

高压电雷管输出性能的研究

池家春

(1985年6月18日收到)

我们提出了以决定炸药冲击引爆进程的冲击波参量——积分能注量作为量度雷管输出性能的判据,并建立了非平面流场和高频电磁干扰场中的应力剖面测试技术,为定量评价雷管输出性能提供了一个新方法,并把雷管输出能力与它引爆炸药的能力紧密地联系起来。我们分析和比较了五种高压电雷管得到的结果。

一、引 言

雷管广泛地用作传爆序列的首级炸药部件。为确定传爆序列的可靠性和使雷管设计最佳化,需要有评价雷管输出性能的判据和相应的测试技术。

诸如“爆痕深度”、水中冲击波速度、管壳碎片速度和爆炸气体膨胀速度的测量等。评价雷管输出的传统方法,由于测到的数据与被发药引爆进程的特性没有充分的联系,因而都不能充分反映雷管引爆炸药的能力。而测量被发药达到爆轰的距离或给定厚度被发药末端输出情况是一种直接的检验,但实验复杂,费用昂贵。

本文在总结非均质炸药冲击引爆研究成果的基础上,提出以雷管输出冲击波的积分能注量作为性能判据。从而把雷管输出性能的评价与它引爆炸药的能力紧密地联系起来,对雷管底部与被发药密接的传爆序列尤其适用。同时建立了非平面流场和高频电磁干扰场中的应力剖面测试技术,分析和比较了五种高压电雷管得到的定量结果。结果表明,所提出的判据和应力剖面测试技术一起可用作定量评价雷管输出性能的可靠工具。

二、积分能注量判据

与雷管底部密接的被发药的引爆过程是冲击引爆过程。研究表明^{(1)·(2)},当用近似矩形的应力脉冲引爆非均质炸药时,存在临界能注量

$$E_c = \frac{\sigma^2 \tau}{\rho_0 D} \quad (1)$$

由此还可以引伸出 $\sigma u \tau = \text{常数}$ 、 $\sigma^2 \tau = \text{常数}$ 等临界引爆条件,其中 σ 、 D 、 u 和 τ 分别是炸药中初始冲击波的应力幅度、波速、粒子速度和脉冲持续时间, ρ_0 是炸药的初始密度。

雷管爆炸在炸药中产生的初始应力波是一个幅度随时间迅速衰减的发散波。隔板引爆实

验表明^[3], 对于这样的应力波也存在临界积分能注量

$$E_c = \frac{\int_0^{\infty} \sigma(t)^2 dt}{\rho_0 D} \quad (2)$$

我们更关心被发药的引爆进程(例如达到爆轰距离)与输入冲击波参量之间的关系, 而不仅是引爆判据。然而少数实验也已表明^[4], 当用近似矩形的应力脉冲引爆时, 炸药达到爆轰距离 x_b 与引爆脉冲能注量之间有如下关系

$$x_b E^b = a \quad (3)$$

其中 a 和 b 是炸药的特性常数。由此我们可进一步推论出, 对于幅度随时间迅速衰减的应力波, x_b 将与积分能注量

$$E = \frac{\int_0^{\infty} \sigma(t)^2 dt}{\rho_0 D} \quad (4)$$

相关, 即积分能注量是决定被发药冲击引爆进程的外部条件。显然, 用雷管对炸药输出的初始冲击波的积分能注量来表征雷管的输出能力是恰当的, 它把雷管输出性能的评价与它引爆炸药的能力紧密地联系起来。

三、应力剖面— $\sigma(t)$ 的测试技术

锰铜应力计(下称锰铜计)是测量平面冲击波应力—时间剖面(下称应力剖面)的常用定量工具, 但是要使锰铜计适合于电雷管输出应力剖面的测量还必须解决三个测试技术问题。这在1978年的探索性实验中已基本解决。本研究只作一些充实。现分述如下。

