文章编号：1003-1480（2023）01-0028-04

强电流环境下冲击片雷管换能元动态响应仿真研究

雷 凡[1]，郭晓东[2]，易 涛[3]，付秋菠[1]

（1. 中国工程物理研究院化工材料研究所，四川 绵阳，621999；2. 中国工程物理研究院计量测试中心，四川 绵阳，621999；3.中国工程物理研究院激光聚变中心，四川 绵阳，621999）

摘 要：为研究强电流环境对弹体内冲击片雷管换能元的影响，采用 30 kA 双指数函数波形的脉冲电流模拟弹体被雷电击中后的电流注入，对弹体不同位置处、不同注入电流脉宽条件下冲击片雷管中的感应电流及桥箔的温度响应进行了仿真。结果表明：随着注入电流脉宽从 1.0 μs 减小至 0.1 μs，感应电流的幅值从数百安培降至不足 10A；随着冲击片雷管位置逐渐远离电流注入位置，其感应电流幅值缓慢增大。脉宽为 2.0 μs 的注入电流作用下，桥箔的最高温度达到了铜的常压沸点，对桥箔产生了不可逆的破坏作用，而脉宽为 1.0 μs 及以下的注入电流几乎不会对桥箔造成影响。

关键词：冲击片雷管；强电流环境；感应电流；桥箔温度

中图分类号：TJ45+2 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.006

Simulation Study on Dynamic Response of Slapper Detonator Energy Exchange Element under High Current Environment

LEI Fan[1]，GUO Xiao-dong[2]，YI Tao[3]，FU Qiu-bo[1]

(1. Institute of Chemical Materials, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621999; 2. Measurement and Testing Center of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621999; 3. Laser Fusion Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621999)

Abstract：In order to study the influence of strong current environment on the energy exchange element of the slapper detonator in the projectile, 30 kA double exponential function waveform pulse current was used to simulate the current injection after the projectile was hit by lightning. The induced current in the slapper detonator and the temperature response of the bridge foil at different positions of the projectile and under different injection current pulse width were simulated. The results show that with the injection current pulse width decreases from 1.0 μs to 0.1 μs, the amplitude of induced current decreases from hundreds of amperes to less than 10 amperes; And as the position of the slapper detonator gradually moves away from the current injection position, the amplitude of the induced current increases slowly. Under pulse width of 2.0 μs injection current, the highest temperature of the bridge foil reaches the atmospheric boiling point of copper, which causes irreversible damage to the bridge foil, while the injection current with pulse width of 1.0 μs or less will hardly affect the bridge foil.

Key words：Slapper detonator；Strong current environment；Induced current；Bridge foil temperature

雷电是一种常见的大气放电现象，放电时巨大的能量在极短时间内释放，形成极高电压和极强电流，在一定空间范围内辐射出极高强度的瞬态电磁场，其电磁脉冲会对三维空间内的电子设备造成危害[1-3]。冲击片雷管因高安全性和高可靠性被广泛应用于各种战略、常规武器系统中[4-5]，其作用机理是通过金属桥箔将电能转换成热能，产生高温高压等离子体，剪切并驱动飞片撞击起爆钝感装药，因此冲击片雷管仍属

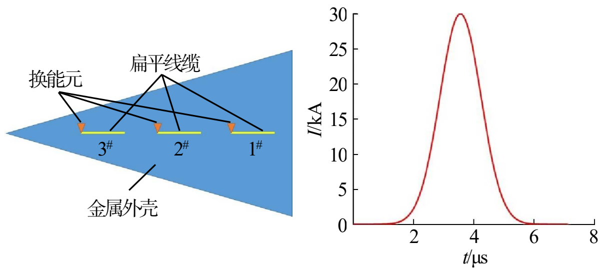
收稿日期：2022-07-23
作者简介：雷凡（1990-），男，助理研究员，从事火工品开发及机理仿真技术研究。
通讯作者：付秋菠（1977-），女，副研究员，从事火工品开发技术研究。

