

文章编号: 1001—4322(1999)03—0350—05

# 金属箔断路器电爆性能的研究\*

林其文, 高顺受

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都 523 信箱, 610003)

**摘 要:** 给出了在单纯断路器调节电路(F型)、断路器-变压器调节电路(FT型)和变压器-断路器调节电路(TF型)三种类型的电爆炸断路器的理论模型和数值模拟结果, 并对其性能进行对比和分析。

**关键词:** 电爆炸金属箔; 断路器; 变压器; 功率调节系统

**中图分类号:** TL 503.6 **文献标识码:** A

随着高功率微波技术和加速器技术的发展, 大能量和大功率脉冲技术的研究发展很快, 大功率脉冲调节系统需要大功率的断路器。大功率断路器种类很多, 其中电爆炸丝断路器和电爆炸箔断路器的研究和应用比较广泛。电爆炸丝断路器系统调制的能量较小(约几千焦耳)<sup>[1]</sup>。电爆炸箔断路器适用于更高的能量系统(约  $10^2$  kJ), 本文将比较系统的研究这种功率调节系统的性能。

## 1 电爆炸箔模型

电爆炸金属箔数值模型参考了洛斯·阿拉莫斯实验室的 Irvin R. Lindemuth 等人的工作<sup>[2]</sup>, 假定: 箔材料处处均匀, 具有单一的温度和密度; 箔的厚度远小于磁扩散的集肤深度, 所以磁场横穿过箔时呈线性变化; 在磁压和物质压的作用下, 箔可能平动和膨胀; 箔两侧的衬垫材料是不可压的和绝缘的; 箔截面的速度分布是线性的, 如果衬垫与箔接触, 则衬垫与箔接触面处的速度相等; 箔的热能损失机制除了膨胀以外, 热传导和辐射等忽略不计。

箔的几何结构和等效电路如图 1 所示, 垂直分支电路与箔的中截面路径相对应, 集总电路元件  $R$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_i$  和  $L_m$  分别是箔的电阻、初级电感、次级电感、内电感和互感。

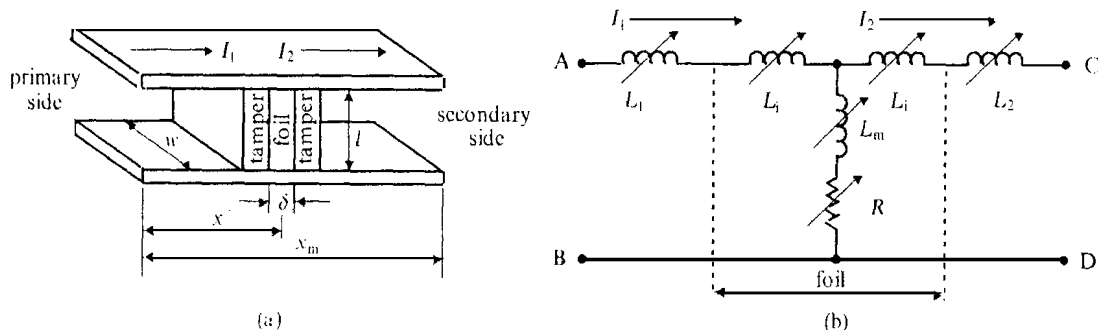


Fig 1 Model geometry (a) and equivalent electrical circuit (b) for the foil

图 1 箔的几何结构(a)与等效电路(b)

\* 国家 863 激光技术领域资助课题  
1999 年 1 月 20 日收到原稿, 1999 年 3 月 20 日收到修改稿。  
林其文, 男, 1939 年 8 月出生, 副研究员

设箔的初级电流为  $I_1$ , 次级电流为  $I_2$ 。则在箔中, 靠近初级侧, 中介面处和靠近次级侧的磁场分别为  $B_1 = \mu_0 I_1 / w$ ,  $B_c = \mu_0 (I_1 + I_2) / (2w)$ ,  $B_2 = \mu_0 I_2 / w$ ,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $w$  为箔的宽度, 相应的磁压分别是  $p_{B_1} = B_1^2 / (2\mu_0)$ ,  $p_{B_c} = B_c^2 / (2\mu_0)$ ,  $p_{B_2} = B_2^2 / (2\mu_0)$ 。