1. 发散流场中的应力剖面测试技术

雷管爆炸在介质中产生的流场是发散的。锰铜元件除了受应力作用产生电阻改变外, 也因发散流动产生长度增加带来的电阻改变。此时, 锰铜计的电阻—时间剖面(下称电阻剖面)是应力效应和长度应变效应叠加的结果。我们用压阻效应与锰铜计相比可忽略的康铜应变计(下称康铜计)结果, 校正实验得到的锰铜计电阻剖面。其原理如下

几何形状, 尺寸和结构都相同, 且波阻抗相近的两种计元件, 于同样的发散流场中, 它们所经历的长度变化即长度应变 ε_L 可认为是相同的。元件电阻 R 是应力 σ 和长度 L 的函数

$$R = R(\sigma, L) \quad (5)$$

当应力和长度同时改变时, 电阻改变是

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{\partial R}{\partial L} \cdot dL \quad (6)$$

由定义, $a = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial R}{\partial \sigma}$ —电阻应力系数, $\varepsilon_L = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$ —长度应变, $K = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_L}$ —电阻应变系数, 则有

$$\frac{dR}{R_0} = a \cdot d\sigma + K \cdot d\varepsilon_L \quad (7)$$

从 $\sigma_0 = 0$ 、 $\varepsilon_L = 0$ 和 R_0 开始积分, 得到

$$\frac{\Delta R}{R_0} = a \cdot \sigma + K \cdot \varepsilon_L \quad (8)$$

对锰铜,

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_m = a_m \cdot \sigma + K_m \cdot \varepsilon_L \quad (9)$$

对康铜, $a_c = 0$

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_c = K_c \cdot \varepsilon_L \quad (10)$$

另一方面, 由 $R = \rho \cdot (L/S)$, 其中 ρ 是电阻率, S 是元件横截面积。如在塑性变形过程中, 元件体积 V 保持不变, 则有

$$\begin{aligned} dV &= S_0 \cdot dL + L_0 \cdot dS = 0 \\ dS &= -S_0 \cdot \frac{dL}{L_0} \end{aligned} \quad (11)$$

Chen 等⁽⁵⁾的研究表明, 塑性变形对锰铜和康铜的电阻率没有影响, 于是在塑性变形过程中, 有

$$dR = \rho_0 \left(\frac{dL}{S_0} - \frac{L_0 dS}{S_0^2} \right) = 2\rho_0 \cdot \frac{dL}{S_0} \quad (12)$$

积分并考虑到

$$R_0 = \rho_0 \cdot \frac{L_0}{S_0}$$

得到

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 2 \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = 2 \cdot \varepsilon_L \quad (13)$$

即在塑性变形过程中, $K_m = K_c = 2$ 。因而 (9) 和 (10) 式可以相减而得到

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_m - \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_c = a_m \sigma \quad (14)$$

于是, 只要从锰铜计电阻剖面中减去康铜计电阻剖面就可得到只由应力引起的锰铜计电阻剖面, 也就可以按通常的锰铜计标定方程⁽⁶⁾换算出应力剖面。

在这里, 我们忽略了弹性和弹-塑性变形过渡区中两种计的 K 值的差别。Carlso 等的动态压缩和拉伸实验表明⁽⁷⁾, 对康铜, $K_c \equiv 2$, 对锰铜, 在 $\varepsilon_L > 2\%$ 时, $K_m = 2$, 在 $\varepsilon_L < 2\%$ 时, K_m 从 0.76 连续变化到 2.0。但由于这时应变本身很小, 仍视 $K_m = K_c$ 。所引起的误差 (它使应力低估) 处在实验误差之内, 是允许的。

2. 高频电磁干扰场中的测试技术

我们所测试的雷管是用高电压脉冲 (S_{33} , S_{34}) 或高电压大电流脉冲 (W_{91} , W_{92} , W_{93}) 点火的, 会在一般锰铜计和康铜计测试回路中感应几伏到十几伏的高频干扰讯号, 其持续时

