

# 接触面起爆方式下的冲击波加载研究<sup>1)</sup>

晋艳娟<sup>2)</sup> 张柱<sup>3)</sup> 刘建月

(太原科技大学应用科学学院, 太原 030024)

**摘要** 基于叠加原理, 利用炸药接触面起爆方式, 实现对可压缩固体材料的矩形波加载. 通过联立爆炸产物和可压缩固体的  $(u, p)$  曲线以及综合考虑炸药与材料试件各自由边所受稀疏波干扰情况, 从理论上给出冲击波平台压力和冲击波加载平台宽度的计算方法, 为将来利用接触爆炸实现对材料试件的近似矩形波加载提供理论基础.

**关键词** 接触面起爆, 矩形波, 平台压力, 平台宽度

中图分类号: O383 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-13-450

## SHOCK WAVE LOADING OF CONTACT SURFACE DETONATION MODE<sup>1)</sup>

JIN Yanjuan<sup>2)</sup> ZHANG Zhu<sup>3)</sup> LIU Jianyue

(School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract** Based on the principle of superposition, an explosive contact surface detonation model is used to achieve the rectangular wave loading on a compressible solid material. Via integrating the  $(u, p)$  curve for the explosion products and the compressible fluid, the shock pressure and the shock wave loading platform width are obtained with consideration of the interference from the sparse wave in explosives and materials at their free edges. Theoretical analysis provides a theoretical foundation for the substantially rectangular wave loading of specimens using the contact explosion in the future.

**Key words** contact surface detonation, rectangular wave, pressure of platform, width of platform

实验是研究材料力学特性的最基本手段, 传统的材料动态力学性能研究实验设备主要有: 液压实验系统, 落锤实验系统, SHPB 实验系统, 轻气炮和爆炸加载等. 这几类实验系统各有所长, 可以提供多种应变率<sup>[1-3]</sup>, 研究发现: SHPB 实验系统和轻气炮是目前最为常用的动态加载实验设备, 所采用的驱动源动力均为高压气体, 在被加载材料试件内部可形成近似矩形加载波. 对于爆炸加载而言, 一种方法是先利用爆炸驱动金属飞片, 再用高速飞片实现对材料试件的近似矩形波加载, 中国工程物理研究院的孙承纬等<sup>[4]</sup>、赵峰等<sup>[5]</sup>和文尚刚等<sup>[6]</sup>利用平面波发生器, 实现了多级爆轰驱动技术, 北京理工大学

的栾广博等<sup>[7]</sup>和张柱等<sup>[8-9]</sup>利用阶梯型炸药驱动锥形金属飞片, 进行了大尺寸加载实验的初步研究工作; 另一种方法是利用接触爆炸直接对材料试件进行加载, 但一般情况下只能在材料试件内部形成三角形加载波, 实验数据很难测定, 结果比较离散, Gebbeken 等<sup>[10]</sup>在点起爆的方式下实现了对真实混凝土的三角形冲击波加载, 得到了不同深度处的时间-压力曲线. 那么, 是否可以通过不同的装药设计或者不同的起爆方式, 在接触爆炸情况下实现对材料试件的近似矩形波加载呢?

基于上述考虑, 本文对接触面起爆方式下的冲击波加载进行了理论研究, 给出冲击波加载对应的

2013-10-30 收到第 1 稿, 2013-12-24 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (11102125) 和太原科技大学博士启动基金 (20132012) 资助项目.