由于箔和衬垫的相互作用, 箔的运动和膨胀是很复杂的。它们接触、分开、重新接触, 主要取决于作用在箔上的磁力大小和方向以及运动状态。当箔和衬垫接触时, 衬垫才可能被加速, 否则衬垫运动速度不变。所以, 初级和次级衬垫的速度  $v_1$  和  $v_2$  分别满足条件: 当  $\alpha_i = 1$  时,  $v_1 = v_c - (v_e/2)$ ; 当  $\alpha_i = 0$  时,  $dv_1/dt = 0$ ; 当  $\alpha_c = 1$  时,  $v_2 = v_c + v_e/2$ ; 当  $\alpha_c = 0$  时,  $dv_2/dt = 0$ 。其中  $\alpha_i$  和  $\alpha_c$  分别表示初级衬垫和次级衬垫与箔接触 (等于 1) 或分开 (等于 0) 的情况。  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别表示磁力的方向, 它们分别满足条件: 当  $I_1 > I_2$ ,  $\beta_2 = 1$ ; 否则,  $\beta_2 = 0$ ,  $\beta_1 = 1 - \beta_2$ ; 当  $p_{B_1} > p + p_{B_c}$ ,  $\alpha_i = 0$ ; 当  $p_{B_2} > p + p_{B_c}$ ,  $\alpha_c = 0$ ; 当  $(v_c - v_e/2) dt > v_1 dt$ ,  $\alpha_i = 1$ ; 当  $(v_c + v_e/2) dt > v_2 dt$ ,  $\alpha_c = 1$ ,  $p$  是箔的物质压力。

箔的运动方程和膨胀方程分别为

$$dx/dt = v_c \tag{1}$$

$$d[M_0 v_c + M_1 \alpha_i \beta_1 (v_c - v_e/2) + M_2 \alpha_c \beta_2 (v_c + v_e/2)]/dt = hw [(1 - \alpha_i \beta_2) p_{B_1} - (1 - \alpha_c \beta_1) p_{B_2} + (\alpha_i \beta_2 - \alpha_c \beta_1) (p + p_{B_c})] \tag{2}$$

$$d\delta/dt = v_e \tag{3}$$

$$d[M_0 v_e/4 + M_2 \alpha_c (v_c + v_e/2) - M_1 \alpha_i (v_c - v_e/2)]/dt = hw (2p + 2p_{B_1} - p_{B_2}) \tag{4}$$

当  $p > 10^5 \text{ Pa}$ , (4) 式成立, 否则  $v_e = 0$ ;  $M_0, M_1, M_2$  分别为箔的质量、初级及次级衬垫质量。

箔和衬垫的动能  $E_k$  及箔中的磁能  $E_B$  分别为

$$E_k = M_0 (v_c^2 + v_e^2/12)/2 + M_1 \alpha_i (v_c - v_e/2)^2/2 + M_2 \alpha_c (v_c + v_e/2)^2/2 \tag{5}$$

$$E_B = \mu_0 l \delta (I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2) / (6w) \tag{6}$$

电流从箔的初级边流进次级边流出, 其能量转换方程为

$$d[0\epsilon + E_k + E_B - L_i (I_1^2 + I_2^2)/2 - L_m (I_1 - I_2)^2/2]/dt = R (I_1 - I_2)^2 + I_1^2 (\dot{L}_1 + \dot{L}_i)/2 + I_2^2 (\dot{L}_2 + \dot{L}_i)/2 + (I_1 - I_2)^2 \dot{L}_m/2 \tag{7}$$

其中  $\epsilon$  为箔的内能,  $L_1, L_2, L_i$  和  $L_m$  分别表示相应电感对时间的导数, 箔的密度  $\rho = \rho_0 \delta_0 / \delta$ ,  $\rho_0, \delta_0$  表示箔的密度和厚度的初始值。

