型合理, 可用于设计和计算 Ni-Cr 桥带式电火工品的临界发火电流。

关键词: 军事化学与烟火技术; Ni-Cr 桥带; 发火模型; 换能机理; 临界发火电流

中图分类号: TJ450.1

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.021

1 引言

大功率无线电设备的广泛使用, 增强了空间电磁强度, 对电火工品的抗静电、射频和杂散电流的提出了更高的要求, 传统桥丝式电火工品已因此而不够安全。桥带式电火工品具有较高的发火能量和功率, 受电磁干扰较小, 安全性较高。对于桥带式电火工品的发火机理, Walter Smetana 等^[1]认为在全发火电流激励下为电热发火方式, 发火之后桥带存在两种情况: 被发火的药剂炸断或者是在电流的电热作用下熔断; 在高电流激励下为电爆发火。王凯民等^[2]借鉴桥丝式电火工品安全电流的计算模型和方法, 针对输入功率较低的情况推导了桥带式电火工品安全电流的计算公式。但是模型只考虑了桥带材料导热系数的影响, 而没有考虑基体材料、桥带尺寸和药剂参数等的影响。杨正发等^[3-4]建立了一个零维的桥带式电火工品的传热方程, 但是该方程忽略了药剂分解反应的放热以及不同位置处温度的变化。为此, 本研究通过分析桥带发火件发火过程, 建立了发火件的数学和物理模型, 给出了临界发火电流的计算方法。用 Neyer D-优法^[5-7]测试了 5 min 和 50 ms 恒流激励条件下桥带的临界发火电流, 并将试验结果与理论计算结果进行对比, 两者吻合较好。

2 金属桥带发火件发火模型

由于均匀的带状电桥发火区和散热区能量密度相同, 对散热和发火都不利, 因此桥带的形状通常设计成“S”形或双“S”形的结构, 如图1^[2-3]所示。装药设置在“S”形的中间部位, 通电时中间细腰部电阻大, 集热量较高, 温度最高, 最先发火, 然后带动周围的桥区发火。

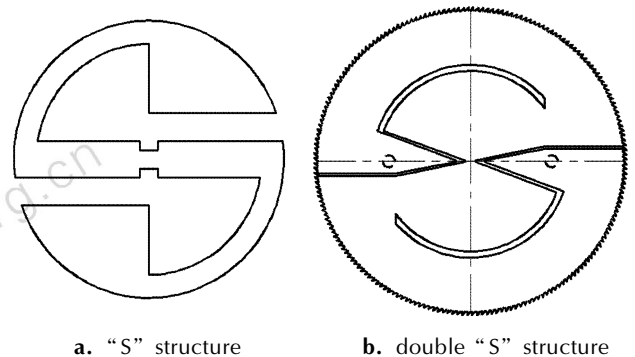


图1 典型桥带形状

Fig.1 Typical shapes of the bridge-belt

2.1 模型假设

通过上面的分析可知, 虽然桥带的面积大, 但实际上发火区面积相对于药剂和塞子而言非常小, 故可将发火区看成一个热点, 而将药剂和塞子看成两个半球体, 其中药剂半球的半径取与塞子半径相等的值, 为了使模型简化, 作如下假设:

①忽略电桥和药剂以及电桥和塞子接触面之间的接触热阻和热容, 即交界面处三者的温度相等;

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-03-14

作者简介: 周庆(1987-), 女, 硕士, 主要从事电阻型换能元换能机理研究。e-mail: zhouqing8897@sina.com

- ②忽略药剂化学反应放热对系统温度升高的影响;
- ③电桥以均匀的热流密度向药剂和塞子传递热量,并且只考虑热传导这一种传热方式;
- ④假设桥带、药剂和塞子都是均匀且各向同性的物质,并且桥带和塞子的性质相同;
- ⑤在整个过程中,桥、药剂和塞子的导热系数、密度、比热容等均不随时间变化。