间可达几个微秒,完全可能淹没所测电讯号。干扰主要来自点火电缆末端与雷管之间接线回路面积中的高频电磁辐射,其次是高电压脉冲传输电缆和讯号传输电缆之间的串扰和不恰当的接地造成的耦合干扰。为把这些干扰降低到不影响测量的程度,特别对康铜计,它的电阻剖面是时间的缓变函数,要求在讯号出现之前将干扰降到零。我们摸索出了一套提高讯噪比的措施。

提高讯号幅度的措施是:(1)针对雷管作用面积小的特点,研制了小型M型计(图1),使计电阻比工字型提高5倍;(2)专门制造了大电流恒流电源给计供电,使观测电流提高3倍。在恒流测试回路下,讯号幅度与计阻值和观测电流成正比,这些措施可使讯号幅度较以往提高近15倍。

在降低干扰的措施是:(1)采用电磁屏蔽的实验装置(图2)来降低渗透到测试回路中的电磁辐射能量;(2)严格控制点火电缆末端与雷管之间的接线回路面积来降低电磁辐射能量(图2);(3)严格隔离高电压脉冲传输电缆和讯号传输电缆来防止电缆间的串扰作用;(4)采用讯号记录端单点接地测试技术来防止来自接地端的耦合干扰。这些措施使干扰降低近一个量级。

上述两方面的措施使讯噪比提高两个量级以上。对用高电压脉冲点火的雷管,仅在点火脉冲到达点火头时刻,留下不到0.1伏孤立尖峰干扰讯号;对用高电压大电流脉冲点火的雷管,在触发脉冲到达点火电源和该电源输出的大电流脉冲到达点火头时刻,都出现了0.2伏左右的干扰讯号,并引起扫描线不规则地波动,但这种波动在待测讯号出现之前0.2-0.5微秒内即行消失,不再影响讯号的测量。

3. 标准试件的选择

我们要测量的是雷管爆炸产生的雷管—炸药界面上的初始应力剖面。由于其应力幅度与被发药的冲击阻抗直接相关,又要避免所测应力剖面受到被发药化学反应的影响,因此要选择一种合适的情性材料作为标准试件,来比较各种雷管的输出性能。我们认为用 F_4 (聚四氟乙烯)块作为标准试件比较合适,其理由是:(1) F_4 是一种情性材料;(2) F_4 的冲击阻抗与通用炸药相近,测量结果接近对炸药的输出情况;(3)标准材料与计绝缘材料相同,计与试件达到应力平衡的时间就是0.02毫米厚的计元件与 F_4 达到应力平衡的时间,在15帕斯卡应力下近似为10毫微秒,大大提高了计的时间分辨能力。