2) 晋艳娟, 1979 年生, 女, 讲师, 博士, 主要从事高性能复合材料制备研究. E-mail: jinyanjuan2003@163.com

3) 张柱, 1979 年生, 男, 讲师, 硕士, 主要从事混凝土材料动态力学性能研究. E-mail: 326015847@qq.com

平台压力和矩形加载波平台宽度的理论计算方法,使利用接触爆炸实现近似矩形波加载成为可能。

## 1 矩形加载波形成机理分析

在利用飞片进行动态加载的实验中,理想情况下,会在材料试件内部产生一个矩形加载波.炸药爆炸一般产生的为三角波( $p_g$ 为压力峰值),如果有  $n$  个相同的三角形冲击波,按照时间到达的先后顺序依次叠加,便可得到带有平台的加载冲击波( $t_g$ 为平台宽度),平台上带有明显的压力震荡,如图 1 所示.如果相邻两个三角形波的时间间隔逐渐缩短,甚至连续,叠加所得平台上的震荡就会消失,最终必将获得近似矩形加载波。

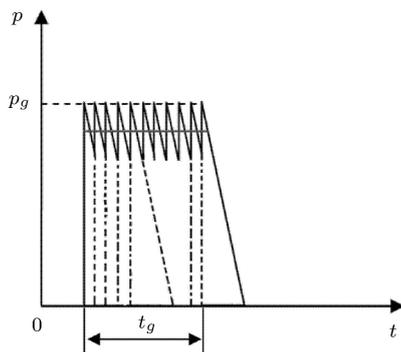


图 1 三角形波叠加成带矩形加载波示意图

基于图 1 所示的叠加原理,采用接触面起爆加载方式(如图 2 所示),可以获得带平台的加载波.理想情况下,把炸药看成由无数个矩形微元体组成,分别为 1, 2, ..., 当炸药在接触面线性起爆后,爆轰波阵面向右逐渐传播,整块炸药依次被引爆,相当于首先是微元体 1 被引爆,在固体表面施加第 1 个三角形冲击波;然后是微元体 2 被引炸,在固体表面施加第 2 个三角形冲击波;再后微元体 3 被引炸,在固体表面施加第 3 个三角形冲击波,后续微元体依次被引炸,产生连续不断的三角形冲击波,依次到达固体表面.由于这些三角形冲击波是连续到达固体表面的,使固体表面一直维持着平稳的压力供应,

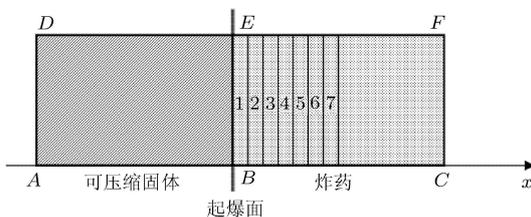


图 2 接触面起爆加载模型(平面轴对称)

最终必然会在固体表面获得近似矩形加载冲击波。

为验证上述矩形加载冲击波的形成机理是否可行,利用 AUTODYN 软件建立了与图 2 相同的接触面起爆模型(平面轴对称问题),模型中所用材料均选自软件自带材料库,分别为 AIR, COMP B 和 AL2024,得到了接触面固体表面的时间-压力曲线,如图 3 所示.时间-压力曲线中存在着明显的加载平台,说明接触面起爆方式可以得到近似矩形加载波.此外,时间-压力曲线刚开始存在很大的压力峰值,可能是起爆瞬间化学反应区内的化学峰造成的,该峰值在材料内部传播过程中会很快衰减,可由数值模拟证实这一点。

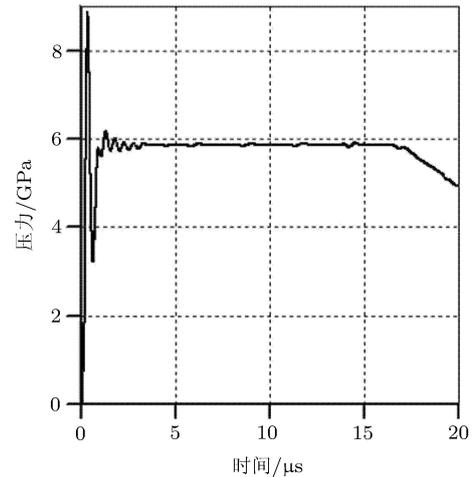


图 3 接触面中心点的时间-压力曲线

## 2 冲击波平台压力计算

接触爆炸条件下,固体可以看成流体处理,故称为可压缩流体.以下理论推导公式涉及符号有  $S, e, p, D, \rho, \gamma, u, \tau, c$ , 分别代表熵、内能、压力、冲击波波速、密度、绝热指数、粒子速度、比容、声速.符号下角标带“J”的表示爆轰波阵面上的参数,上角标带“\*”的表示固体材料的参数,下角标带“0”的表示材料初始参数。

