文章编号:1000-5773(2011)03-0221-06

爆炸载荷作用下锥形飞片的平面度研究*

张 柱[1,2],栾广博[1],宁建国[1]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.太原科技大学应用科学学院,山西太原 030024)

摘要:尽管分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)和轻气炮作为较为常用的两种动加载手段已经被广泛应用到多种材料的动态力学特性研究之中,但由于其自身加载试件尺寸较小,难以满足真实的混凝土和钢筋混凝土的实验研究需要。为解决该问题,提出了一套大尺寸简易爆炸加载装置,将飞片设计为锥形,利用炸药直接驱动飞片,实现大尺寸加载。先用数值模拟完成对爆轰加载装置的初步设计和优化,通过模拟炸药驱动飞片的动力过程,给出飞片和药柱的优化尺寸;然后利用自制的同轴探针、脉冲形成网络和两台示波器进行靶场实验测定,研究飞片平面度,提出改进方案,最终为大尺寸混凝土和钢筋混凝土试件的动态加载实验做准备。

关键词:爆炸;飞片;平面度;数值模拟;实验

中图分类号:O347.3;O381 **文献标识码**:A

1 引 言

分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)和轻气炮是目前较为常用的两种动加载实验手段,已被广泛应用于金属、岩石和复合材料等的动态力学特性研究之中[1-5]。出于对混凝土和钢筋混凝土的动态力学性能实验研究的需要,我们发现:现有的 SHPB 和轻气炮所能加载的试件的尺寸太小,无法实现对真实混凝土和钢筋混凝土的动态加载。如果做缩比模型实验,却又很难满足等比例缩小和材料相同的条件,因为当骨料缩小到和沙子一样尺寸时,混凝土试件就不是真实的混凝土,钢筋缩小到只能用铁丝代替,更是很难保证材料相同。为此,我们必须发展大尺寸的实验加载手段。

化爆加载技术是很早就发展起来的一种加载手段,平面波发生器是化爆加载技术中的一个重要部件,其根据光波传播中的惠更斯原理设计,用调整高、低爆速炸药的方法,最终把点起爆的散心爆轰波改造成平面爆轰波,以满足动加载的需要[2]。国内外研制了各种各样的平面波发生器,中国工程物理研究院的工作具有代表性[6-9],但平面波发生器的加工难度大,制作成本较高,不易应用于混凝土和钢筋混凝土材料的动态力学性能研究之中。鉴于上述原因,本研究设计了一套简易的化爆加载装置,利用炸药直接驱动金属飞片,以求实现对大尺寸试件的平面加载,以数值模拟考证前期实验构思,用实验的方法最终确定实验方案,金属飞片的平面度是整个研究的重点。

2 数值模拟

基于流固耦合数值模拟方法研究大尺寸简易化爆加载装置,取整体的 1/4 进行分析,最终分析模型及飞片尺寸如图 1 所示,由一级传爆药柱(泰安∅20 mm×20 mm)、二级传爆药柱(钝化黑索金∅80 mm×85 mm)、主药柱(B 炸药∅300 mm×85 mm)和飞片组成。计算中炸药采用 ALE 网格,飞片采用Lagrange网格。如果计算模型中炸药和飞片全部采用 Lagrange 网格,计算中炸药会产生严重的变

* **收稿日期**:2010-11-17;**修回日期**:2010-11-29

基金项目:国家自然科学基金重点项目(11032002);国家杰出青年基金(10625208)

作者简介:张 柱(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事混凝土材料动态力学性能及本构理论研究.
E-mail:zhangzhu030168@163.com

形，从而导致计算精度下降；若全部采用 Euler 网格，则飞片的变形无法真实地反应出来。在利用数值模拟优化设计飞片的过程中：首先，为保证初始阶段飞片不被马上炸碎，必须要求其有一定的厚度，通过比较模拟结果确定飞片的总高度为 13 mm；其次，在保证总高度 13 mm 不变的情况下，锥台顶点高度分别取为 3、4、5 和 6 mm，模拟对比各种高度下的飞片变形情况，要求在直径 200 mm 范围内，最大不平度小于 2 mm，图 1 所示飞片的平面度最好，基本满足混凝土试件动态加载尺寸的初步研究要求。

2.1 建立模型

ALE 数值算法的特点是它的网格既不是随物体变形的 Lagrange 网格，也不是固定空间位置不动的 Euler 网格，而是兼有二者的某些性质，在特定条件下可以退化为二者之一，这种算法既保留了二者的优点，又克服了纯 Lagrange 和纯 Euler 算法的缺陷和不足。

