

文章编号: 1001-1455(2006)01-0091-06

可控靶中应力波形的吉帕压力范围 平面爆炸加载技术*

张万甲, 刘仓理

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 分析了应力波通过不同介质的交界面时, 应力波所具有的动量在界面两边的重新分配与影响动量在边界上转移的因素。讨论了靶中应力波幅度和宽度的调控方法、冲击器的飞行速度与厚度的相关性、靶中应力波的平面范围。给出了可控靶中应力波形的平面低压化爆加载装置的应用实例。

关键词: 爆炸力学; 应力波宽度; 平面化爆加载; 应力波幅度

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

炸药爆炸加载是发展得最早、最常采用的一种动载技术。用炸药作能源, 在高阻抗材料中产生的动高压已超过 500 GPa, 作为高压加载装置, 主要是要求将靶中冲击波的峰值幅度提高; 但是在材料强度的影响不可忽略, 或者起主要控制作用, 相对低的压力区段, 为了实验研究材料的动载荷响应特性, 如弹-塑性响应、动态断裂、多晶型相变等, 对加载装置的要求则主要是精确地控制和调节靶中应力波的幅度和宽度, 而低压化爆加载装置的技术难点却恰恰是靶中应力波形的幅度和宽度难以精确控制和调节。因此, 发展一种能小步长调节靶中应力波形, 且应力波形有一定平面范围、在实验测量的空间和时间内能满足一维应变条件的平面低压化爆加载技术, 为一级空气炮提供一种互补方法, 是研究材料动态响应特性所需要的。为此, 本文中对这一问题作进一步研究。

2 小步长调节靶中应力波幅度的方法

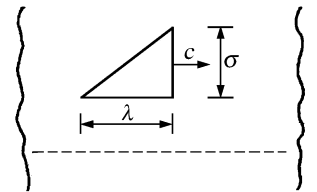
现在从动量守恒和动量转移来讨论小步长调节靶中应力波幅度的方法。动量和能量一样是不能消灭的, 但动量总表现为机械运动, 通过一个体系时, 将以各种方法转移分配。为简单起见, 在讨论中作了线弹性固体假设^[1]。如图 1 所示, 设在介质中传播的应力波是由炸药中传入的入射波, 应力波每单位面积所具有的动量为

$$M = \int_{\lambda} \rho v(x) dx$$

式中: ρ 为介质的密度, v 为波后的粒子速度, 积分区间为应力脉冲的波长 λ , 如果将(1)式写为微分形式, 则为

$$dM = \rho v dx = \frac{\sigma}{c} dx = \sigma dt \tag{2}$$

当此入射应力波通过两种不同介质的交界面时, 由于界面两边介质的物理性质发生突变, 阻抗失配, 但又必须保持界面上压力和质点速度的连续性, 因此在边界上将发生波的反射与透射, 动量将在界面两边的介质中, 重新分配以满足边界条件。如图 2 所示, 设 A 板的阻抗为 $\rho_1 c_1$, 为高阻抗材料, B 板的



(1) 图 1 在介质中向右运动的三角形应力波
Fig. 1 A triangular wave transmitting rightward in medium

* 收稿日期: 2004-12-31; 修回日期: 2005-05-19
作者简介: 张万甲(1936—), 男, 副研究员。

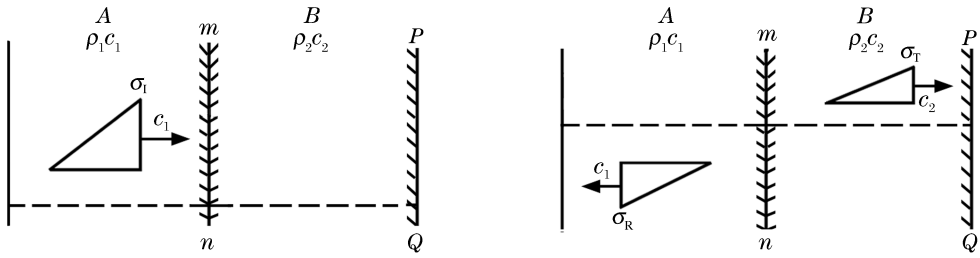


图 2 在两种不同性质材料的交界之间,波的相互作用所发生的应力分配

Fig. 2 Stress distribution resulted from interaction of waves at two sides of the interface of two different media