对压力  $p$  ( $R, \epsilon$ ), 采用 SESAME 状态方程编码进行迭代求解。文献 [3] 给出了铝箔电阻率对沉积的比欧姆能  $g$  的经验曲线  $\rho(g)$ , 即  $g = g_0 + \int_0^t I^2 R dt / M_0$ , 其中,  $g_0$  为初始值,  $R, M_0, I$  分别为箔的电阻、质量和所通过的电流。

至此, 上述 5 个基本方程 (1~ 4, 7) 共 7 个基本变量  $x, v_c, \delta, v_e, \epsilon, I_1$  和  $I_2$ , 所以还要给出初级端和次级端的电源和负载的外电路方程, 才能构成电爆炸箔断路器系统的完备方程组。

## 2 功率调节系统的电路

考虑爆炸断路器外电路是: 初级端的电源为电容器组  $C$ , 次级端负载为电阻  $R_L$ 。调节电路有三种情况: 不含变压器调节即 F 型调节; 初级端加变压器, 即 TF 型调节; 次级端加变压器, 即 FT 型调节。根据图 2 可分别得到这三种调节模式的电路方程,  $L_c$  为电容器组的电感。

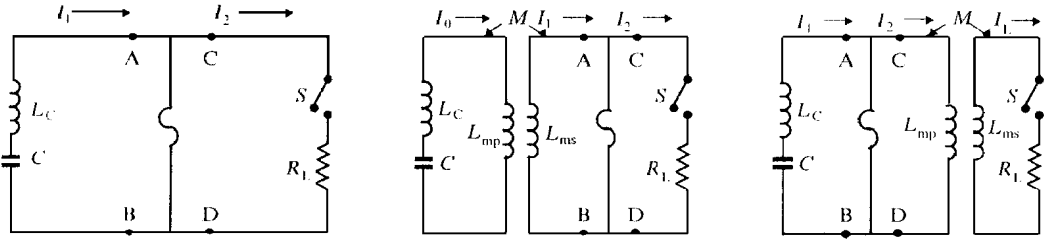


Fig. 2 The equivalent electrical circuits for three kinds of power conditional modes  
 “I” shape denotes equivalent electrical circuit

图 2 三种调节模式的等效电路, ABCD 间的“I”字型电路表示箔的等效电路

从三种类型的调节电路看出, 当采用变压器时, 增加了一个回路。为计算方便, 我们始终规定电爆炸箔的初级电流为  $I_1$ , 次级电流为  $I_2$ 。这样, 对 TF 型, 增加了电源电流  $I_0$ , 对 FT 型, 增加了对负载的输出电流  $I_L$ 。

### 3 计算与分析

描述电源- 爆炸箔- 负载系统的是一组封闭的与时间相关的常微分方程, 这组方程对相关变量是非线性的, 但对相关变量的导数是线性的, 即有:  $A \dot{y} = B$ , 其中矢量  $y$  是相关变量对时间的导数, 矩阵  $A$  和矢量  $B$  都是相关变量的函数。只要按照一定的求解顺序, 可以用代入法依次解出各方程组的导数, 方程组导数的积分用四阶龙格-库塔法计算。大量计算结果表明, 本方法计算的能量守恒误差  $10^{-4}$ 。  $\delta_0 = 25 \mu\text{m}, M_1 = M_2, M_1/M_0 = 10, R_L = 30 \Omega, V_{c0} = 50 \text{kV}, L_c = 9 \text{nH}, k = 0.8$ , 其余参数, 对不同的计算模型, 取值不同。控制开关 S 闭合的条件为: 铝箔上沉积的比焦耳能达到  $6 \text{kJ/g}$  时接近汽化, 故立即闭合。