四、实验和结果

全部实验是用分别示意于图1和图2的锰铜或康铜元件和实验装置进行的。

1. 输出峰值应力测量结果

我们从多发锰铜计峰值电阻改变的平均值和相应时刻的多发康铜计电阻改变的

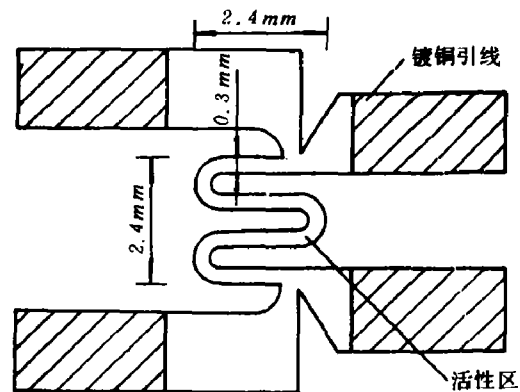


图1 锰铜或康铜元件

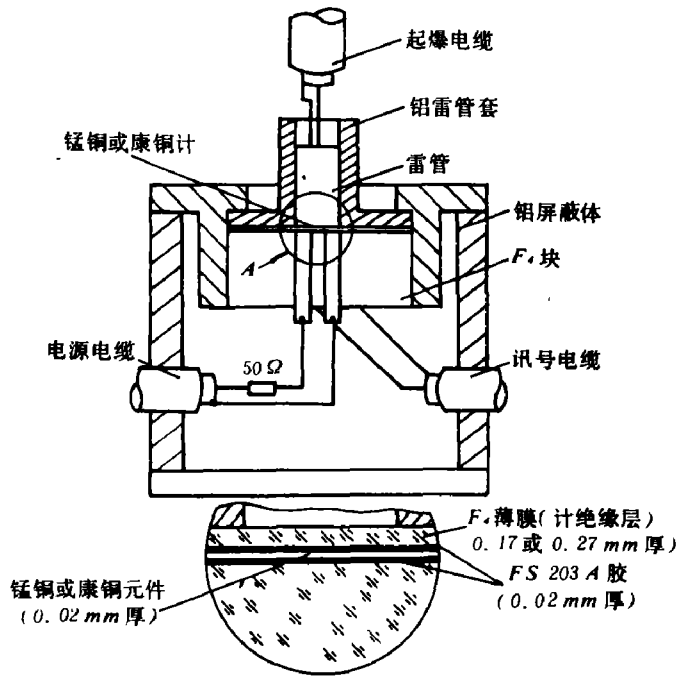


图 2 实验装置示意

平均值按 (14) 式得到仅由峰值应力产生的锰铜计峰值电阻改变 $(\Delta R/R_0)_{max}$ ，再换算出输出峰值应力 σ_{max} 。0.17 和 0.27 毫米厚 F 处的 σ_{max} 值列于表 1。象雷管这样的爆炸器件在介质中产生的冲击波，因对介质进行不可逆加热和波的膨胀效应，其幅度将随传播距离 x 按指数规律

$$\sigma_{max}(x) = \sigma_{max}(0) \cdot \exp(-\beta x) \quad (15)$$

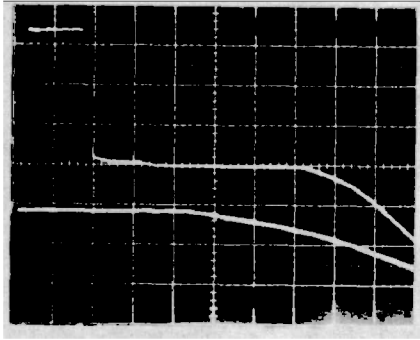
衰减，⁽⁴⁾ 其中 $\sigma_{max}(0)$ 是雷管—介质界面处的峰值应力。利用上述两个 F 厚度处的峰值应力数据按这个规律外推得到的 $\sigma_{max}(0)$ 值也列于表 1。从表列数据，我们看出，这几种雷管的输出峰值应力顺序是， $W93 > W92 > S33 > S34 > W91$ ；同种不同批雷管的输出峰值应力是相同的。

表 1 各种雷管输出峰值应力和脉冲前沿上升时间测量结果

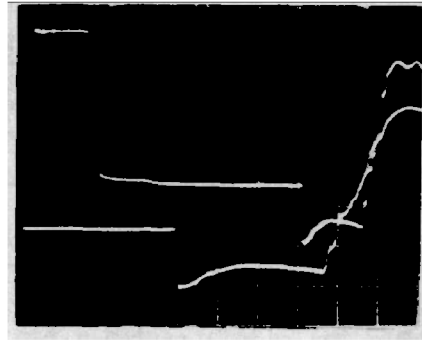
型号	批号	0.17 mm 厚 F 处		0.27 mm 厚 F 处		界面峰值应力 $\sigma_{max}(0)$ (GPa)	脉冲前沿上升时间 τ (ns)
		发数	σ_{max} (GPa)	发数	σ_{max} (GPa)		
S33	803	9	14.9 ± 0.4	4	14.7 ± 0.4	15.2 ± 0.4	17 ± 3
	832			4	14.7 ± 0.3		17 ± 3
S34		10	14.2 ± 0.4	4	14.0 ± 0.4	14.5 ± 0.4	20 ± 3
W91	782	8	13.1 ± 0.5	5	12.9 ± 0.5	13.4 ± 0.5	29 ± 3
	831	6	13.2 ± 0.3	5	13.0 ± 0.4	13.5 ± 0.4	31 ± 3
W92		5	15.5 ± 0.3	5	15.2 ± 0.5	15.7 ± 0.5	17 ± 3
W93		5	15.7 ± 0.3	5	15.3 ± 0.7	15.9 ± 0.7	14 ± 3