阻抗为 $\rho_2 c_2$, 为低阻抗材料, PQ 为自由面, 当入射应力波通过 A、B 两板无支撑的交界面 mn 时, 由边界上的连续性条件可得

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_I \tag{3}$$

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_I \tag{4}$$

式中: σ_I 、 σ_T 、 σ_R 分别为入射应力、透射应力和反射应力。从(3)式可知, 透射应力与入射应力总是同号的, 即入射是压缩波, 透射也是压缩波, 入射是稀疏波, 透射也是稀疏波。而(4)式则表明, 在 $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$ 的条件下, 入射波与反射波总是反号的, 即入射为压缩波时, 反射为稀疏波, 入射为稀疏波时, 反射为压缩波, 由(3)、(4)式可以得出

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_R} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1} \tag{5}$$

(5)式说明, 在边界两边透射与反射应力的重新分配中, 材料的波阻抗起决定作用。因材料的波阻抗等于 σ/v , 表明了它与应力和质点速度相关。

B 板所收集到的动量为

$$M_T = \int \sigma_T dt = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \int \sigma_I dt = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} M_I \tag{6}$$

$$\frac{M_T}{M_I} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \tag{7}$$

式中: M_I 为入射波的动量。(7)式表明, 应力波通过 A、B 两板的交界面 mn 之后, 在动量的重新分配中, B 板所获得动量的份额, 同样决定于 A、B 两板的波阻抗。当 $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$ 时, 则 $M_T < M_I$, 随着 $\rho_2 c_2$ 的减小, M_T 也越来越小, 因此, 改变 $\rho_2 c_2$, 就可使 B 板得到不同级别的动量, 例如 A 板材料和入射波的动量 M_I 保持不变, B 板分别用 Al 和 Mg 时, 因 $(\rho c)_{Mg} < (\rho c)_{Al}$, 这时用 Mg 作 B 板所获得的动量仅为用 Al 作 B 板所得动量的 2/3。材料冲击阻抗的高低是相比较而言的。常用的 Cu、Fe、Pb 等三种高阻抗材料与 Al、Mg、PMMA (有机玻璃) 等三种低阻抗材料的波阻抗参数列于表 1, 其组合动量比与阻抗比的函数曲线如图 3 所示。

表 1 几种材料的波阻抗

Table 1 The wave impedance of several materials

材料	$\rho/(t/m^3)$	$c/(km/s)$	$\rho c/(Gg/(m^2 \cdot s))$
Cu	8.90	4.70	41.83
Fe	7.80	5.95	46.41
Pb	11.30	1.96	22.15
Al	2.70	6.42	17.33
Mg	1.74	5.80	10.10
PMMA	1.18	2.60	3.07