设  $x < 0$  部分为可压缩流体,  $x \geq 0$  部分为炸药柱,炸药在  $x = 0$  处起爆,如图 2 所示,爆炸产物和流体的  $u-p$  曲线分别为<sup>[11]</sup>

$$u = u_J + \frac{2c_J}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{p}{p_J} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$u = -\sqrt{\frac{2\tau_0^*}{\gamma^* + 1}} \frac{p}{\sqrt{p + \frac{2}{\gamma^* + 1} \rho_0^* c_0^{*2}}} \quad (2)$$

在爆轰波阵面上

$$\left. \begin{aligned} u_J &= \frac{D_J}{\gamma + 1}, \quad c_J = \frac{\gamma D_J}{\gamma + 1}, \quad p_J = \frac{\rho_0 D_J^2}{\gamma + 1} \\ \rho_J &= \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0, \quad \tau_0^* = \frac{1}{\rho_0^*} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

利用逐次逼近法便能求得式 (1) 和式 (2) 确定的两  $u-p$  曲线的交点  $(\bar{u}, \bar{p})$ , 即得接触面起爆方式

下可压缩固体的表面压力和粒子速度. 显然, 当被研究固体材料确定时, 选用不同的炸药对应不同的平台压力; 一旦炸药和固体材料两者都确定, 平台压力即确定不变, 与材料几何尺寸无关. 表 1 为 3 种常用炸药 (TNT (2,4,6-Trinitrotoluene), COMP B 和 PETN1.77) 与 3 种代表材料 (Al, Cu 和 W) 作用后的平台压力和粒子速度.

表 1 3 种常用炸药与 3 种代表材料作用后的平台压力和粒子速度

炸药类型	炸药材料参数					固体材料参数			固体材料	理论值		
	$\rho_0 /$ ( $t \cdot m^{-3}$ )	$D_J /$ ( $km \cdot s^{-1}$ )	$P_J /$ GPa	$C_J /$ ( $km \cdot s^{-1}$ )	$\gamma$	$\gamma^*$	$\rho_0^* /$ ( $t \cdot m^{-3}$ )	$C_0^* /$ ( $km \cdot s^{-1}$ )		$\tau_0^*$	$\bar{u} /$ ( $km \cdot s^{-1}$ )	$\bar{p} /$ GPa
TNT	1.630	6.93	19.570	5.198	3	3	2.785	5.328	0.359	Al	-0.286	4.478
						3	8.930	3.940	0.112	Cu	-0.140	5.121
						3	18.167	4.030	0.055	W	-0.073	5.439
COMP B	1.717	7.98	27.335	5.985	3	3	2.785	5.328	0.359	Al	-0.377	6.011
						3	8.930	3.940	0.112	Cu	-0.190	6.999
						3	18.167	4.030	0.055	W	-0.100	7.506
PETN1.77	1.770	8.30	30.484	6.225	3	3	2.785	5.328	0.359	Al	-0.411	6.602
						3	8.930	3.940	0.112	Cu	-0.209	7.738
						3	18.167	4.030	0.055	W	-0.111	8.329

### 3 矩形加载波平台宽度计算

结合图 2 分析发现: 加载冲击波的平台宽度取决于  $AD, DE, CF$  和  $EF$  4 个边上的稀疏波作用. 对于  $B$  点的压力来说, 主要是看  $AD, DE, CF$  和  $EF$  4 个边上的哪个反射稀疏波先到达  $B$  点, 一旦有稀疏波到达, 压力平台将不能维持, 压力开始下降.