2. 输出应力剖面测量结果

从0.27毫米厚F₂处的锰铜计和康铜计得到的典型记录示于图3。



a) 锰铜计记录



b) 康铜计记录

示波灵敏度: 1V/div, 上线500ns/div, 下线200ns/div

下线相对上线延迟2.6μs开始扫描

图3 从S33雷管得到的典型记录

把(14)式用到整个锰铜计和康铜计的平均电阻剖面得到0.27毫米厚F₂处仅是应力产生的锰铜计电阻剖面(见图4),再换算出相应的应力剖面。而后假定雷管—F₂界面处的归一化应力剖面与0.27毫米厚F₂处相同,就得到此界面处的应力剖面,所得结果示于图5。

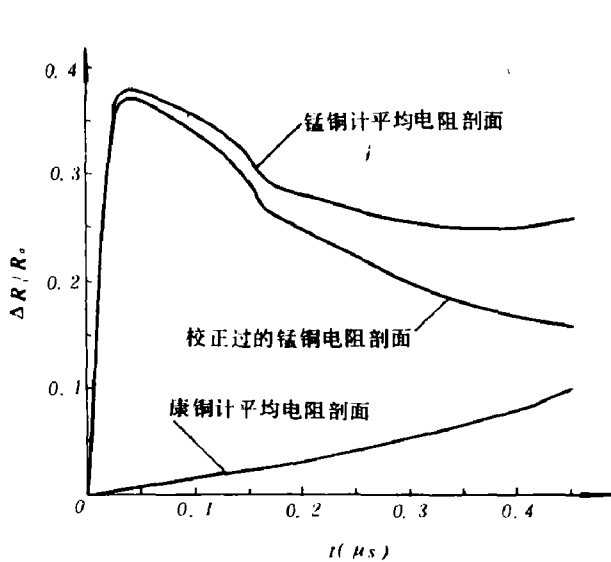


图4 锰铜计电阻剖面校正示例(S33雷管)

