

铁电体电源起爆金属桥箔的数值计算分析^{*}

陈 朗, 鲁建英, 伍俊英, 冯长根

(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:为探讨铁电体电源对金属桥箔的起爆作用, 对冲击波作用下 PZT95/5 铁电体对铜桥箔的放电过程进行了数值计算。通过引入金属桥箔电阻非线性变化的 FIRESET 模型, 考虑回路电感及回路电阻, 计算了负载为铜桥箔时的铁电体的电响应。讨论了铁电体并联数量、回路电感对桥箔爆炸特性的影响。计算结果表明: 当并联排列的铁电体电极面积达到 0.006 m^2 以上时, 在桥箔上可产生高于 100 GA/m^2 的电流密度, 能够有效起爆桥箔。而回路中存在适当的电感将有利于铁电体电源起爆桥箔。计算方法和结果能够为起爆金属桥箔的铁电体电源设计提供理论根据。

关键词:爆炸力学; 爆电换能; 冲击波; 金属桥箔

中图分类号: O383

文献标识码: A

1 引 言

金属桥箔在高功率电流作用下会发生电爆炸, 可被用作高性能起爆或点火系统的发火能源。而铁电体在冲击波加载作用下, 能够输出高功率电流, 可作为金属桥箔电爆炸电源。金属桥箔在电爆炸过程中, 金属由固态变成等离子态, 其电阻会发生非线性变化。因此, 在铁电体电源设计中, 需要考虑负载为非线性变化电阻的情况。而过去对于铁电体电源的电输出研究主要集中在线性电阻、电感和电容负载上^[1-2]。为此, 本工作采用动态电阻模型, 对金属桥箔在铁电体电源作用下的桥箔电流、电压和电阻进行了数值计算, 目的是研究使金属桥箔发生电爆炸的铁电体元件组合方式和相关的电学参数。

2 计算方法

2.1 冲击加载下铁电体去极化过程及其简化假设

铁电体材料在外电场的作用下被极化, 电能储存在铁电体材料中。当已极化的铁电材料受到外力作用时, 铁电体被去极化, 同时释放出电能。用炸药爆炸产生的冲击波对极化铁电体进行冲击加载作用, 可使铁电体快速去极化, 迅速释放电能, 在负载电路中形成瞬间脉冲电流^[3]。

本工作针对 PZT95/5 铁电体材料进行研究, 其材料参数见表 1。由于冲击波对铁电体的去极化过程很复杂, 为研究方便, 这里对 PZT95/5 铁电体材料去极化过程进行如下假设:

(1) 将单片铁电体看作一个电容和一个电导并联;

(2) 铁电体中的冲击波为一维平面波, 且波速恒定;

(3) 在冲击波作用下, 铁电体按指数形式去极化, 有一定的弛豫时间;

表 1 PZT95/5 铁电体物理参数^[4]

Table 1 Physical parameters of PZT95/5^[4]

$\epsilon_1 / (\text{nF/m})$	$\epsilon_2 / (\text{nF/m})$	$\sigma_1 / (\mu\text{S/m})$	$\sigma_2 / (\mu\text{S/m})$
2.5	0.9	2.5	650

^{*} 收稿日期: 2004-11-29; 修回日期: 2005-02-29

作者简介: 陈 朗(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆轰物理和冲击动力学研究, E-mail: chenlang@bit.edu.cn

(4) 冲击波作用后铁电体的介电常数和电导率发生变化;

(5) 在整个冲击加载过程中,铁电体不发生击穿。

2.2 金属桥箔电阻模型

金属桥箔作为负载,接收铁电体去极化输出的电流。当接收的电流密度达到一定强度时,金属桥箔会发生电爆炸。金属桥箔电爆炸过程很复杂,其电阻变化与通入的电流、金属材料、电路参数等因素有关系,可采用美国人 R. S. Lee 提出的 FIRESET^[5]模型描述金属桥箔动态电阻

$$R(t) = \frac{l}{C_s} A \{ 1 - \text{sech}[g(t)/g_0] \} + B \exp \{ -[g(t) - g_0]^2 / S^2 \} \quad (1)$$

