文章编号：1001-1455(2014)02-0223-06

反向起爆模型下的冲击波加载*

张 柱，晋艳娟
（太原科技大学应用科学学院，山西 太原 030024）

摘要：为了实现对大尺寸材料试件的动态加载，得到与轻气炮加载应力波相同的爆炸加载冲击波，基于叠加原理，提出了利用炸药反向起爆模型完成对可压缩固体材料的冲击波加载。通过联立爆炸产物和可压缩流体的速度-压力曲线以及综合考虑炸药和材料试件各自由边所受稀疏波干扰的情况，从理论上给出了冲击波压力和冲击波加载平台宽度的计算方法。并结合数值模拟，对理论分析结果进行了验证，两者基本一致。

关键词：爆炸力学；反向起爆；冲击波；大尺寸材料试件；压力；平台宽度
中图分类号：O389 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

SHPB 实验系统和轻气炮是目前最常用的动态加载实验设备[1]，所能加载的材料试件的尺寸都较小，只能对符合缩比模型实验条件的材料进行实验。将两者应用于混凝土和钢筋混凝土材料的动态力学性能实验研究，做缩比模型实验，材料试件很难满足等比例缩小和材料相同的条件，所得实验数据的真实性必然受到影响。要想解决此类问题，根本的方法是发展大尺寸试件的实验加载手段，直接对真实混凝土试件进行加载，这样所得的实验数据才可靠。

如果选取炸药作为驱动源动力，一种方法是在保证飞片平面度的前提下，先利用炸药爆炸驱动大直径的金属飞片，再用高速飞片对真实混凝土试件进行动态加载，完成与轻气炮相同的加载效果。孙承纬等[2]、赵锋等[3]利用平面波发生器实现了多级爆轰驱动；栾广博等[4]和张柱等[5]利用阶梯型炸药驱动锥形金属飞片，对大尺寸试件的加载实验进行了初步研究。另一种方法就是利用炸药直接对材料试件进行加载，但通常只能在材料内部产生三角形冲击波，实验数据很难测定，且较离散。N. Gebbeken 等[6]在点起爆方式下对真实混凝土试件实现了三角形冲击波加载，得到了不同深度处的压力-时间曲线。

在炸药直接加载情况下，为了得到与轻气炮加载相同的加载波，本文中提出利用接触爆炸下的反向起爆模型对材料试件进行加载，在理论上给出冲击波加载对应的平台压力和平台宽度的计算方法，并结合数值模拟对理论解进行验证，以期为爆炸加载冲击波与轻气炮加载应力波的等效关系的建立提供理论基础。

1 爆炸加载冲击波理论研究

对于轻气炮加载实验而言，理想情况下，飞片与靶板相撞后，会在材料试件内部产生一个矩形加载应力波。炸药爆炸一般产生的为三角形冲击波，如果有 n 个相同的三角形冲击波按照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，平台上带有明显的压力震荡，如图 1 所示。如果相邻 2 个三角形冲击波的时间间隔逐渐缩短，甚至连续，那么叠加所得冲击波平台上的震荡就会消失，最终必将获得与轻气炮加载相同的矩形冲击波。

1.1 形成机理分析

基于图 1 所示的叠加原理，采用接触爆炸反向起爆加载方式，如图 2 所示，可以获得带平台的加载冲击波。把炸药看成由无数个矩形微元体组成，分别为 1、2、3、4、5、6、7、…。当炸药被起爆后，首先微

* **收稿日期**：2012-09-24；**修回日期**：2012-12-01
基金项目：国家自然科学基金项目(11032002,11172045)；太原科技大学博士启动基金项目(20132012)
作者简介：张 柱(1979—)，男，博士研究生，讲师。

元体 1 爆炸，在固体表面施加第 1 个三角形冲击波；然后微元体 2 爆炸，在固体表面施加第 2 个三角形冲击波；再后微元体 3 爆炸，在固体表面施加第 3 个三角形冲击波；后续微元体依次爆炸，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，因此最终必然会在固体表面获得带平台的加载冲击波。