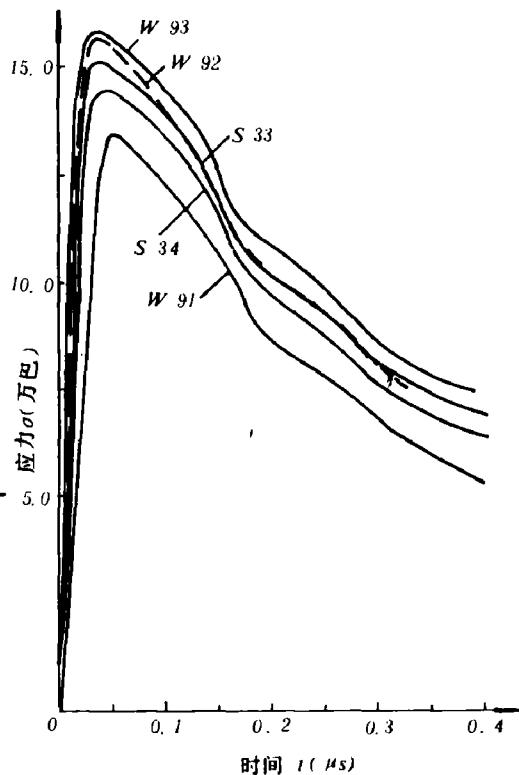


图5 五种雷管的输出应力剖面

图6和图7分别比较不同批的S33和W91雷管的归一化应力剖面。可以看出:波形特征相同;在实验的标准偏差范围内,它们相重合。

结合输出峰值应力结果, 可以得出结论: 同种不同批雷管输出应力剖面相同, 说明不同批雷管的性能是重复的。

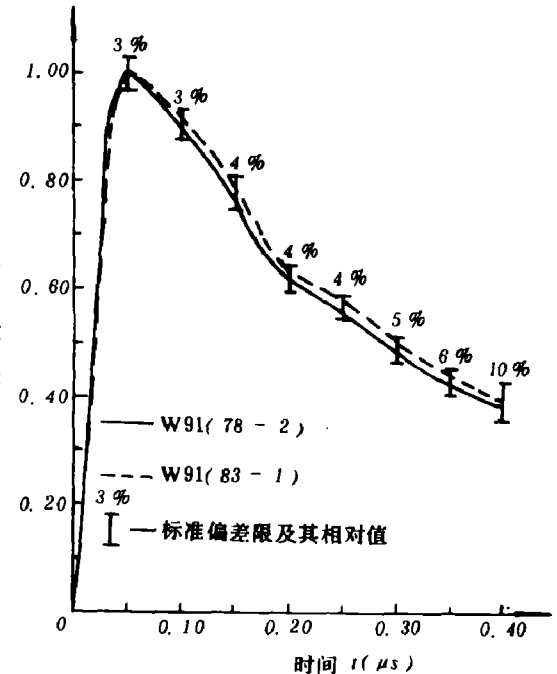
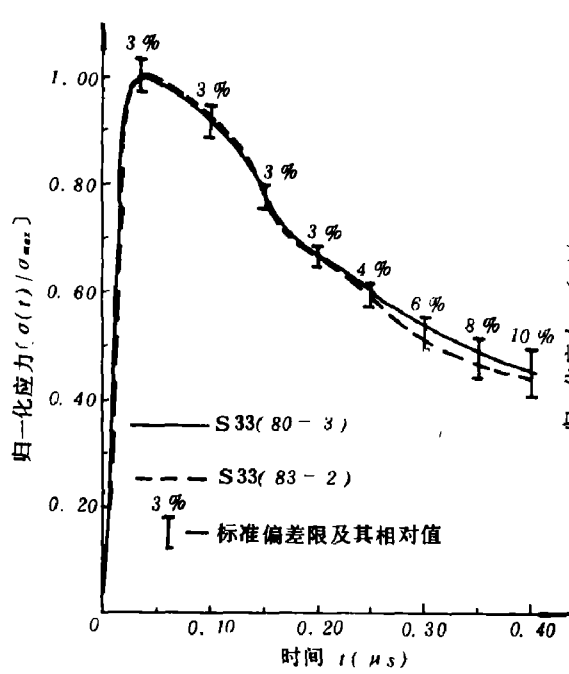