表 1 电爆炸箔断路器三种调节电路性能的比较

Table 1 Comparison of the performances for the exploding foil opening switch with three conditioning circuits

mode	$C$	$l$	$\omega$	$L_{1,2}$	$L_{mp}$	$L_{ms}$	$I_0$	$I_1$	$I_2$	$I_L$	$\eta$	$\delta/\delta_0$	$R$	$V_L$
	$/\mu\text{F}$	$/\text{cm}$	$/\text{cm}$	$/\mu\text{H}$	$/\mu\text{H}$	$/\mu\text{H}$	$/\text{kA}$	$/\text{kA}$	$/\text{kA}$	$/\text{kA}$	$/\mu\Omega \cdot \text{cm}$		$/\Omega$	$/\text{kV}$
F. 1	150	150	5	1.13	/	/	/	227	5.56	/	555	11.2	1.14	167
F. 2	150	150	4	1.41	/	/	/	183	5.58	/	562	12.0	1.43	167
F. 3	150	150	3	1.88	/	/	/	138	5.50	/	564	12.7	1.90	165
F. 4	400	200	5	1.51	/	/	/	206	5.58	/	434	5.1	1.52	167
FT. 1	400	200	5	1.51	4.0	20.0	/	210	77	3.50	265	2.6	1.61	105
FT. 2	400	200	5	1.51	10.0	50.0	/	209	42	5.14	317	3.1	1.64	154
FT. 3	400	200	5	1.51	15.0	75.0	/	209	33	5.00	341	3.3	1.65	150
FT. 4	400	200	4	1.88	10.0	50.0	/	168	41	4.07	320	3.1	2.07	122
TF. 1	150	150	5	1.13	0.5	4.0	1027	215	6.63	/	577	12.1	1.15	199
TF. 2	400	200	5	1.51	0.3	2.4	1502	232	9.32	/	597	16.6	1.52	280
TF. 3	400	200	4	1.88	0.3	2.4	1395	192	9.49	/	620	16.0	1.91	285
TF. 4	400	200	3	2.51	0.3	2.4	1294	149	9.30	/	616	20.7	2.53	279

从表 1 看出, 对 F 型调节电路, 电容器组在  $150 \sim 400 \mu\text{F}$  内变化, 对输出电压  $V_L$  没什么影响, 只能达到  $160 \text{kV}$  左右, 表明 F 型只适于较小的电容器组。比较表 1 中的 F. 4 和 TF. 2 两个

模型可见, 增加变压器后, 电压从 167kV 增加到 280kV, 因此, 为了提高输出电压, 对爆炸箔断路器系统增加变压器耦合电路是一种很好的途径. 在含变压器的电爆炸箔断路器系统中, 对 FT 型, 变压器初级绕组电感分别为 4、10 和 15 $\mu$ H, 电阻率  $\eta$  分别为 265、317 和 341 $\mu\Omega \cdot$ cm, 输出电压分别为 105、154 和 150kV, 表明了 FT 型的变压器初级电感宜大, 箔才能较充分的爆炸. 但是, 变压器初级电感过大, 又影响其初级电流  $I_2$ , 结果反而导致输出电压降低.

从 F、FT 和 TF 三种电爆炸箔断路器系统性能的分析中, 我们发现 TF 型的性能最好, 其输出电压可达到 280kV 左右, 箔的爆炸效果好, 输出电压高. 在 TF 型电路中, 耦合变压器的初级电感小, 即输入阻抗小, 有很大的初级电流, 通过变压器的升压, 能较好发挥箔的爆炸及其突变特点, 从而得到较高的电压输出. 另外, 由于 TF 型变压器的初级电感很小, 适合于与爆炸磁通量压缩发生器能源匹配, 这也为 TF 型爆炸箔断路器开辟了广阔的应用前景.

箔的宽度对它的电阻率和电压输出有一定影响, 由表 1 中的 TF. 2、TF. 3 及 TF. 4 等模型可以看出, 宽度为 4cm 的箔较好. 箔的宽度太小, 则电感大, 其初级边电流小, 甚至沉积的比焦耳热也小, 导致电阻率不大; 另一方面宽度小, 箔的质量小, 有可能发生箔的内能和膨胀速度偏大的情况, 因而箔的膨胀较严重. 箔的长度一般越长越好, 但长度增加到一定时, 对输出电压的影响就越来越小了, 因为增加箔的长度将降低电流, 在我们计算的含变压器的模型中, 箔的长度以 200cm 比较合适.