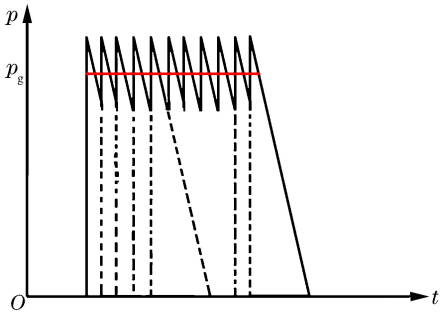


图 1 三角形冲击波叠加成带平台的冲击波

Fig. 1 Triangular waves superimposed into shock wave with platform

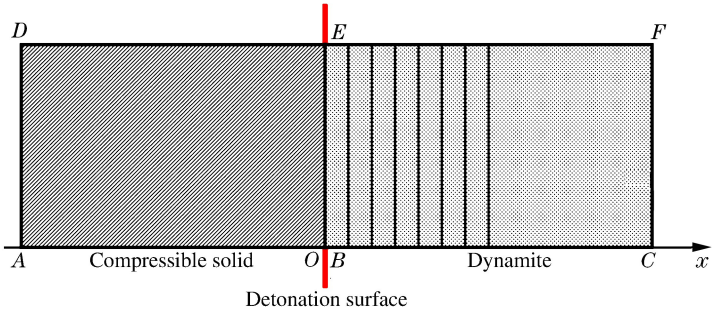


图 2 平面轴对称反向起爆模型

Fig. 2 Plane axisymmetric reverse detonation model

为验证上述加载冲击波形成机理的正确性，利用 AUTODYN 软件建立了与图 2 相同的反向起爆模型(平面轴对称问题)，模型中所用材料均选自软件自带的材料库，分别为 AIR、COMP B 和 AL2024，得到了固体表面的压力-时间曲线，如图 3 所示。压力-时间曲线中存在明显的加载平台，说明采用接触爆炸反向起爆方式得到的加载波形与采用轻气炮加载得到的加载波形相同。此外，压力-时间曲线刚开始存在很大的压力峰值，主要是由起爆瞬间化学反应区内的化学峰造成的。结合部分数值模拟发现，该峰值随着冲击波在材料内部传播距离的加大而逐渐衰减。

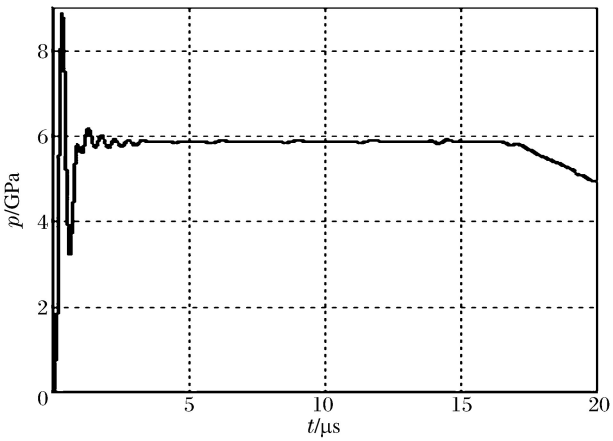


图 3 接触面的压力-时间曲线

Fig. 3 Pressure-time curve at contact surface

1.2 冲击波平台压力的计算

爆炸加载条件下，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的符号有 S、e、p、D、ρ、γ、u、τ 和 c，分别为熵、内能、压力、冲击波波速、密度、绝热指数、粒子速度、比容和声速。带下标 J 的量为爆轰波阵面上的参数，带 * 的量为固体材料的参数，带下标 0 的量为材料的初始参数。

设 $x<0$ 部分为可压缩流体，$x\geqslant 0$ 部分为炸药柱，炸药在 $x=0$ 处起爆，如图 2 所示，此时有一个爆轰波在炸药内传播，流体被压缩，流体内部传入一个冲击波。在爆轰波波后始终跟随着一个中心稀疏波，稀疏区后跟一个常数区，爆炸产物与流体分界面两边都是常数，对此种情况下的爆炸问题，爆炸产物和流体的 (u,p) 曲线[7] 分别为：

$$u=u_{\mathrm{J}}+\frac{2c_{\mathrm{J}}}{\gamma-1}\left[\left(\frac{p}{p_{\mathrm{J}}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}-1\right],\qquad u=-\sqrt{\frac{2\tau_0^*}{\gamma^*+1}}\,\frac{p}{\sqrt{p+\dfrac{2}{\gamma^*+1}\rho_0^*c_0^{*2}}} \tag{1}$$