图6 两批S33雷管归一化输出应力剖面的比较

图7 两批W91雷管归一化输出应力剖面的比较

图8 比较了五种雷管的归一化卸载应力剖面。可以看出: 卸载波形特征相同; 在实验的

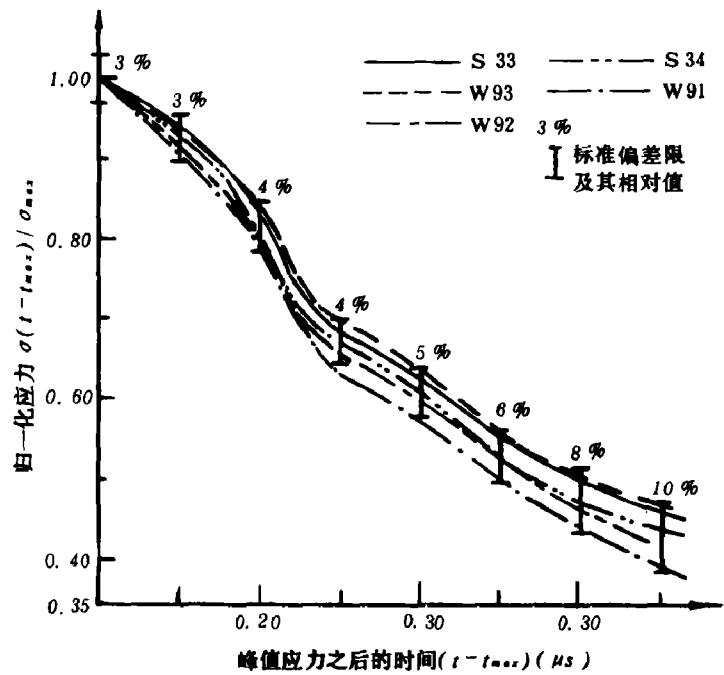


图8 五种雷管归一化卸载应力剖面的比较

标准偏差范围内, 它们基本重合, 只有 $W91$ 雷管的结果稍微偏低。因此我们得出结论: 这些雷管的卸载应力剖面是相似的。这种相似性可归因于这些雷管外部结构和实验环境的相似性, 特别是由于雷管横向尺寸相同和实验装置相同, 造成了同样的边侧稀疏条件。

从这些测量, 我们也得到了各种雷管输出应力脉冲前沿的上升时间 τ (从 $0.1\sigma_{max}$ 上升到 $0.9\sigma_{max}$ 的时间间隔), 平均结果也列于表 1。我们看到, 这些雷管输出应力脉冲的上升时间顺序是: $W93 < W92 = S33 < S34 < W91$; 同种不同批雷管, 这个上升时间相同。

但是, 也可看到, 除了 $W91$ 雷管的上升时间较大外, 其他四种雷管上升时间的差别都很小。因为还没有实验数据表明这样小的上升时间差别对被发药的引爆进程会产生明显的影响, 作为一级近似, 可以视为它们基本相同。于是我们进一步认为, 这些雷管的整个输出应力剖面是基本相似的。

五、分析讨论

1. 各种雷管输出性能的比较

如前指出: 这几种雷管的输出应力剖面基本相似, 即它们的归一化应力剖面 $\sigma(t)/\sigma_{max}$ 基本重合。积分能注量是

$$E = \frac{\int_0^{\infty} \sigma(t)^2 dt}{\rho_0 D} = \sigma_{max}^2 \cdot \left\{ \frac{\int_0^{\infty} (\sigma(t)/\sigma_{max})^2 dt}{\rho_0 D} \right\} \quad (16)$$

在这几种雷管输出峰值应力范围内, 冲击波速度变化不大, 那么方括号内的值基本相等。因此对这几种雷管而言, 我们有

$$E \propto \sigma_{max}^2 \quad (17)$$

即它们输出能力的相对大小与输出峰值应力的平方成正比。若以 $S33$ 雷管为标准, 它们的相对比值是

$$E_{93}/E_{92}/E_{33}/E_{34}/E_{91} = 1.09/1.07/1.00/0.91/0.79$$

其中 $W91$ 雷管的结果略高估了些。

2. 同类型雷管结果的比较

$W91$ 、 $W92$ 和 $W93$ 三种雷管都是用高电压大电流脉冲点火的, 装药种类、压制条件和点火条件都相同。它们的差别仅在于 $W92$ 和 $W93$ 雷管中的高密度主装药高度分别比 $W91$ 的高 1 和 2 毫米。我们的结果表明: $W92$ 和 $W93$ 雷管的输出峰值应力相对 $W91$ 有明显提高而脉冲前沿上升时间明显缩短; 但 $W93$ 相对 $W92$, 这两方面的差别并不大。在现有点火条件下, $W92$ 雷管的输出峰值应力已达到通过增加主装药高度的办法所能达到的最高值的 98%, 因此 $W92$ 雷管接近于最佳装药设计。

$S33$ 和 $S34$ 两种雷管都是用高压脉冲点火的, 点火和压制条件相同, 它们的主要差别在于 $S33$ 雷管中起爆药量比 $S34$ 中的多 0.07 克而输出峰值应力和前沿上升时间也有相应的差别。

由此看来, 雷管中各种装药量的改变都会在一定程度上影响它的输出性能, 但达到一定

程度后趋向于稳定。

3. 关于输出峰值应力测量

在数据处理中我们发现, 直接用未对元件拉伸效应校正过的0.17毫米厚 F 处的锰铜计峰值电阻改变计算出的峰值应力与前述外推得到的界面峰值应力 $\sigma_{max}(0)$ 完全相同, 即经0.17毫米厚 F 后峰值应力衰减量与此处的元件拉伸效应造成的峰值应力校正量相等。因此在只对雷管输出峰值应力感兴趣的测量中, 可以直接使用0.17毫米厚 F 处的锰铜计数据计算界面峰值应力, 不必使用康铜计, 这可大大减小实验量和简化数据处理过程。