于电雷管范畴，仍受雷电强电磁脉冲影响[6-8]。

为研究强电流环境对弹体内冲击片雷管换能元的影响，以双指数函数波形脉冲电流模拟弹体被雷电击中后的电流注入，研究弹体不同位置处、不同注入电流脉宽条件下冲击片雷管内的感应电流，并通过电爆炸仿真计算程序模拟冲击片雷管换能元的温度分布演化，进而评估感应电流对其损伤情况，为研究雷击对冲击片雷管的损伤及破坏过程提供数据参考。

1 算法及原理

采用有限积分法对冲击片雷管内扁平线缆处的感应总电流进行仿真。仿真时，采用圆锥形金属密闭壳体模拟弹体，壳体材料为铝、底面直径为 1 m、高为 1.8 m。1#、2#、3#冲击片雷管分别置于圆锥形壳体中心轴距离锥底面 0.5，1.0，1.5 m 的 3 个位置，仿真模型如图 1（a）所示。冲击片雷管内扁平线缆长度均为 100 mm，宽度为 4 mm，厚度为 35 μm，线缆间距为 50 μm；换能元位于扁平电缆左侧，由陶瓷基片和铜桥箔构成。从圆锥顶部注入强度为 30 kA 的高斯脉冲电流，如图 1（b）所示，脉宽分别为 2.0，1.0，0.2，0.1 μs。采用 CST 高频电磁仿真软件计算冲击片雷管内扁平线缆处的感应总电流。



（a）仿真模型 （b）注入电流

图 1 仿真模型及注入电流波形示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation model and injection current waveform

通过电爆炸仿真计算程序模拟冲击片雷管中桥箔在感应总电流作用下的温度分布演化。铜桥箔厚度为 5 μm，桥区尺寸为 0.4mm×0.4mm。桥箔上底边归一化电势设为 1，桥箔下底边归一化电势设为 0，桥箔两边均为第二类边界条件（通过边界法向的电流为 0）。仿真用的电爆炸桥箔及网格如图 2 所示。桥箔电爆炸仿真基本过程为：基于初始电阻率分布计算每一个网格的归一化电流密度；计算垂直于底边的归一化总电流；通过归一化总电流与实际对应时刻的真实电流的比值计算桥箔内真实电流密度分布；根据微元电加热方程和材料热容温度函数计算微元的温度分布（由于感应电流频率较高，且持续时间在μs 量级，可以忽略热传导过程）；基于温度分布和电阻率温度函数确定新的电阻率分布。重复上述过程，直至桥箔上的最高温度大于铜的常压沸点（3 000 K），从而获得感应电流作用下的桥箔温升过程，如图 3 所示。

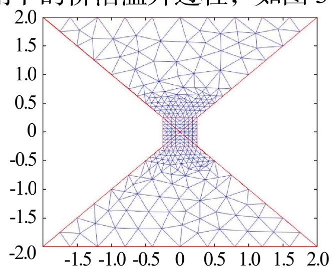


图 2 仿真的电爆炸桥箔及网格

Fig.2 Electric explosion bridge foil and grid of simulation

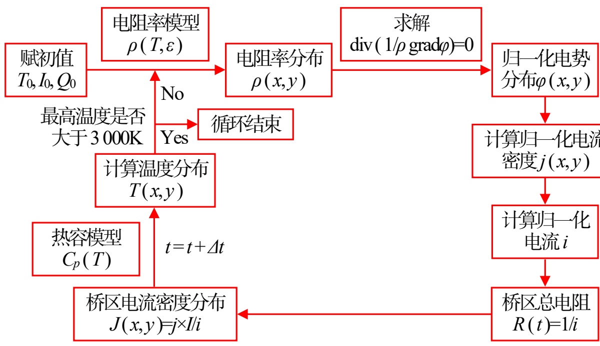


图 3 电爆炸仿真流程图

Fig.3 Flow chart of electric explosion simulation

2 结果与讨论

1#、2#、3#冲击片雷管在脉宽为 2.0 μs 的 30kA 强脉冲注入电流下的感应总电流如图 4 所示。由图 4 可知，1#、2#、3#冲击片雷管内均形成了数百安培的复杂震荡感应电流。感应电流的振幅从强脉冲电流注入开始数微秒内急速增大，在电流注入结束后继续维持高频振荡，且幅值继续缓慢增加。这是由于强脉冲注入电流能量在壳体内部不断反射，因此在注入电流消失后依然不断向换能元中耦合能量。此外，随着测试位置逐渐远离锥顶注入位置，感应电流的震荡幅值缓慢增大。