2.2 数理模型

根据上述假设,桥带-药剂-塞子系统的传热可以归结为一维球体的非稳态导热。由于桥带-药剂半球和桥带-塞子半球对称,因此研究以桥带-药剂半球为研究对象,依据傅里叶导热定律^[8]将传热方程与定解条件将其表述为:

$$\begin{cases} \rho_e c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_e r^2 \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + q_v \\ r=0, \rho_e c_e v \frac{\partial T_e}{\partial t} = \lambda_e A_1 \frac{\partial T_e}{\partial r} + P \\ r=r_0, T_e = T_s = T_f \\ t=0, T_e = T_a \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_e 为药剂温度, K; T_s 为塞子温度, K; T_f 为桥带温度, K; ρ_e 为桥带密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_e 为桥带的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; λ_e 为桥带导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; r 为半球系统半径, m; A_1 为桥带总面积, m^2 ; P 为功率, W; q_v 为单位体积的内热源热量, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; 在桥带区域 ($0 \leq r \leq r_0$), 内热源为桥带产生的焦耳热:

$$q_v = \frac{I^2 R}{v} \quad (2a)$$

式中, v 为桥带发火区的体积, m^3 。

在药剂区域 ($r > r_0$), 内热源为药剂的化学反应放热, 但是由于这部分热量非常小, 可忽略不计, 即 $q_v = 0$ (2b)

由对称性可得桥带-塞子系统的传热方程和定解条件如下:

$$\begin{cases} \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_s r^2 \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + q_v \\ r=0, \rho_s c_s v \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s A_1 \frac{\partial T_s}{\partial r} + P \\ r=r_0, T_e = T_s = T_f \\ t=0, T_s = T_a \end{cases} \quad (3)$$

式中, ρ_s 为塞子材料密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_s 为塞子的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; λ_s 为塞子导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

由式(1)~式(3)即可求出药剂-桥带-塞子系统的温度分布。由于方程比较复杂, 没有解析解, 本研究

采用差分的方法进行求解。

边界条件可离散如下:

$$T_{s,i}^{n+1} = \frac{Pdt}{\rho_s c_s} + \frac{\lambda Adt}{\rho_s c_s v} \frac{T_{s,2}^n - T_{s,1}^n}{dr} + T_{s,1}^n \quad (4)$$

初始条件可离散如下:

$$T_{s,i}^1 = T_a \quad (5)$$

传热方程可离散如下:

$$T_{s,i}^{n+1} = \frac{2\lambda dt}{\rho_s c_s i (dr)^2} (T_{s,i+1}^n - T_{s,i}^n) + \frac{\lambda dt}{\rho_s c_s (dr)^2} (T_{s,i+1}^n - 2T_{s,i}^n + T_{s,i-1}^n) + \frac{q_v dt}{\rho_s c_s} + T_{s,i}^n \quad (6)$$

由式(4)~式(6)的差分表达式, 利用 matlab 软件即可计算给定激励电流值和作用时间的金属桥带换能元的温度分布情况。

3 发火件发火实验

3.1 实验方法

金属桥带式电火工品为了满足钝感的要求, 一般起爆能量很高, 在电容放电激励下很难起爆, 所以它的能量加载方式主要是 5 min 恒流激励和 50 ms 恒流流激励^[9]。为了验证上述发火模型的正确性, 研究选择两种不同尺寸的金属桥带发火件分别进行 5 min 和 50 ms 恒流激励实验, 实验方法采用 Neyer D-最优化法^[5]。

3.2 实验样品

实验所用的 2 种尺寸金属桥带发火件 1#、2#均为烧结玻璃基底, 如图 2 所示, 尺寸见表 1。所用的药剂为 KClO_4/Zr , 两种组分混合造粒后粒度为 $67 \mu\text{m}$, 装药

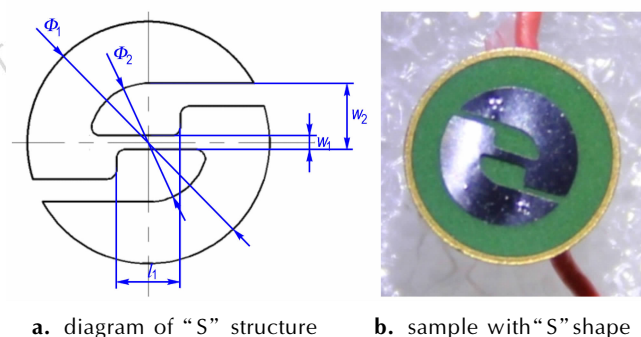


图 2 实验用金属桥带形状

Fig. 2 Bridge-belt used in the experiment

表 1 “S”形桥带尺寸

Table 1 Sizes of bridge-belt with “S” structure

No.	diameter /mm	l_1 /mm	w_1 /mm	w_2 /mm	total area /mm ²	firing area /mm ²	resistance / Ω
1#	9.2	1.4	0.3	0.95	24.71	0.42	1.0
2#	6.45	1.7	0.3	1.0	25.41	0.51	1.0

方式为压装,装药量为15 mg,装药密度为 $2.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3.2 实验现象和结果