式中: $g(t) = \int_0^t j^2(t) dt$ 为比作用量, $j(t) = i(t)/C_s$ 为金属导体的电流密度; A 、 B 、 g_0 、 S 是与材料有关的参数; l 为金属导体长度; C_s 为金属导体的横截面积。本工作以铜桥箔为研究对象,铜桥箔尺寸为长 1 mm、宽 0.5 mm、厚 5 μm ,桥箔横截面积 $C_s = 2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。其 FIRESET 模型参数见表 2。

表 2 铜桥箔 FIRESET 模型参数

Table 2 FIRESET model parameters of copper bridge foil

$A/(10^{-6} \Omega \cdot \text{m})$	$B/(10^{-6} \Omega \cdot \text{m})$	$g_0/(10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{S}/\text{m}^4)$	$S/(10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{S}/\text{m}^4)$
1	2	1.743 4	1.743 4

2.3 金属桥箔负载电响应数学模型

根据冲击加载下铁电体去极化过程的假设和金属桥箔的 FIRESET 模型,可推导铁电体电源作用金属桥箔的电响应数学模型。单片 PZT95/5 铁电体为长方体,尺寸为长 15 mm、宽 10 mm、厚 2 mm。铁电体电源采用多个单片铁电体并联排列方式,可获得较大电流,模型中考虑回路中连线的电感 L 及回路电阻 R_0 ,其等效电路见图 1。

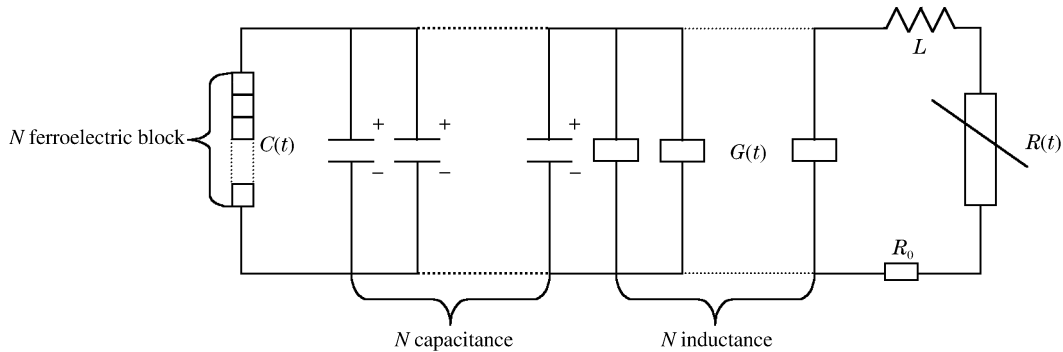


图 1 并联铁电体等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of a ferroelectric generator consist of parallel PZT95/5 blocks

依据假设(2),可得冲击波穿过铁电体材料的时间为

$$\tau = z_0 / u \quad (2)$$

式中: z_0 为冲击波穿过铁电体的距离; u 为冲击波速度。

在时刻 t ,依据假设(3),铁电体电源总电流可由下式计算

$$I_0 = \begin{cases} N y_0 \cdot u \cdot P_r \cdot [1 - e^{-(t/t_s)}] & t \leq \tau \\ N y_0 \cdot u \cdot P_r \cdot [1 - e^{-(\tau/t_s)}] \cdot e^{-(t-\tau)/t_s} & t > \tau \end{cases} \quad (3)$$

式中: y_0 为铁电体垂直于冲击波传播方向的尺寸; P_r 为铁电体剩余极化强度; t_s 为弛豫时间,根据文献[2],弛豫时间取为 0.4 μs 。

铁电体材料中未受冲击波作用区域的电容和电导分别为

$$C_1(t) = \begin{cases} y_0 \epsilon_1 \cdot (z_0 - ut) / x_0 & t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases} \quad (4)$$

$$G_1(t) = \begin{cases} y_0 \sigma_1 \cdot (z_0 - ut) / x_0 & t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_0 为铁电体的极间距; ϵ_1 为冲击波未作用区域铁电体材料的介电常数; σ_1 为冲击波未作用区域材料的电导。冲击波作用后铁电体材料中的电容和电导分别为

$$C_2(t) = \begin{cases} y_0 \epsilon_2 \cdot ut / x_0 & t \leq \tau \\ y_0 \epsilon_2 \cdot z_0 / x_0 & t > \tau \end{cases} \quad (6)$$

$$G_2(t) = \begin{cases} y_0 \sigma_2 \cdot ut / x_0 & t \leq \tau \\ y_0 \sigma_2 \cdot z_0 / x_0 & t > \tau \end{cases} \quad (7)$$