在爆轰波阵面上，有：

$$u_{\mathrm{J}}=\frac{D_{\mathrm{J}}}{\gamma+1},\quad c_{\mathrm{J}}=\frac{\gamma D_{\mathrm{J}}}{\gamma+1},\quad p_{\mathrm{J}}=\frac{\rho_0 D_{\mathrm{J}}^2}{\gamma+1},\quad \rho_{\mathrm{J}}=\frac{\gamma+1}{\gamma}\rho_0,\quad \tau_0^*=\frac{1}{\rho_0^*} \tag{2}$$

当炸药和固体材料确定后，对应的各个材料参数也就确定，利用逐次逼近法便能求得式(1)确定的2条(u,p)曲线的交点($\bar{u}$,$\bar{p}$)，即得到反向起爆模型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中给出了3种常用炸药(TNT、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 种常用炸药和 3 种代表材料作用后的平台压力和粒子速度

Table 1　Shock wave platform pressure and particle velocity for three explosives loading three materials, respectively

炸药	ρ_0/(t·m^{-3})	D_J/(km·s^{-1})	p_J/GPa	c_J/(km·s^{-1})	γ	固体	γ^*	ρ_0^*/(t·m^{-3})	c_0^*/(km·s^{-1})	$\bar{u}$/(km·s^{-1})	$\bar{p}$/GPa
TNT	1.630	6.93	19.570	5.198	3	Al	3	2.785	5.328	0.286	4.478
						Cu	3	8.930	3.940	0.140	5.121
						W	3	18.167	4.030	0.073	5.439
COMP B	1.717	7.98	27.335	5.985	3	Al	3	2.785	5.328	0.377	6.011
						Cu	3	8.930	3.940	0.190	6.999
						W	3	18.167	4.030	0.100	7.506
PETN1.77	1.770	8.30	30.484	6.225	3	Al	3	2.785	5.328	0.411	6.602
						Cu	3	8.930	3.940	0.209	7.738
						W	3	18.167	4.030	0.111	8.329

1.3　冲击波平台宽度的计算

从图2可以看出：在炸药反向起爆过程中加载冲击波的平台宽度取决于AD、DE、CF和EF等4条边上的稀疏波作用。对于B点的压力来说，主要是看AD、DE、CF和EF等4条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和中心稀疏区，爆轰产物中[8]：

$$c=\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\frac{x}{t}+\frac{1}{\gamma+1}D_J \tag{3}$$

如果不考虑爆炸产物与流体分界面的运动，将其看成固壁，此时，常数区中$u=0$，$c=D_J/2$；中心稀疏区中，$D_J/2\leqslant x/t\leqslant D_J$，$D_J/2\leqslant c\leqslant 3D_J/4$。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：

$$t_1=\frac{a_1}{c_J}=\frac{a_1}{3D_J/4}=\frac{4a_1}{3D_J} \tag{4}$$

(2)炸药的后自由面(CF)稀疏波传到B点所需的时间包括t_a和t_b两部分，t_a为爆炸冲击波从BE传到CF所用的时间，t_b为反射稀疏波从CF传回BE所用的时间，且有：

$$t_a=a_2/D_J \tag{5}$$

当爆炸冲击波传到CF时，其后区域均为爆轰产物，分别为常数区和中心稀疏区，2个区对应的长度均为$a_2/2$。故t_b可分2段计算，t_{b1}为反射稀疏波在常数区中的传播时间，t_{b2}为反射稀疏波在中心稀疏区中的传播时间，则：

$$t_2=t_a+t_b=t_a+t_{b1}+t_{b2}=\frac{a_2}{D_J}+\frac{a_2/2}{D_J/2}+\frac{a_2/2}{(D_J/2+3D_J/4)/2}=\frac{14a_2}{5D_J} \tag{6}$$

(3)固体中侧向(DE)稀疏波到达B点所需的时间：

$$t_3=a_3/c_0^* \tag{7}$$

(4)固体中前自由面(AD)稀疏波传到B点所需的时间：

$$t_4=a_3/c_0^*+a_3/c_0^*=2a_3/c_0^* \tag{8}$$

最终，爆炸冲击波的压力平台宽度：

$$t_e = \min(t_1, t_2, t_3, t_4) = \min\left(\frac{4a_1}{3D_J}, \frac{14a_2}{5D_J}, \frac{a_3}{c_0^*}, \frac{2a_3}{c_0^*}\right) \tag{9}$$