六、结 论

我们在总结炸药冲击引爆研究成果的基础上提出了以决定炸药冲击引爆进程的冲击波参量——积分能注量作为量度雷管输出性能的判据, 它把雷管输出性能的评价与它引爆炸药的能力紧密地联系起来。

我们建立了使用锰铜计和康铜计的非平面流场和高频电磁干扰场中的应力剖面测试技术。对五种雷管得到了定量结果。

结果表明: 这五种雷管的输出应力剖面基本相似, 它们的输出能力(积分能注量)与输出峰值应力的平方成正比。它们的相对比值是

$$E93/E92/E33/E34/E91 = 1.09/1.07/1.00/0.91/0.79$$

同种不同批雷管输出性能相同; W 型雷管中的 $W92$ 接近最佳装药设计。

吴国栋、杨琼松、桂质蕤等同志参加了实验工作, 杨琼松同志制作了所用的恒流电源, 特此致谢。

参 考 文 献

- (1) Walker, F. E. and Wasley, R. J., *Explosivstoffe* 17(1) (1969), 9.
- (2) Cheung, H. et al., *UCRL-76578* (1975).
- (3) Foam, G. C. W., Coley, G. D., *7th. Symp. (Int.) on Detonation* (1981), 278.
- (4) 吴国栋, (私人通讯)。
- (5) Chen, D. Y., et al., *J. App. Phys.* 55(11) (1984), 3984.
- (6) 池家春, 吴国栋, *爆炸与冲击*, 3(3) (1983), 75.
- (7) Carlson, G. H. and Charest, J. A. *LA-UR-81-2343* (1981).
- (8) Klee, ch., et al., *AIP Conf. Proc., Shock Waves in Condensed Matter* (1981), Edited by Nellis, W. J. et al., New York (1982), 486.

STUDIES ON THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF SOME HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DETONATORS

Chi Jiachu

Abstract

We present a criterion, which characterizes the output performance of some kinds of detonators by means of the integrated energy flux, a shock wave parameter controlling shock-initiation process of explosives, and propose an experimental technique used for measuring stress profiles in non-planar flow field and high-frequency electromagnetic field. It is a new method for quantitative evaluation of the output performance of the detonator and connected closely the output performance of the detonators with their capability of shock-initiation. We also analysed and compared the results obtained for five kinds of high-voltage electric detonators.

不耦合装药孔壁变形的研究

张奇

(1985年1月23日收到)

本文通过水泥砂浆试件孔壁变形的X线摄影研究,分析了在不耦合装药条件下的孔壁质点位移、孔壁应变率以及试件变形与破坏过程。

一、前言

随着光面爆破应用的日益广泛,迫切需要对光面爆破机理进行深入的探讨,由于光面爆破周边孔采用不耦合装药,因此要完善光爆参数的理论计算,选择合理的爆破参数,就必须首先确定不耦合装药条件下爆炸应力场的分布以及孔壁周围的变形、破坏和飞散。但是,由于不耦合装药爆炸气体膨胀的复杂性,使得理论上确定孔壁变形与破坏十分困难。它不仅与装药的爆轰特性有关,而且也与不耦合系数的大小和介质的动态响应有关。

许多学者曾提出过多种孔壁质点速度的计算模型⁽¹⁾,但无论哪种模型,其中都有一个或几个常数需要实验确定,因此孔壁质点速度的实验研究变得更为重要。但是,由于孔壁的应变率很高,即便是工程爆破,其孔壁处的应变率也往往在 10^4 (1/s)以上。如果采用电测,则要求测试系统具有相当高的频率响应。闪光X射线仪具有很强的穿透能力,这就为孔壁变形的摄影研究提供了可能性。