式中: ϵ_2 为冲击波作用后铁电体材料的介电常数; σ_2 为冲击波作用后铁电体材料的电导; 在时刻 t 时, 单片铁电体总的电容和电导为

$$C(t) = C_1(t) + C_2(t) \quad (8)$$

$$G(t) = G_1(t) + G_2(t)$$

对于并联铁电体, 任意时刻 t 释放的总电量等于单片铁电体释放的电量之和^[2], 且单片铁电体电压等于回路上电感两端电压与负载电阻电压之和

$$Nq_C(t) + q_R(t) + q_L(t) + Nq_G(t) = Nq(t) \quad (9)$$

$$U_C = U_G = U_R = i_R(t) \cdot R + L di/dt \quad (10)$$

其中

$$R = R_0 + R(t) \quad (11)$$

式中: $q(t)$ 为单片铁电体释放的电量; $q_C(t)$ 为每个电容上的电量; $q_G(t)$ 为流经单个电导的电量; $q_R(t)$ 为流经负载电阻上的电量; U_C 、 U_G 指单片铁电体上的电压; $i_R(t)$ 为金属桥箔负载电流; R 为回路总电阻; L 、 R_0 分别为回路导线的电感和电阻; $R(t)$ 为金属桥箔动态电阻。

将(9)式两边对时间 t 求导, 并代入(2)式~(8)式和(10)式、(11)式, 可得金属桥箔负载上电流的微分方程

$$\frac{di_R^2(t)}{dt^2} = \frac{I_0(t) - \left[\frac{1}{N} + \left(G(t) + \frac{dC(t)}{dt} \right) \cdot R + C(t) \frac{dR}{dt} \right] \cdot i_R(t) - \left[RC(t) + L \frac{dC(t)}{dt} + G(t)L \right] \frac{di}{dt}}{LC(t)} \quad (12)$$

采用变阶 Adams 算法对此常微分方程(12)式进行数值求解, 可计算出金属桥箔负载上电流、电压及电阻的变化。计算中 PZT95/5 铁电体极化后剩余极化强度 P_r 为 0.32 C/m^2 ; 冲击波速度 u 为 3880 m/s ; 回路电阻 R_0 为 $70 \text{ m}\Omega$, 回路电感 L 为 100 nH 。

2.4 结果与讨论

2.4.1 铁电体数量对桥箔爆炸特性的影响

图 2 为计算的不同数量铁电体并联下在桥箔上的输出电流曲线。从图中可看出, 随着铁电体并联数量 N 的增加, 输出电流成比例增加。这主要是由于桥箔电阻虽然为一动态变化的电阻, 但变化范围基本在 1Ω 范围内, 这样小的阻值对铁电体脉冲产生源来说, 可以认为短路负载。在负载上产生的电流不受负载阻值变化影响。因此, 当并联铁电体数量成倍增加时, 电极面积也成倍增加, 可释电量成倍增加, 导致输出电流成倍增加。

图 3 和图 4 中分别为不同数量铁电体并联时, 铜桥箔电压、电阻随时间的变化曲线。图中曲线显示铁电体数量不同, 桥箔电压、电阻的变化有区别。

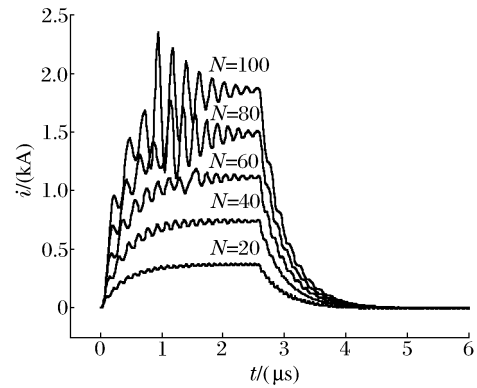


图 2 桥箔电流时间曲线(N 为铁电体的数量)

Fig. 2 Calculated current histories under the different number of ferroelectric blocks (N —Number of ferroelectric blocks)