由式(9)可知,冲击波平台宽度与加载模型几何尺寸、炸药的冲击波波速和固体材料中的声速有关。由式(4)和式(6)可知,确定炸药的几何尺寸时,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,使之与轻气炮加载波形宽度保持相同。确定固体材料试件的尺寸时除了考虑 t_3、t_4 外,更应该考虑轻气炮加载实验中样品的设计要求,满足宽厚比[9],确保数据采集系统能得到有效的实验结果。表 2 以 COMP B 炸药和固体材料 Al 为例,给出了几种尺寸条件下平台宽度的理论计算值。

表 2 COMP B 炸药反向起爆时,不同尺寸对应的理论平台宽度

Table 2 Theoretical platform width for several sizes in reverse detonation of COMP B

a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	t_1/μs	t_2/μs	t_3/μs	t_4/μs	t_e/μs
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	112.60	50.13
400	400	400	66.83	140.35	75.08	150.20	66.83

2 反向起爆的数值模拟及结果分析

为验证上述理论分析的准确性,借助 AUTODYN 软件对反向起爆加载模型进行了数值模拟。

2.1 冲击波平台压力的模拟

讨论冲击波加载平台压力时,保持数值分析模型的几何尺寸不变,取 $a_1 = 100$ mm,$a_2 = 100$ mm,$a_3 = 50$ mm,不断改变所用炸药和固体材料(与表 1 对应),最终模拟结果如表 3 所示。

表 3 平台压力和粒子速度的数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results of shock wave platform pressure and particle velocity

材料	理论计算		数值模拟		$\left(\frac{\lvert\bar{p}-p'\rvert}{p'}\times100\right)$/%	$\left(\frac{\lvert\bar{u}-u'\rvert}{u'}\times100\right)$/%
	$\bar{p}$/GPa	$\bar{u}$/(km·s^{-1})	p'/GPa	u'/(km·s^{-1})		
TNT + Al	4.478	0.286	4.320	0.272	3.66	5.15
TNT+Cu	5.121	0.140	4.967	0.134	3.10	4.48
TNT+W	5.439	0.073	4.555	0.062	19.41	17.74
COMP B+Al	6.011	0.377	5.870	0.362	2.40	4.14
COMP B+Cu	6.999	0.190	6.867	0.183	1.92	3.83
COMP B+W	7.506	0.100	6.828	0.089	9.93	12.36
PETN+Al	6.602	0.411	6.820	0.416	3.20	1.20
PETN+Cu	7.738	0.209	7.990	0.211	3.15	0.95
PETN+W	8.329	0.111	8.119	0.104	2.59	6.73

观察表 3 可知:

(1)无论是理论值还是数值模拟值,平台压力和粒子速度的变化规律均符合客观事实,即固体材料相同时,随着炸药密度的增加,炸药威力变大,平台压力和粒子速度均逐渐变大;炸药相同时,随着固体材料密度的增加,材料可压缩性变差,粒子速度逐渐变小。

(2)如果以数值模拟值为准确值,对于 W,随着炸药密度的增加,其相对误差逐渐变小。因为 W 本

身强度和密度很大，不容易被压缩，当炸药密度变大时，对 W 的压力作用也变大，此时 W 更近似流体；对于 Cu 和 Al，理论值与数值模拟值的相对误差都在 5%以内，两者基本一致。说明平台压力对应的理论推导比较适用于较软材料的计算，对于高强度材料，应该尽可能选用高性能炸药进行驱动。

2.2　冲击波平台宽度的模拟

讨论冲击波加载平台宽度时，选定 COMP B 对 Al 作用，研究炸药的几何尺寸对其的影响，具体模拟结果见表 4，表中 t_e' 为冲击波平台宽度的数值模拟结果。对于固体材料几何尺寸可能引起的影响，不在此处讨论，因为对于高爆速炸药来说，当固体材料的几何尺寸满足轻气炮加载实验样品的设计要求时（宽厚比约为 2），其侧面和自由面的稀疏波到达分界面中心的时间都较长，即 $t_3, t_4 > t_1, t_2$。

表 4　冲击波平台宽度的数值模拟结果

Table 4　Numerical simulation results of shock wave platform width

序号	a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	t_e/μs	t_e'/μs	$\left(\frac{\lvert t_e - t_e' \rvert}{t_e'} \times 100\right)$/%
1	100	25	100	8.77	8.12	8.03
2	100	36	100	12.63	12.20	3.54
3	100	44	100	15.44	15.06	2.51
4	100	47	100	16.49	16.12	2.30
5	100	50	100	16.71	16.40	1.88
6	100	75	100	16.71	16.45	1.57
7	100	100	100	16.71	16.56	0.90
8	200	200	200	33.42	33.83	1.22
9	300	300	300	50.13	50.26	0.27
10	400	400	400	66.83	67.05	0.32