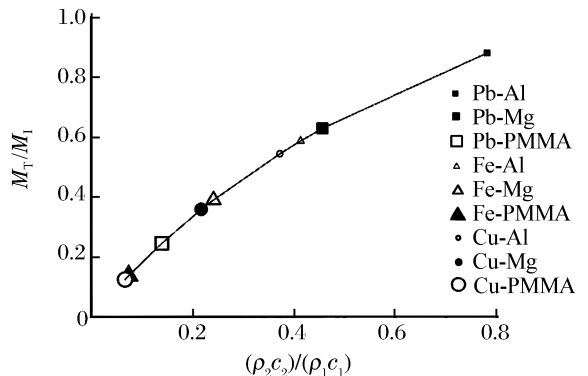


图 3 平面正碰时透射动量与入射动量之比

Fig. 3 The ratio of transmission and incidence momentums for planar impact

透射到 B 板的应力波到达自由面 PQ 时,从自由面向 B 板内部反射一束中心稀疏波,B 板开始向右运动。在 B 板中,入射波与反射波叠加后,将产生一拉伸波,当此拉伸波到达 A、B 两板交界面 mn 时,因界面不能承受拉伸而导致两板分开,B 板的后界面也变成了自由面,它以高于 A 板的速度向前飞行,在 A 板没有追上 B 板之前,A、B 板之间不再有波的相互作用,因此由(6)式表示的 B 板所收集的动量 M_T 也就被截留在 B 板内,B 板具有动量陷阱的功效。如同空气炮一样,把自由飞行的 B 板当作是高速飞行的平板冲击器,当它撞击靶板时,由动量守恒定律可知,冲击器动量的改变将引起靶中冲量的增加,在靶中产生应力波。带有不同级别动量的冲击器,可在靶中产生不同峰值应力的脉冲应力波,从原则上讲,只要有足够多不同冲击阻抗的材料,通过不同的组合,在较低的压力范围内,都可以调节到接近实验所需的各级别的压力值。

从上面的讨论可知,靶中瞬态应力波的产生与强度的调节,正是通过应力波与 A-B 板界面的作用和冲击阻抗之间的相互关系来控制的。

3 小步长调节靶中应力波宽度的方法

当 A、B 两板分离之后,B 板在空腔中自由飞行,B 板击靶后在靶中产生的应力波的宽度取决于 B 板的厚度和声速之比,如图 4 所示。靶中应力波的宽度

$$\Delta t = \frac{2l}{c_1} + \frac{c_2 - c_1}{c_2 c_1} \approx \frac{2l}{c_1} \quad (8)$$

当 B 板的材料取定后,只要变化冲击片 B 板的厚度 l ,就可方便地变化靶中应力波的宽度。对于层裂一类的实验,待测信号出现在应力脉冲的卸载段,在实验设计中,必须预先设定应力脉冲宽度,采用上述的 A、B 板在运动中分离,由 B 板控制脉宽的方法,就能够方便地调控到实验所需要的各种应力脉冲的宽度。

4 冲击器的运动速度与厚度的相关性

冲击器 B 板的运动速度取决于通过 A、B 两板的接触界面 mn 进入 B 板的动量(如图 2 所示),下面仍采用声学近似,对 B 板的运动速度与 B 板的厚度和入射波形状的相关性作简单分析。在应力、时间坐标系中,设在 A 板中传播的入射应力波的峰值幅度为 σ_0 ,波长为 t_0 ,B 板的厚度为 l ,根据(6)式,B 板的速度 v 可表示为

$$v = \frac{M_T}{\rho_2 l} = \frac{1}{\rho_2 l} \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \int_0^{t_1} \sigma_1 dt \quad (9)$$

如果在 A 板中传播的是三角形应力波,且应力幅度线性递降时, $\int_0^{t_1} \sigma_1 dt = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_0}{t_0} (t_0 - t_1) + \sigma_0 \right] t_1$,因为波在 B 板中来回一次的时间,也就是 B 板能截留动量的时间 $t_1 = \frac{2l}{c_2}$,所以从(9)式可得

$$v = \frac{4\sigma_0}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \left(1 - \frac{l}{c_2 t_0} \right) \quad (10)$$

从(10)式可知,当 $l \ll \frac{c_2 t_0}{2}$ 时, $v_{\max} \approx \frac{4\sigma_0}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$,当 $l = \frac{c_2 t_0}{2}$ 时, $v_{\min} = \frac{2\sigma_0}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$,所以有 $v_{\min} \approx \frac{1}{2} v_{\max}$,也就是说,在入射波为三角形脉冲时,B 板的飞行速度不仅与入射应力波的幅度相关,而且与它本身的厚度相关。但是,当在 A 板中传播的入射波为矩形脉冲时,在 $l \leq \frac{c_2 t_0}{2}$ 的条件下,容易证明有

$$v = \frac{4\sigma_0}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (11)$$