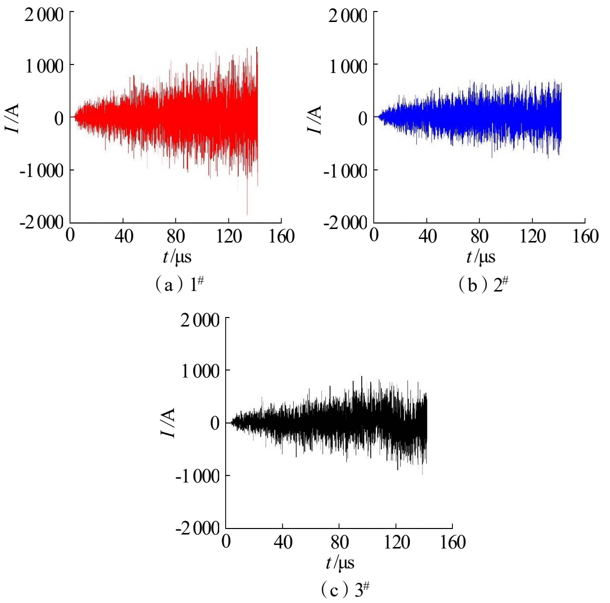


图 4　不同位置冲击片雷管内的感应总电流（2.0 μs，30 kA）

Fig.4　Total induced current in slapper detonators at different positions（2.0 μs，30 kA）

在脉宽分别为 1.0，0.2，0.1 μs（对应频率分别为 1，5，10 MHz）的注入电流作用下，1#冲击片雷管的感应总电流如图 5 所示。

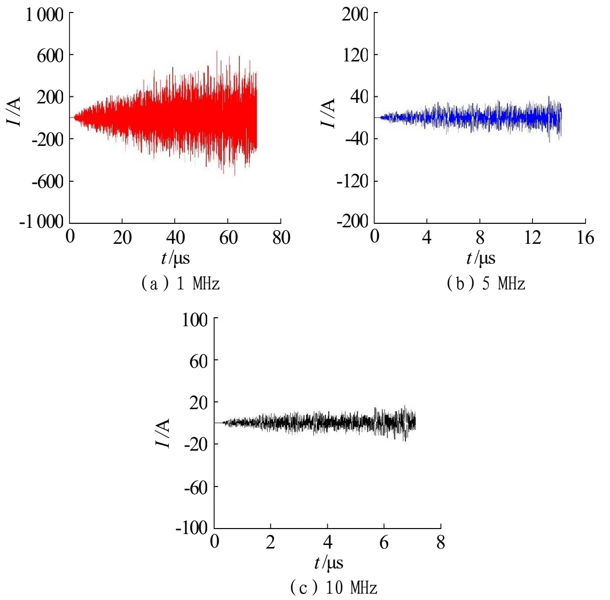


图 5　不同脉宽 30kA 注入电流下 1#冲击片雷管内的感应总电流

Fig.5　Total induced current in 1# slapper detonator under different pulse width injection current of 30 kA

由图 5 可知，感应电流的频率随着注入电流频率的增大而增大，同时其平均幅值逐渐降低。这是由于桥箔电爆炸的正常作用频率为 0.5～1 MHz，越接近此频率的电磁能量耦合入桥箔的效率越高，产生的感应总电流的幅值越大。