当并联铁电体数量为 20 片时,桥箔电压仅有 4.6 V,输入的电流仅使桥箔发热,电阻随着温度的升高缓慢上升。并联铁电体为 40 片时,从图 4 看出,在电源放电 $2.558 \mu\text{s}$ 后,桥箔电阻阻值急剧升高到 0.94Ω ,此时桥箔电压达到 700 V,可使桥箔气化后的金属蒸气发生击穿而导通,使桥箔电阻短时间内急剧降低。此时,流经桥箔的电流也达到最大值,之后随着电流和电阻的减小,电压快速下降。并联铁电体为 60、80 和 100 片时,电压曲线出现两个波峰,并联数量越多,第一波峰越窄,峰值更大,出现的时间提前。对比电阻变化曲线,可以看出,电压曲线的第一峰值出现是由于桥箔电阻的急剧升高;而高电压又使得已汽化的金属气体发生击穿,形成等离子体进而导通,电阻相应降低,又导致电压下降。由于铁电体数量多,在击穿过程发生后,铁电体放电过程仍在继续进行,等离子体状态金属气体在吸收一定的能量后,电阻又继续增加,并达到一定的稳定值。金属桥箔在强电流作用下汽化,电阻值剧增,电阻增加促使负载电压升高。在高压、高电流的作用下,金属气体发生击穿,形成等离子体而导通,使电阻值又降低,此过程为桥箔电爆炸过程。

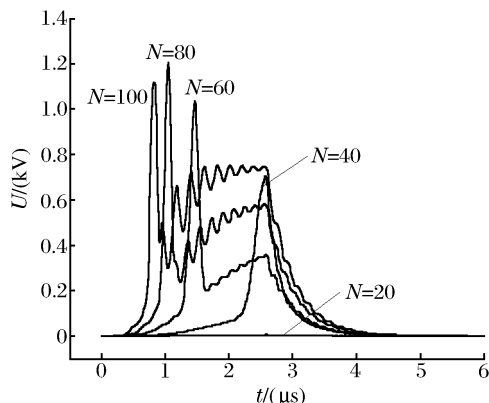


图 3 桥箔电压时间曲线
(N 为铁电体的数量)

Fig. 3 Calculated voltage histories under the different number of ferroelectric blocks
(N —Number of ferroelectric blocks)

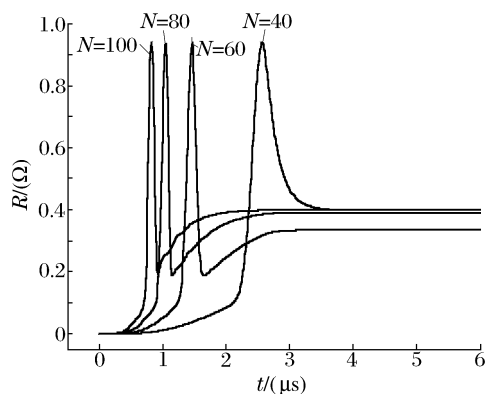


图 4 40 片以上铁电体时桥箔电阻时间曲线
(N 为铁电体的数量)

Fig. 4 Calculated metal bridge foil resistance histories under above 40 ferroelectric blocks
(N —Number of ferroelectric blocks)

图 5 为铁电体并联数量为 40 片以下,铜桥箔电阻变化曲线。并联数量低于 38 片时,桥箔电阻变化基本分三个阶段:缓慢增加段,快速增加段和稳定段。桥箔电阻变化发生在放电后 $1 \mu\text{s}$ 左右。随着铁电体并联数量的增加,即:输出电流增大,桥箔电阻在快速增加段的增速会加快,且发生的时间提前。当桥箔电阻达到一定的稳定值后,将不再变化,在 38 片铁电体时,桥箔电阻达到最大稳定值 $940 \text{ m}\Omega$ 。这种情况表明,在 38 片以下铁电体的电源作用下,桥箔电阻只是单纯随着温度的增加而增加,而没有发生电击穿下桥箔电阻迅速下降的情况,即不能使桥箔发生电爆炸。而当并联 39 片以上铁电体时,桥箔电阻曲线发生了明显的变化,出现了在短时间内急剧上升后又急剧下降的现象。这是桥箔发生电爆炸的特征。因此,39 和 40 片左右数量为使铜桥箔发生电爆炸的铁电体临界数量。