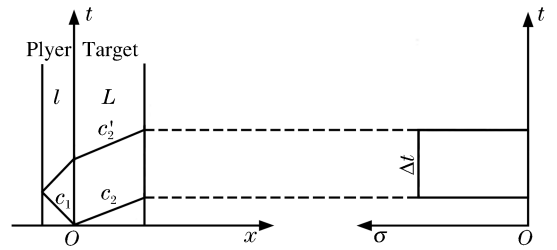


图 4 波形传播图和波剖面图
Fig. 4 Propagation and profile of waves

即对于矩形波,当 $l \leq \frac{c_2 t_0}{2}$ 时, B 板的速度与厚度无关。

当 B 板的厚度 $l > \frac{c_2 t_0}{2}$ 时,无论入射波是三角形或是矩形, B 板均收集入射波的全部动量,它的速度与 $1/l$ 成比例。但在实际应用中, B 板不能太厚,如果太厚,则 B 板有可能发生层裂。

5 靶中应力波平面范围分析

对于应力波剖面的连续测量,要求在测量的空间和时间范围内,满足一维应变条件,以便于实验结果的分析处理,这就要求冲击器与靶有较大的没有受到边侧稀疏影响的平面正碰范围。在接触爆轰时,边侧效应主要是在飞片的空腔加速飞行过程中逐步突显出来^[2]。但对于炸药驱动的高-低冲击阻抗组合双飞片加载装置,冲击器 B 板只受到起飞前的边侧影响,当 B 板与 A 板分离之后,两板之间不再有波的相互作用,因而也不再受到爆轰产物中进一步的边侧影响。也就是说,作为冲击器的 B 板,正好避开了边侧效应影响最显著的阶段,它的平面范围应该比接触爆轰驱动飞片运动时的平面范围大。冲击器 B 板很薄,在其内部传播的应力波在前后两个自由界面之间来回反射而迅速衰减,内部压力很快变为零,因此 B 板在空腔飞行中能基本保持起飞时的平面范围,不会再有明显的边侧效应。为了把边缘效应减至最小或者不考虑它, B 板必须相对地薄。实验证明,对于 $\varnothing 200$ mm 的装药,冲击器的平面范围可大于 $\varnothing 120$ mm。

6 可小步长调控靶中应力波形幅度和宽度的平面低压化爆加载装置

讨论了应力波的动量在不同介质边界的重新分配与影响动量在边界上转移的因素,以及由变化冲击片厚度来调节靶中应力波宽度的方法之后,设计出的可小步长调节靶中应力波形的平面低压化爆加载装置如图 5 所示。平面波发生器是为了把点起爆的散心爆轰波改造成平面爆轰波以使主药柱平面起爆,主药柱可用 TNT、T/B、R/C 等, T/B 与 R/C 是两种比 TNT 的 C-J 爆压更低的炸药。不同种类的炸药在高阻抗飞片中产生不同的峰值应力 σ_1 , 可根据实验需要进行选择,也可选择其他炸药。由于可供选用的不同冲击阻抗的材料有限,选择不同 C-J 值的低爆速炸药,作为第一步粗调,以降低高阻抗飞

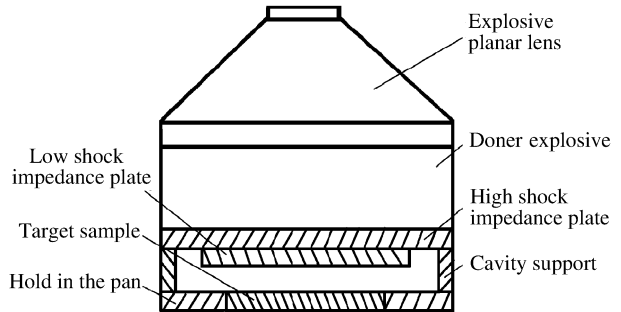


图 5 平面低压化爆装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the planar low-pressure explosive-loading device

片中入射应力 σ_1 是必要的。高阻抗材料可用 Pb、Cu、Fe 等一般材料,也可用 Ta、W 等阻抗更高的特种材料,低阻抗材料可用 Al、Mg、PMMA 等,若需要靶中的峰值应力高,则采用爆速高的炸药,阻抗较高且相近的组合飞片,若需要靶中峰值应力低,则采用低爆速炸药,波阻抗相差大的组合飞片。用常用的三种炸药、三种高阻抗和三种低阻抗飞片,可得到 27 种组合,预计在 Fe 靶中的峰值应力分布在 1~30 GPa 范围内,27 种组合相当于 27 个压力装置,除去压力值接近的重复装置,不同装置之间的压力差可控制到 2~3 GPa,冲击片的厚度可根据需要在 0.5~3 mm 范围内变化,对 Al 冲击片来说靶中应力波的宽度可在 0.15~1 μ s 范围内变化,冲击片厚度也可小于 0.5 mm,这样可以在靶中得到非常窄的应力脉冲。