对感应产生的复杂震荡电流进行频谱分析，以 1 MHz 为界将信号分离为高频信号 I_h 和低频信号 I_l。在高频信号 1 个周期内桥箔的电阻率近似为常数，可以将其等效为 1 个直流信号 I_A。等效的基础是直流信号的比作用量与等效前的高频信号的比作用量相同。首先将高频信号 I_h 平方积分，使用 kt^γ 形式函数对曲线进行拟合，则等效直流 I_A 幅值满足如下关系：

$$\int_0^{t_x} {I_h}^2 \mathrm{d}t = kt^\gamma,\ \ I_A^2 = k\gamma t^{\gamma-1} \qquad (1)$$

在脉宽为 2.0 μs 的 30 kA 注入电流下，1#冲击片雷管内感应电流中高频及低频信号的分离和等效结果见图 6。

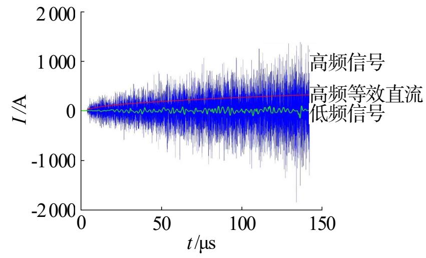


图 6　等效信号分析

Fig.6　Equivalent signal analysis

桥箔电爆炸仿真中，注入电流为 I_A+I_l。脉宽为 2.0 μs 的 30 kA 注入电流下，2#冲击片雷管中桥箔温度分布随时间的演化云图如图 7 所示。由图 7 可知，桥箔的 4 个角始终保持最高温度，加热约 130 μs 后最先达到 Cu 的气化温度。

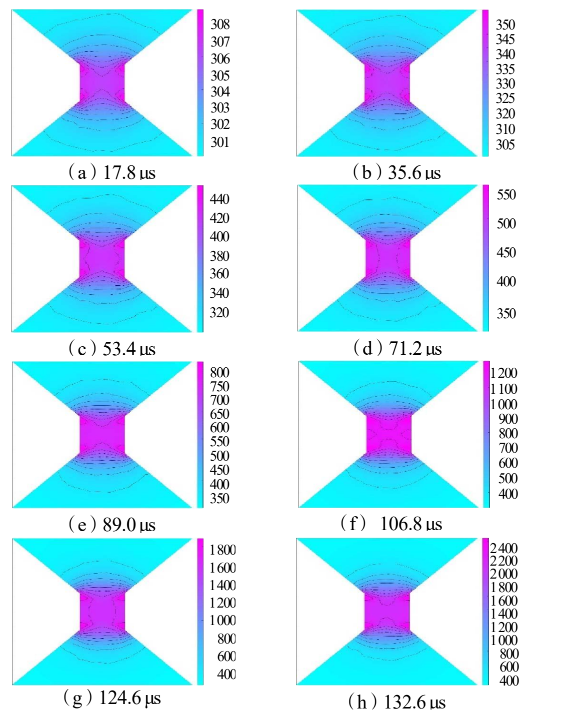


图 7　电加热过程模拟

Fig.7　Electric heating process simulation

在脉宽为 2.0 μs 的 30 kA 注入电流作用下，不同

位置处冲击片雷管中桥箔最高温度的温升曲线如图 8 所示。由图 8 可知，3 个冲击片雷管内的感应电流均使其桥箔的最高温度达到了铜的常压沸点，表明感应电流对桥箔产生了不可逆的破坏作用。由于 1#冲击片雷管中的感应电流幅值最大（图 4），因此其桥箔上产生的电热效应最显著，达到铜的常压沸点的时间也最快。

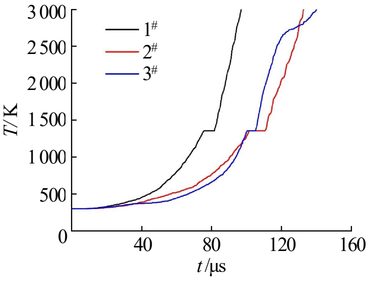


图 8　不同位置冲击片雷管中桥箔最高温度温升曲线

Fig.8　Maximum temperature rise curve of bridge foil in slapper detonators at different positions