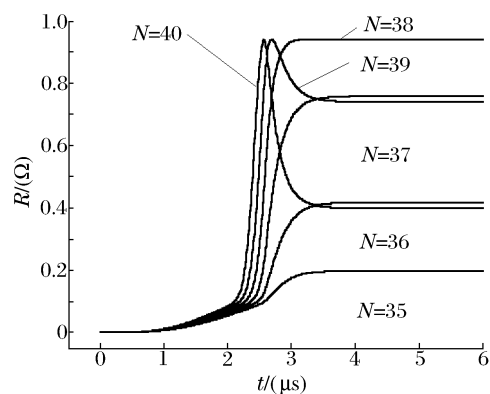


图 5 40 片以下铁电体时桥箔电阻时间曲线
(N 为铁电体的数量)

Fig. 5 Calculated metal bridge foil resistance histories under below 40 ferroelectric blocks
(N —Number of ferroelectric blocks)

另外,还可以从输入的电流密度来判断桥箔是否发生电爆炸。只有当流过桥箔的电流密度大于

100 GA/m² 时,桥箔才能发生有效的电爆炸。表 3 显示,当并联铁电体片数量在 40 以上时,输入的电流密度高于 100 GA/m²,达到电爆炸条件。并联铁电体片数越多,流经桥箔电流越大,爆炸发生越快。但是铁电体片数量增加,会加大了整个铁电体电源的体积和重量,对实际应用造成不利的影响。因此,在铁电体电源设计中,应选择适当的铁电体数量,在保证发生桥箔电爆炸的同时,尽可能减小铁电体电源体积。

表 3 不同铁电体并联数量下铜桥箔爆炸时的电参数

Table 3 Electric parameters of copper bridge foil exploding under different number of parallel ferroelectric blocks

N	Electrode area of PZT /(m ²)	t_{explode} /(μs)	i_{explode} /(A)	j_{explode} /(GA/cm ²)	$R_{\text{max, bridge}}$ /(Ω)	$U_{\text{max, bridge}}$ /(V)	$i_{\text{max, bridge}}$ /(A)
20	0.003	—	—	—	0.014 9	4.6	
40	0.006	2.567	748	299	0.940 9	704.2	760.3
60	0.009	1.465	1 100	440	0.940 2	1 033.9	1 183.0
80	0.012	1.054	1 290	516	0.933 4	1 203.8	1 768.0
100	0.015	0.821	1 185	474	0.940 6	1 118.3	2 349.0

Note: “—” there is no exploding happened.

2.4.2 回路电感对桥箔爆炸特性的影响

计算过程中假设回路中的电感为 100 nH,从图 2 的电流曲线中看出,回路电感对负载桥箔上的电流波形有影响。随着铁电体并联数量的增加,回路电感对电流波形的影响加大,波形振荡幅度加剧。为了研究回路电感对负载桥箔爆炸特性的影响,计算了不同电感下桥箔上电阻、电流波形。取 60 片铁电体并联连接,回路电阻为 70 mΩ,回路电感分别为 1、100、500 nH。计算结果见图 6、图 7。

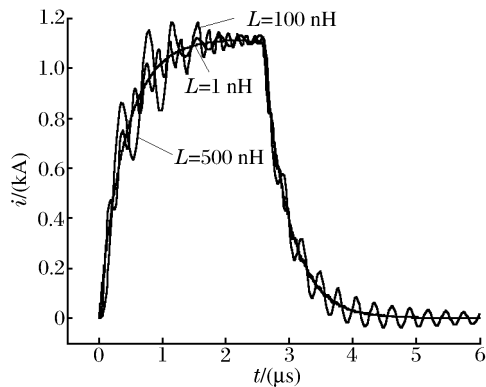
图 6 桥箔电流时间曲线(L 为回路电感)

Fig. 6 Calculated current histories under the different circuit inductance of ferroelectric blocks
(L —Circuit inductance)

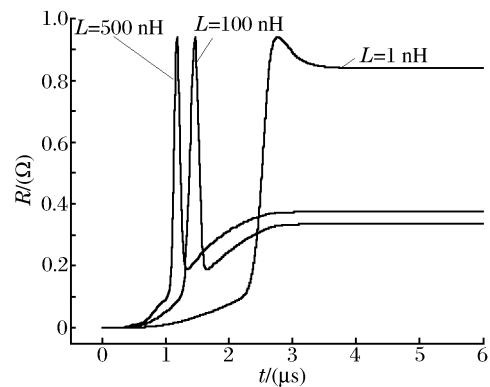
图 7 铁电体桥箔电阻时间曲线(L 为回路电感)