从图 3 中可看到, 箔的爆炸、膨胀, 电阻率  $\eta$  电阻  $R$ 、电流  $I_0$  与  $I_1$ 、电压  $V_L$  和厚度比  $\delta/\delta_0$  的上升、突变与下降等过程. 最后, 我们要说明, 通过大量的模型计算, 箔爆炸后的电阻率增加约 190 倍. 我们认为这个值是比较保守且可以达到的. 另外, 一般的输出电压脉冲的半宽度不小于 0.7 $\mu$ s.

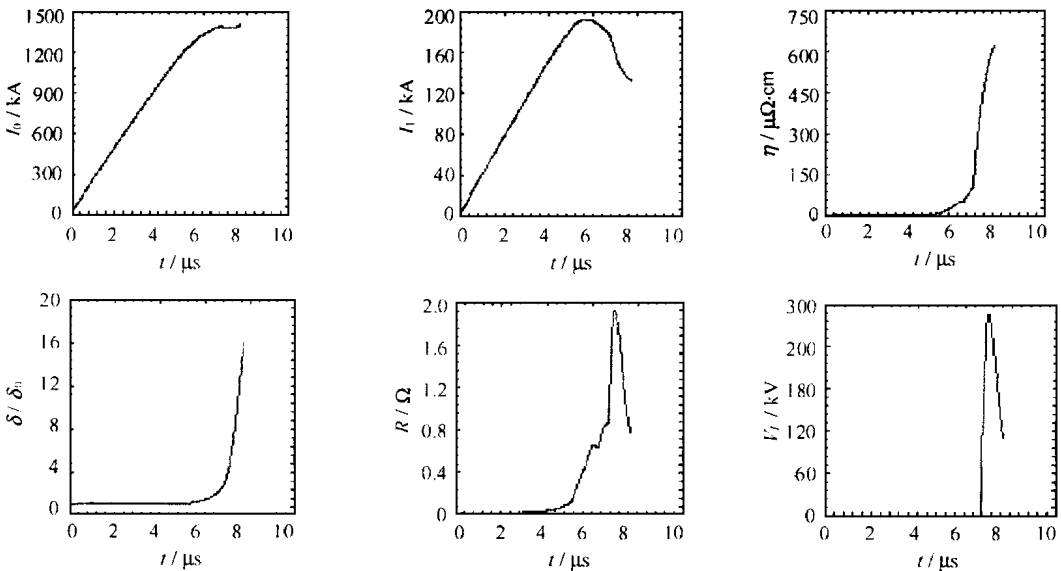


Fig. 3 The curves of some parameters vs  $t$  for mode TF. 3, respectively

图 3 模型 TF. 3 的各参量对时间的变化曲线

## 4 结束语

通过对上述 F 型、TF 型和 FT 型三种类型的电爆炸箔断路器性能的讨论, 我们初步得出: 为了提高输出电压, 爆炸箔断路器系统应增加变压器耦合; 而且在 TF 型和 FT 型的耦合电路中, 应选择 TF 型耦合; TF 型的输出电压可达到 280kV 或者更高, 脉宽约  $0.7\mu\text{s}$ ; TF 型的输入阻抗较小(不受箔的高阻抗限制), 适合与磁通量压缩发生器能源系统匹配, 使它具有很好的应用前景。

## 参考文献

- 1 林其文, 高顺受 电爆炸丝开关-传输线储能功率系统性能分析 强激光与粒子束, 1997, 9(2): 283
- 2 Lindenuth Irvin R, et al Computational model of exploding metallic fuses for multimegajoule switching *J Appl Phys*, 1985, 57(2): 4447
- 3 Roderick N F, et al Theoretical modeling of electromagnetically imploded plasma liners *Laser and Particle Beams*, 1983, 1(Part2): 181

# STUDY OF ELECTRICAL EXPLODING PERFORMANCE FOR METALLIC FOIL OPENING SWITCH

L N Q iwen, GAO Shun-shou

*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, 610003*

**ABSTRACT:** This paper provides theoretical model and calculated results of exploding foil opening switch with three kinds of power-conditioning circuit such as mode F, or mode FT, or mode TF. Based on analyses of these circuit performances it is of more wide applied prospect for the mode TF circuit with the exploding foil opening switch.

**KEY WORDS:** exploding metallic foil; opening switch; transformer; power-conditioning system