观察表 4 可知：

(1)理论值与模拟值基本一致，说明建立的理论推导公式可以用于实验前的初步估算。

(2)相对误差随着装药量的提高，不断减小，说明建立的理论推导方法更适合大药量的冲击波加载。

(3)当 $a_1/a_2 < 21/10$ 时，若固定 a_1 不变，改变 a_2 便可得到不同的冲击波平台宽度。

(4)对于炸药来说，由侧向稀疏波决定（a_1）的平台宽度（表 4 中序号 5～10）与由后自由面稀疏波决定（a_2）的平台宽度（表 4 中序号 1～4）相比，前者的理论解更接近数值解，原因是固壁假设和讨论后自由面稀疏波传播时间时 t_{b2} 中所用的声速为一段平均，若选为2段或更多段平均计算，理论解一定更精确。

3　结　论

为获得与轻气炮相同的加载效果，并突破加载试件的尺寸限制，完成对真实混凝土或钢筋混凝土的动态加载研究，基于叠加原理，提出利用炸药反向起爆模型实现对可压缩固体材料的冲击波加载。理论上，通过联立爆炸产物和可压缩流体的（u，p）曲线，确定了冲击波平台压力；综合考虑炸药与材料各自由边的反射稀疏波情况，给出冲击波加载平台宽度的计算方法。并结合数值模拟，对理论分析结果进行了验证，两者基本一致，说明理论分析方法正确有效。如果要建立爆炸加载冲击波与轻气炮加载应力波的等效关系，只需对比相应的理论解。

本文在完成过程中得到北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室宁建国教授和赵衡阳教授的很多指导，在此表示感谢。

参考文献：

[1]　宁建国，王成，马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京：国防工业出版社，2010：398.

[2]　孙承纬，文尚刚，赵锋. 多级炸药爆轰高速驱动技术的 Gurney 模型优化分析[J]. 爆炸与冲击，2004，24(4)：299-304.
Sun Cheng-wei, Wen Shang-gang, Zhao Feng. An optimal analysis of multi-stage explosive accelerated high veloci-

ty flyers with the improved Gurney model[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(4):299-304.
[3] 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[J].爆炸与冲击,2001,21(1):13-16.
Zhao Feng, Wen Shang-gang, Sun Cheng-wei, et al. Experimental studies on multiple-stage flyers[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(1):13-16.
[4] 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[J].高压物理学报,2011,25(5):451-456.
Luan Guang-bo, Hao Li, Zhang Zhu. Numerical study on the acceleration of metallic flyers driven by planar detonation wave of explosives[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(5):451-456.
[5] 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[J].高压物理学报,2011,25(3):221-226.
Zhang Zhu, Luan Guang-bo, Ning Jian-guo. Flatness study on the metallic flyer driven by explosive loading equipment[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(3):221-226.
[6] Gebbeken N, Greulich S, Pietzsch A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact test[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(12):2017-2031.
[7] 周毓麟.一维非定常流体力学[M].北京:科学出版社,1998:320.
[8] 李维新.一维不定常流与冲击波[M].北京:国防工业出版社,2003:408.
[9] 经福谦.实验物态方程导引[M].2 版.北京:科学出版社,1999:212.

Shock wave loading of reverse detonation model*

Zhang Zhu, Jin Yan-juan
(*School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi*, *China*)

Abstract: To achieve the dynamic loadings on the large-sized specimens by the explosive shock waves equivalent to the stress wave obtained by a light-gas gun, based on the principle of superposition, the reverse detonation model was introduced to accomplish the shock wave loading on the compressible solid materials. The interferences were comprehensively considered for each free edge of the explosives and the material specimens by the rarefaction waves. By integrating the velocity-pressure curves of the explosion products and the compressible fluids, the calculation methods were theoretically proposed for the shock pressure and the shock wave loading platform width, respectively. And the theoretical analysis results were verified by combining the numerical simulation. They are consistent with each other.

Key words: mechanics of explosion; reverse detonation; shock wave; large-sized specimens; pressure; platform width

---

* Received 24 September 2012; Revised 1 December 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11032002,11172045)
Corresponding author: Jin Yan-juan, jinyanjuan2003@163.com

(责任编辑 张凌云)