Fig. 7 Calculated metal bridge foil resistance histories under different circuit inductance
(L —Circuit inductance)

图 6、图 7 为不同回路电感下桥箔上电流、电阻时间曲线。图中表明,当回路电感只有 1 nH 时,电流波形曲线光滑,无振荡,随着电感的增加,电流曲线振荡加剧,但整个波形几乎以低电感 $L=1$ nH 时的电流曲线为基准而上下振荡,电流峰值相差不大。从电阻曲线来看,回路电感虽然使电流波形出现振荡,却导致桥箔电阻达到最大值的时间缩短,桥箔容易发生爆炸。当 $L=1$ nH 时,经过 2.77 μs 桥箔电阻增加至最大值,随后电阻没有急剧降低;当电感 $L=500$ nH 时,电阻在 1.46 μs 就达到峰值,短时间内急剧下降,体现了桥箔爆炸的特点。另外从表 4 的数据也可看出,低电感时桥箔爆炸时的电流、电压、电流密度均低于高电感时的值。

对于连接导线中的回路电感是无法避免的,计算的结果表明,回路电感虽然造成输出电流波形出现振荡,但也使得桥箔容易发生爆炸。因此,回路电感应该控制在适当的范围内,在不出现大的电流振荡下能够有效起爆桥箔。

表 4 回路电感对铜桥箔爆炸时的电参数影响

Table 4 Electric parameters of copper bridge foil exploding under different circuit inductance value						
L /(nH)	t_{explode} /(μs)	i_{explode} /(A)	j_{explode} /(GA/cm ²)	$R_{\text{max, bridge}}$ /(Ω)	$U_{\text{max, bridge}}$ /(V)	$i_{\text{max, bridge}}$ /(A)
500	1.178	1169.6	470	0.9405	1099.9	1184.2
100	1.465	1100.0	440	0.9402	1033.9	1183.0
1	2.770	697.0	280	0.9409	818.5	1112.0

3 结 论

根据铁电体电源的负载电学响应模型,可以计算特定负载下冲击加载铁电体的电响应,预估出负载上电流、电压、电阻的变化规律及其影响因素。对金属桥箔负载,采用动态电阻模型,可以计算出使金属桥箔发生电爆炸的电流电压和电阻,计算结果表明回路中适当的电感有利于金属桥箔的起爆,从而为起爆金属桥箔的铁电体电源设计提供理论上根据。

References:

[1] Willis M J, William H H. Pulse Charging of Nanofarad Capacitors from the Shock Depoling of PZT56/64 and PZT95/5 Ferroelectric Ceramics [J]. J Appl Phys, 1978, 49(12): 5846-5854.

[2] He Y J, Zhang Y Zh, Li Ch L, et al. The Numerical Simulation of Electric Response of PZT95/5 Ferroelectric Ceramics Subjected to Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3): 189-194. (in Chinese)
贺元吉, 张亚洲, 李传胪, 等. 冲击波加载下 PZT95/5 铁电体电响应的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 189-194.

[3] Neilson F W. Effects of Strong Shocks in Ferroelectric Materials [J]. Bull Am Phys Soc, 1957, (2): 302.

[4] Wen D Y, Lin Q W. Dielectric Breakdown of Shock-wave Compressed PZT 95/5 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1998, 12(3): 199-205. (in Chinese)
温殿英, 林其文. 冲击波压缩 PZT-95/5 铁电陶瓷的电介质击穿 [J]. 高压物理学报, 1998, 12(3): 199-205.

[5] Lee R S. Fireset [R]. UCID-21322, 1996.

Numerical Calculation of Ferroelectric Power Supply
Initiating Metal Bridge Foil

CHEN Lang, LU Jian-Ying, WU Jun-Ying, FENG Chang-Gen

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the effect of ferroelectric power supply initiating metal bridge foil, the electrical responses of the shock-loaded PZT95/5 ferroelectric with copper bridge foil load were numerically calculated. The non-linear resistance model was used for the metal bridge foil. The voltage, current, and resistance of metal bridge foil under different number of ferroelectric blocks arranged in parallel were calculated. By the results of calculated voltages and resistances of copper bridge foil, the number of parallel ferroelectric blocks to make copper bridge exploding was obtained. The calculation and results provide a theoretical basis to design the ferroelectric power supply initiating metal bridge foil.

Key words: mechanics of explosion; ferroelectric generator; shock waves; metal bridge foil