按照D-最优化法测试出5 min 恒流激励和50 ms 恒流激励条件下金属桥带发火件50%发火电流和标准差,然后按照正态分布模型计算出0.1%电流和99.9%发火电流,结果如表2所示。

实验中观察到在5 min 恒流激励情况下,各组实验中都存在发火件发火而桥带没有断的情况。这说明发火件的发火是由于桥带产生的焦耳热使药剂升温到发火点而引起的药剂发火,也就是说在5 min 恒流激励情况下金属桥带发火件的发火方式属于电热发火。

而对于50 ms 电流激励,实验发现当激励电流在临界电流附近时,发火件同时发火和桥断;当激励电流高于临界电流时,桥带断在先,而药剂发火在后。这说明在50 ms 恒流激励的情况下,发火件的发火是由于金属桥带爆发产生的高温高压的气体侵入药剂引起药剂发火,也就是说这种情况下发火件的发火方式是电爆发火。

通过上述对实验现象的分析,本研究将金属桥带发火件5 min 恒流激励模式下的发火条件定义为:紧贴桥带表面的一层药剂的温度达到药剂发火点时,发火件发火;50 ms 电流激励模式下的发火条件定义为:金属桥带的温度达到其爆发点(熔点)时,发火件发火。

3.3 实验与理论对比

根据式(4)~式(6)的差分表达式,用matlab 软件即可绘出桥带和药剂的温度分布曲线,如图3所示,计算中使用到的参数如表3所示。

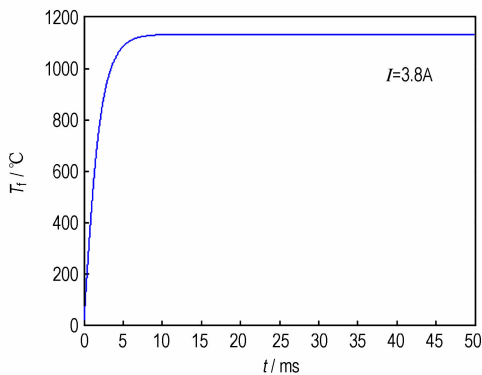
根据桥带和药剂的温度分布图,结合金属桥带发火条件的定义即可求得临界发火电流的值。将计算结果与实验结果进行对比,结果如表4所示。

从表4可知,桥带发火件临界发火电流的理论计算值与实验值的误差在14%以内,两者一致性较好。误差产生的原因可能是由于实验样本量有限,实验值本身存在一定的误差;另外,桥带尺寸和电阻等参数的测量误差和质量一致性等对计算结果也有一定的影响。

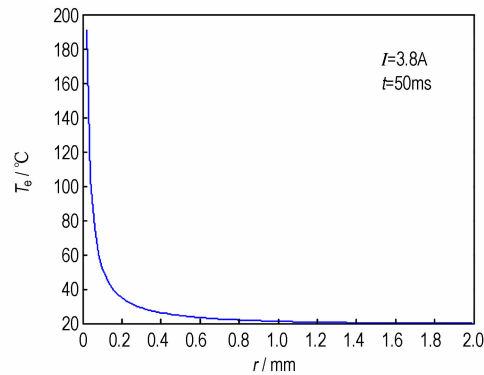
表2 金属桥带的临界发火电流实验结果

Table 2 Results of the critical firing current experimental for bridge-belt

sample	stimulate model	sample size	50% firing current value /A	standard deviation /A	0.1% firing current value /A	99.9% firing current value /A
1#	5 min current	15	1.590	0.0193	1.5321	1.6479
2#	5 min current	15	1.518	0.0498	1.3686	1.6674
1#	50 ms current	11	3.73	0.06	3.55	3.91
2#	50 ms current	12	3.56	0.05	3.41	3.71



a. Temperature of bridge belt vs. time



b. Temperature of explosive vs. distance

图3 桥带和药剂温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution diagram of bridge-belt and explosive

表3 材料参数^[10-11]

Table 3 Parameters of materials

material	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	specific heat / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	heat conductivity coefficient / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	5s exploding temperature / $^{\circ}\text{C}$	melting point / $^{\circ}\text{C}$
KClO ₄	2.52	811.5	-	-	-
Zr	6.49	280	22.7	-	-
Zr/KClO ₄	2.55	466.03	14.76	400	-
Ni-Cr	8.408	440	16.75	-	1400
Sintered glass	2.5	966	1.0	-	-

表 4 桥带发火件临界发火电流的理论计算值与实验值对比

Table 4 Comparison of analytical results with experimental on critical firing current

sample	stimulate model	total area A_z /mm ²	firing area A_f /mm ²	R_0 /Ω	experimental I_{50} /A	analytical I_{50} /A	standard deviation /%
1 [#]	5 min current input	24.71	0.42	1.0	1.590	1.75	10
2 [#]	5 min current input	25.41	0.51	1.0	1.518	1.625	7
1 [#]	50 ms current input	24.71	0.42	1.0	3.73	3.313	-11.18
2 [#]	50 ms current input	25.41	0.51	1.0	3.56	3.063	-13.96

Note: I_{50} is 50% firing current.