设  $AD = BE = CF = a_1, BC = EF = a_2, AB = DE = a_3$ , 取爆轰产物的绝热指数  $\gamma = 3$ , 结合波系分区, 爆轰产物包括常数区 I 和中心稀疏区, 爆轰产物中心 [12]

$$c = \frac{(\gamma - 1)x}{(\gamma + 1)t} + \frac{D_J}{\gamma + 1} \quad (4)$$

如不考虑爆炸产物与流体分界面的运动, 将其看成固壁, 此时常数区 I 中

$$u = 0, \quad c = D_J/2 \quad (5)$$

中心稀疏区中

$$D_J/2 \leq x/t \leq D_J, \quad D_J/2 \leq c \leq 3D_J/4 \quad (6)$$

显然,  $c = 3D_J/4$  对应的是爆轰波阵面上的声速  $c_J$ , 其值在爆轰产物中最大.

(1) 炸药侧向 ( $EF$ ) 稀疏波沿爆轰波阵面上的传播速度最大, 其到达  $B$  点所需时间

$$t_1 = \frac{a_1}{c_J} = \frac{4a_1}{3D_J} \quad (7)$$

(2) 炸药的后自由面 ( $CF$ ) 稀疏波传到  $B$  点所需时间包括两部分  $t_a$  和  $t_b$ ,  $t_a$  代表爆炸冲击波由  $BE$  传到  $CF$  所用时间,  $t_b$  代表反射稀疏波由  $CF$  传回  $BE$  所用时间.

$$t_a = \frac{a_2}{D_J} \quad (8)$$

当爆炸冲击波传到  $CF$  时, 其后区域均为爆轰产物, 分别为常数区 I 和中心稀疏区, 两个区的对应长度均为  $a_2/2$ . 故  $t_b$  可分两段计算:  $t_{b1}$  代表常数区中的传播时间,  $t_{b2}$  代表中心稀疏区中的传播时间

$$\left. \begin{aligned} t_{b1} &= \frac{a_2/2}{D_J/2} = \frac{a_2}{D_J} \\ t_{b2} &= \frac{a_2/2}{(D_J/2 + 3D_J/4)/2} = \frac{4a_2}{5D_J} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$t_2 = t_a + t_b = \frac{a_2}{D_J} + \left( \frac{a_2}{D_J} + \frac{4a_2}{5D_J} \right) = \frac{14a_2}{5D_J} \quad (10)$$

(3) 固体中侧向 ( $DE$ ) 稀疏波到达  $B$  点所需时间

$$t_3 = \frac{a_3}{c_0^*} \quad (11)$$

(4) 固体中前自由面 ( $AD$ ) 稀疏波传到  $B$  点所需时间

$$t_4 = \frac{a_3}{c_0^*} + \frac{a_3}{c_0^*} = \frac{2a_3}{c_0^*} \quad (12)$$

最终, 接触面  $B$  点爆炸冲击波的压力平台宽度

$$t_e = \min(t_1, t_2, t_3, t_4) = \min\left(\frac{4a_1}{3D_J}, \frac{14a_2}{5D_J}, \frac{a_3}{c_0^*}, \frac{2a_3}{c_0^*}\right) \quad (13)$$

由式 (13) 可知, 冲击波平台宽度与加载模型几何尺寸、炸药的冲击波波速  $D_J$  和固体材料中的声速  $C_0^*$  有关. 由式 (7) 和式 (10) 可知, 确定炸药几何

尺寸时, 应尽量使  $t_1 = t_2$ , 即  $a_1/a_2 = 21/10$ , 此时两侧稀疏波同时达到, 炸药利用率最高; 当  $a_1/a_2 < 21/10$  时, 炸药侧向稀疏干扰为主; 当  $a_1/a_2 > 21/10$  时, 炸药后自由面稀疏干扰为主, 此时固定  $a_1$  不变, 改变  $a_2$ , 可得到不同的冲击波平台宽度. 确定固体材料试件尺寸时除了考虑  $t_3, t_4$  外, 还应该考虑加载实验中的样品设计要求, 满足宽厚比<sup>[13]</sup>, 确保数据采集系统能得到有效的实验结果. 表 2 以 COMP B 炸药为例, 给出了几种尺寸条件下的平台宽度理论计算值.