在脉宽分别为 1.0，0.2，0.1 μs 的 30 kA 注入电流作用下，1#冲击片雷管中桥箔最高温度的温升曲线如图 9 所示。

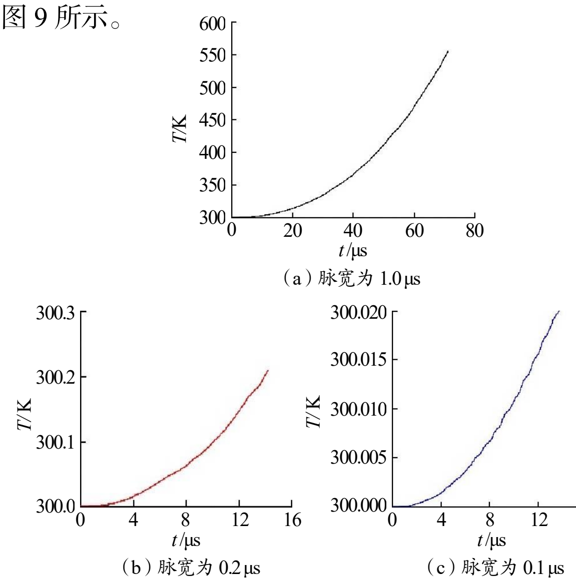


图 9　不同脉宽 30kA 注入电流下桥箔最高温度温升曲线

Fig.9　Maximum temperature rise curve of bridge foil under different pulse width injection current of 30 kA

由图 9 可知，注入电流脉宽分别为 1.0，0.2，0.1 μs 时，桥箔的最高温度在注入电流持续期间分别提升了约 250，0.2，0.02 K。这是由于随着注入电流脉宽变窄（频率增大），其耦合入桥箔的能量快速衰减，对桥箔温度的提升作用逐渐减弱。3 种脉宽注入电流下，桥箔的最大温升均未超过铜的融化温度（1 356 K），当注入电流消失，其状态可恢复到初始状态，因此可以认为该条件下的注入电流对铜桥箔几乎无影响。

3　结论

采用 30 kA 双指数函数波形电流模拟弹体被雷电击中后的电流注入，通过数值仿真研究了弹体不同位置处、不同注入电流脉宽条件下冲击片雷管内的感应电流及其换能元的动态温度响应。结论如下：

（1）强脉冲注入电流在冲击片雷管中激发了数百安培的复杂振荡感应电流，且随着冲击片雷管位置逐渐远离电流注入位置，其感应电流的幅值缓慢增大。随着 30 kA 注入电流脉宽从 1.0 μs 逐渐减小至 0.1 μs，感应电流的幅值从数百安培降至不足 10 A；

（2）脉宽为 2.0 μs 的 30 kA 注入电流作用下，3 个不同位置冲击片雷管内的感应电流均使桥箔的最高温度达到了铜的常压沸点，对桥箔产生了不可逆的破坏作用；而脉宽为 1.0 μs 及以下的注入电流几乎不会对桥箔造成影响。

参考文献：

[1] 鲍永波,田杨萌,王彩霞,等. 雷雷电电磁脉冲对便携计算机终端的损伤分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 83-87.

[2] 孝波,陈绍东,邓宇翔,等.雷电电磁脉冲对电子系统的危害及其防护[J]. 建筑电器, 2010(3): 36-39.

[3] 田杨萌. 雷电电磁脉冲的产生机理、危害及其防护[J]. 物理与工程, 2006, 05(16): 34-37.

[4] 尹强, 耿春余. 冲击片雷管研究与发展[J]. 探测与控制学报,2005, 27(4): 8-11.

[5] 施长军,周涛,李公法,等.冲击片雷管在大型战斗部传爆序列中的应用[J].火工品, 2013(3): 13-16.

[6] 陈亚洲, 乔治军, 刘尚合, 等. 雷电电磁脉冲对电火工品的发火危险性研究[J]. 兵工学报, 2001(3): 419-422.

[7] 陈亚洲,魏光辉,魏明,等.雷电电磁脉冲对电火工品的损伤机理[J].火工品, 1999(1): 17-20.

[8] 常悦,高聪杰,陈志文,等.电火工品电磁脉冲危害检测及评估方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007(5): 183-185.