4 结 论

(1) 建立了 Ni-Cr 桥带发火件发火的数学和物理模型,并给出了临界发火电流的理论计算方法;

(2) 实验表明 5 min 恒流激励时 Ni-Cr 桥带发火件的发火方式为电热发火; 50 ms 电流激励时发火件的发火方式为电爆发火;

(3) 定义了 5 min 恒流激励和 50 ms 电流激励两种模式下 Ni-Cr 桥带发火件发火的条件: 紧贴桥带表面的一层药剂的温度达到药剂发火点时,发火件发火; 以及金属桥带的温度达到其爆发点(熔点)时,发火件发火。

(4) 实验结果证明,用本研究给出的发火件发火模型计算出的临界发火电流的理论值与实验值的误差在 14% 以内,吻合较好。

参考文献:

[1] Walter Smetana, Heinz Homolka, Roland Reicher, et al. FEM failure analysis of thick-film initiators for automotive applications [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004; 475-484.
 [2] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 92-97.
 WANG Kai-min, ZHANG Xue-xun. *Engineering Design and Test Technology of Initiators and Pyrotechnics* [M]. First edition. Bei-

jing: National Defence Industry Press, 2010; 92-97.
 [3] 杨正发. 一种姿态控制发动机点火装置简介[J]. *固体火箭技术*, 2000, 23(1): 9-12.
 YANG Zheng-fa. Brief description of an ignition device for attitude control motors [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(1): 9-12.
 [4] 杨正发, 杨翼英. 桥带制作线切割工艺研究[J]. *航天制造技术*, 2006, (4): 10-13.
 YANG Zheng-fa, YANG Yi-ying. Study on line of cutting handicraft of bridge-strip [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2006, (4): 10-13.
 [5] Barry T Neyer. More efficient sensitivity testing [R]. Technical Report MLM-3609, 1989.
 [6] Barry T Neyer. A D-Optimality-Based sensitivity test [J]. *Technometrics*, 1994, 36(1): 61-70.
 [7] 袁俊明. Neyer D-最优化感度试验方法及其应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
 YUAN Jun-ming. Study on sensitivity test and application of Neyer D-optimal method[D]. Taiyuan: North University of China, 2005.
 [8] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 34-38.
 TAO Wen-quan. *Heat transfer* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2006: 34-38.
 [9] QJ 1989A-1998, 桥带式电起爆器通用规范[S]. 1998.
 QJ 1989A-1998, Common standards of bridge-strip initiator [S]. 1998.
 [10] 钟一鹏, 胡雅达, 江宏志. 国外炸药性能手册[M]. 第一版. 北京: 兵器工业出版社, 1990, 93-95.
 ZHONG Yi-peng, HU Ya-da, JIANG Hong-zhi. *Performance manual of foreign explosive* [M]. First edition. Beijing: Weapons industry press, 1990, 93-95.
 [11] GB/T 1234-2009, 电热合金[S]. 2011.
 GB/T 1234-2009, Electrothermal alloy [S]. 2011.

Firing Model of Ni-Cr Bridge-belt Electric Initiating Devices under Current Input

ZHOU Qing¹, JIAO Qing-jie²

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The firing model was studied to optimal design the bridge-belt electric initiating devices. Based on the non-Fourier heat conduction theory, the electro-thermal energy conversion model was established for the stage from heating to firing. And then the correlation of bridge-belt and input energy was obtained by MATLAB analysis. In order to verify its validity, the critical firing current experiments of Ni-Cr bridge-belts with two sizes were carried out by D-optimal method under the condition of 5 min current input and 50 ms current input. Comparison between the experimental and the analytical demonstrates that the model is reasonable and feasible for designing critical current of Ni-Cr bridge-belt, and the deviation between them is less than 14%.

Key words: military chemistry and pyrotechnic; Ni-Cr bridge-belt; firing model; energy conversion mechanism; critical firing current

CLC number: TJ450.1

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.021