表 2 COMP B 炸药接触面起爆时, 几种尺寸对应平台宽度理论值

所用材料及参数	$a_1/\text{mm}$	$a_2/\text{mm}$	$a_3/\text{mm}$	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	$t_3/\mu\text{s}$	$t_4/\mu\text{s}$	平台宽度 $t_e = \min(t_1, t_2, t_3, t_4)$
COMP B: $D_J = 7980 \text{ m/s}$ AL: $c_0^* = 5328 \text{ m/s}$	100	25	100	16.71	8.77	18.77	37.54	8.77
	100	36	100	16.71	12.63	18.77	37.54	12.63
	100	44	100	16.71	15.44	18.77	37.54	15.44
	100	47	100	16.71	16.49	18.77	37.54	16.49
	100	50	100	16.71	17.54	18.77	37.54	16.71
	100	75	100	16.71	26.32	18.77	37.54	16.71
	100	100	100	16.71	35.09	18.77	37.54	16.71
	200	200	200	33.42	70.18	37.54	75.08	33.42
	300	300	300	50.13	105.26	56.31	112.61	50.13
	400	400	400	66.83	140.35	75.08	150.15	66.83

## 4 结论

研究表明: 当应用接触面起爆模型对材料进行力学性能研究时, 冲击波平台压力取决于炸药和固体材料的材料参数, 冲击波加载平台宽度主要受炸药和固体材料各边稀疏波影响, 取决于加载模型几何尺寸、炸药中冲击波波速和固体材料中的声速. 固体材料确定时, 可以选用不同的炸药达到不同的压力; 固体材料很硬时, 理论分析对于高性能炸药较为精确; 当  $a_1/a_2 < 21/10$  时, 炸药侧向稀疏干扰为主; 当  $a_1/a_2 > 21/10$  时, 炸药后自由面稀疏干扰为主, 此时固定  $a_1$  不变, 改变  $a_2$ , 可得到不同的冲击波平台宽度; 当  $a_1/a_2 = 21/10$  时, 理论上炸药的利用率最高, 炸药两侧稀疏同时到达.

## 参考文献

- 王礼立. 应力波基础 (第 2 版). 北京: 国防工业出版社, 2005
- 胡时胜, 王道荣, 刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究.

工程力学, 2001, 8(5): 115-126

- 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学. 北京: 国防工业出版社, 2010
- 孙承纬, 文尚刚, 赵峰. 多级炸药爆轰高速驱动技术的 Gurney 模型优化分析. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 299-304
- 赵锋, 文尚刚, 孙承纬等. 多级串联式超高速飞片装置实验研究. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 13-16
- 文尚刚, 邓文荣, 赵锋等. 二级装药强爆轰驱动次级飞片的分析. 高压物理学报, 2005, 19(4): 343-347
- 栾广博, 郝莉, 张柱. 平面爆轰波驱动金属飞片运动的数值模拟研究. 高压物理学报, 2011, 25(5): 451-456
- 张柱, 栾广博, 宁建国. 爆炸载荷作用下锥形飞片的平面度研究. 高压物理学报, 2011, 25(3): 221-226
- 张柱, 宁建国, 栾广博. 爆炸驱动飞片的实验研究. 北京理工大学学报. 2011, 31(S1): 104-107
- Gebbeken N, Greulich S, Pietzsch A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact test. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(3): 2017-2031
- 周毓麟. 一维非定常流体力学. 北京: 科学出版社, 1998
- 李维新. 一维非定常流与冲击波. 北京: 国防工业出版社, 2003
- 经福谦. 实验物态方程导引 (第 2 版). 北京: 科学出版社, 1999

(责任编辑: 刘希国)