A 、 B 两板分离之后, B 板惯性飞行,而 A 板的后界面仍受爆轰产物驱动,使 A 板作加速运动,一段飞行距离之后, A 板还可能追上 B 板,因此要适当选择飞行空腔,在 A 赶上 B 之前完成实验测量。飞行空腔不要过长,一般来说 10 mm 左右就可以了,为了延缓 A 板赶上 B 板的时间, A 板比 B 板厚。

给出一个低压装置系列,至于每个压力点上靶中应力波的波形差、对称性、重复性等问题,是个与

炸药的成份差、密度差、各部件的加工、装配公差、出平面透镜底部的爆轰波形态和其他偶然因素有关的工程和实验操作有关的问题,因此对每个装配件都要有合理的公差要求,每次实验都需按规范的程序操作。

采用图5所示的平面低压化爆加载装置和平板电容传感技术,得到的典型波剖面图形如图6所示。时间分辨的波形图清楚地表明,在应力脉冲的加载段出现了弹性波和塑性波的双波结构,应力脉冲的卸载段出现了层裂信号(包括层裂强度和层裂在靶样品中发生的位置),实验测量得出在 MB_2 镁中的峰压为3.43 GPa,在不锈钢中的峰压为6.42 GPa。靶中的压力还可以降得更低,用R/C炸药、Fe-PMMA组合飞片、且在炸药与Fe界面之间留5 mm的气隙,在Pb靶中峰压已降到接近1 GPa。而如果用TNT与钢接触爆轰时,在钢靶的峰压为31 GPa,即使采用低爆速的P/C炸药,钢靶中峰压也有12 GPa,接触爆轰时,靶中的压力和波长都不方便调控。采用上述的加载技术和测试技术,已对Ly12铝、 MB_2 镁等多种材料的弹塑性、动态断裂等冲击响应特性进行了实验研究^[3~4]。多年的实验证明,上述加载技术是有效的、可用的,它虽不能和空气炮一样连续变化靶中的峰压水平,但在弹塑性、层裂、多晶型相变等课题所常用的压力和波长区间内,可以作到小步长调控靶中的应力和按实验要求控制脉宽。也就是说,同样可以人为地控制应力加载的应力历史,以改变靶的受力状态,开展材料动态响应特性与应力相关性的深入研究。这正是本文较详细介绍这一加载技术的出发点。

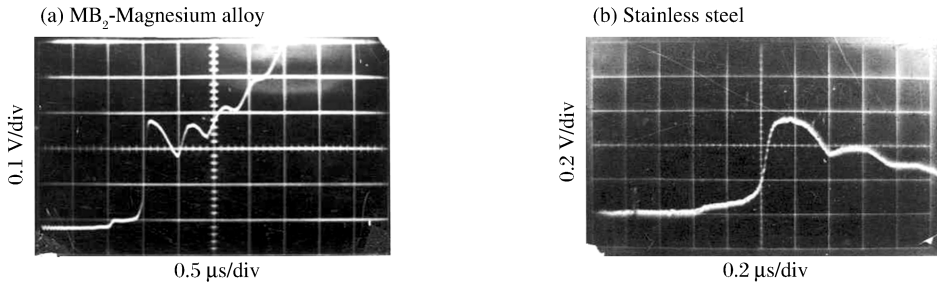


图6 实验测量的典型波形图

Fig. 6 The photographs of recorded wave profiles

7 结束语

在线弹性固体假设下,讨论了靶中应力波的可调控性,这种大大简化了的研究方法,对于判断拟采用的技术路线的可行性、快捷地解决应力波传播与与界面的相互作用等实际问题都是有效的,而且用这种简化方法预估的结果与实验测量相当接近。因此,用线弹性固体假设作为平面低压化爆加载装置物理设计的一种近似方法是可行的。爆轰实验前,作为靶样品中应力历史的预先设置和力学参量的粗估也是可用的。

可调控靶中应力波形的平面低压化爆加载技术,作为一种动态低压加载方式,有效地扩充了实验研究的手段,为从事材料动态响应特性研究的科技工作者提供了一种很好的实用技术。在没有空气炮或不宜使用空气炮的情况下,采用上述的平面低压化爆加载装置是一种合适的选择。

参考文献:

- [1] 莱茵哈特. 固体中的应力瞬变[M]. 杨善元,译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981: 52.
- [2] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 140.
- [3] 张万甲, 张玉松. 冲击载荷下铝和不锈钢层裂破坏的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1983, 3(1): 73-76.
ZHANG Wan-jia, ZHANG Yu-song. Experimental studies of spallfracture of aluminum alloy and stainless steel under impulse loadings[J]. Explosion and Shock Waves, 1983, 3(1): 73-76.
- [4] 张万甲, 张玉松, 宋春香. MB_2 镁等四种金属材料的本构关系和动态断裂研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(1): 44-53.

ZHANG Wan-jia, ZHANG YU-song, SONG Chun-xiang. Studies on the constitutional relations and the dynamic fracture for four kinds of metal materials including MB₂-magnesium[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(1): 44-53.

A planar explosive loading technique of GPa pressures and capable of adjusting the stress waves in targets

ZHANG Wan-jia*, LIU Cang-li

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The factors to affect the momentum partition and transition of stress waves passing an interface of two media have been analysed in this paper. In order to adjust the amplitude and width of the stress impulse in targets, the dependence of velocity and impactor thickness, as well as the flatness area of the wave front in targets are discussed. The examples of the planar GPa pressure explosive loading devices and its applications are given.

Key words: mechanics of explosion; stress wave width; planar explosive load; stress wave amplitude

* Corresponding author; ZHANG Wan-jia

Telephone: 0816-2493737

高压脉冲发生器介绍

高压脉冲发生器用于起爆火花式高压雷管,触发高压脉冲放电开关和 Max 发生器;也可作为小电流直流高压电源为高压储能网络充电。

高压脉冲发生器有三类:GMF-I 型、GMF-II 型和 GMF-III 型。I 型为通用型,在几十年爆轰物理实验中一直在应用。由于不断改进,技术成熟,是大型爆轰实验重要的配套设备,经多年的实践考核各项性能指标均满足实验需求、工作稳定可靠,确保实验万无一失。1989 年荣获国防科工委科学技术进步奖四等奖。II 型为高精密型,将数字延时及高压脉冲成形结合在一起,以 CPU8031 为控制核心。采用 VE4137A 型高电压、大电流、低抖动、快速氢闸流管构成高压脉冲形成级, MOSFET 作为驱动级。延时可控,延时范围为 10ns 至 99 μ s。技术先进,该型机与脉冲功率系统构成的成套设备荣获军队科学技术进步奖三等奖,该奖名为《脉冲功率系统初级触发技术》。III 型为程控型,提供程控起爆和时间基准信号。采用软硬件结合识别和过滤非正常触发起爆信号,仅执行真实的起爆信号。计算机对充电电压实施采集、分析和判断,光电传感器监视高压开关的工作状态,编程控制器(PLC)执行指令、采集和处理数据。采用多层屏蔽、光电耦合地隔离等措施,有强的抑制电磁干扰和射线辐射能力。《程控起爆技术研究》荣获 2005 年军队科技进步奖三等奖。



高压脉冲发生器

主要技术指标

型号	直流高压 /kV	输出高压 脉冲/kV	前沿/ns	相对外触发 延迟/ns	抖动/ns	可预置 延时/ns
GMF-I	2~16	8~15	≤25	2500~500	80	—
GMF-II	5~35	5~30	≤16	400±10	10	10~99000
GMF-III	0~20	8~15	<8	—	—	—

(中国工程物理研究院流体物理研究所提供)