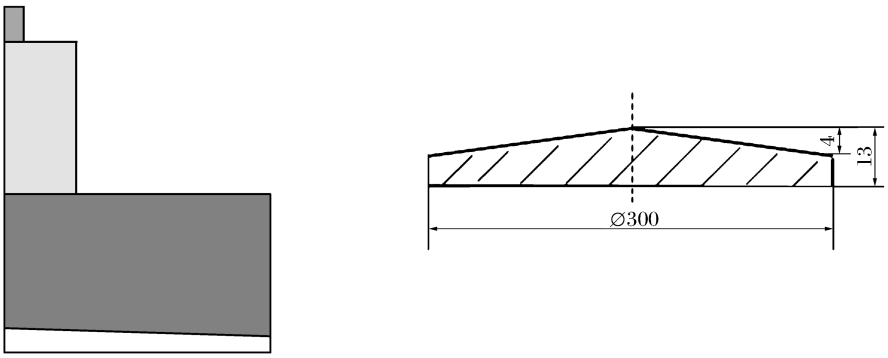


图 1 化爆加载装置分析模型及飞片尺寸

Fig. 1 Computational model and size of the flyer

计算中所有炸药均采用 JWL 状态方程，形式为

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \tag{1}$$

式中：A、B、R_1、R_2、ω 为 JWL 状态方程参数，$V=\rho_0/\rho$ 为相对体积，具体炸药参数见表 1。

飞片的材料选用低碳钢，材料模型是塑性等向硬化模型，其参数见表 2。其中 ρ_0 是飞片的密度，E 为杨氏模量，μ 为泊松比，σ_y 是屈服应力，E_t 是进入塑性强化后的切向模量，β 是硬化参数，C 和 P 与 Cowper-Symonds 应变率模型有关，F_S 是失效应变。起爆点设置在(0，0，0)处，$t=0$ 时刻起爆，主药柱底部与飞片上部共用节点。

表 1 炸药材料参数

Table 1 Material parameters of explosives

Dynamite	Parameters of C-J			Parameters of JWL				
	ρ_0/(g/cm^3)	p_{CJ}/(GPa)	D/(m/s)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω
PETN	1.770	33.5	8 300	0.671 70	0.016 926	4.40	1.20	0.25
RDX	1.650	28.4	8 390	1.141	0.025 2	5.39	1.50	0.31
TNT/RDX(4/6)	1.717	29.5	7 980	0.524 2	0.007 678	4.20	1.10	0.34

表 2 钢的材料参数

Table 2 Material parameters of steel

ρ_0/(g/cm^3)	E/(GPa)	μ	σ_y/(GPa)	E_t/(GPa)	β	C	P	F_S
7.8	210	0.3	0.35	2	1	40	5	1.2

2.2　飞片变形及平面度分析

通过数值模拟,得到了不同时刻飞片的变形图,如图 2 所示。由图 2 可知,在爆轰载荷的作用下,飞片靠近中心的范围内变形比较平整,基本保持平面,与预期设想相同,主要是采用锥形飞片的结果。飞片边缘部分变形明显滞后,主要是由爆轰波的边界稀疏效应引起的。

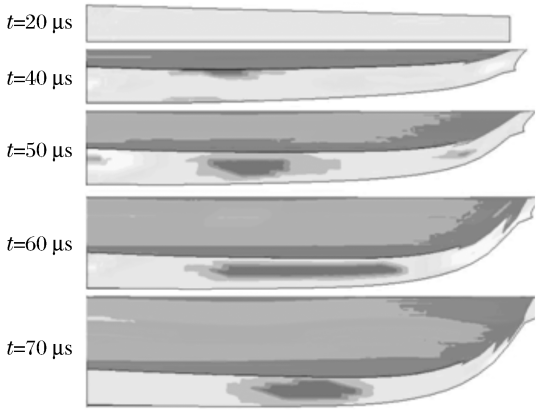
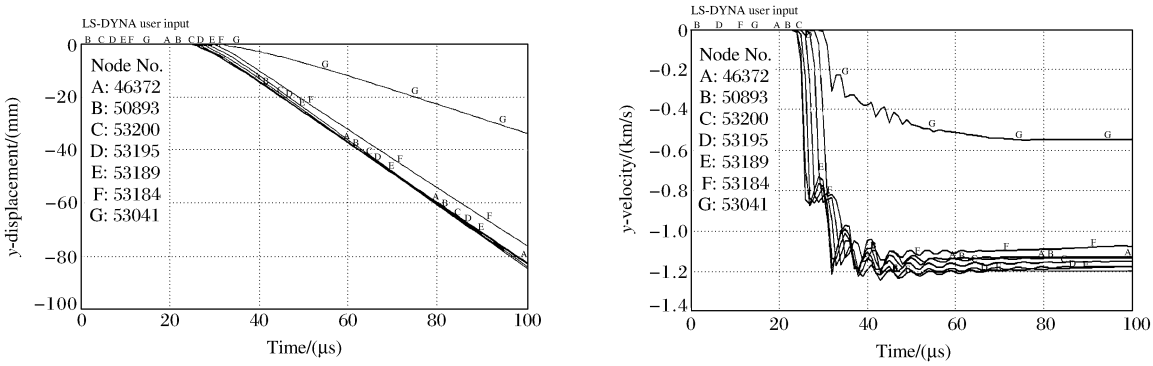


图 2　不同时刻飞片的变形情况

Fig. 2　Deformation of the flyer

为了更好地研究飞片的变形和速度,取同一半径上的 7 个节点,节点坐标分别是 0、25、50、75、100、125 和 150,节点编号依次为 46372、50893、53200、53195、53189、53184 和 53041,相应的位移和速度如图 3(a)、图 3(b)所示。由图 3 可知:在 $t=70\ \mu s$时,除最外边缘两节点外,其余各节点的速度和位移基本相近,速度约为 1.2 km/s,节点位移为 50 mm,据此在后面的靶场实验中,取直径 200 mm 以内作为平面加载的有效区域,重点研究讨论。测试探针布置在距离飞片 50 mm 的位置。



(a) Displacement of nodes　　(b) Velocity of nodes

图 3　不同节点的位移和速度曲线

Fig. 3　The time-history curve of displacement and velocity of different nodes

3　实验研究

3.1　实验方案确定

结合数值模拟结果,将飞片直径 200 mm 范围内的平面度定为主要研究区域,在综合考虑其它因素的基础上,最终确定化爆加载靶场实验装置如图 4(a)所示,其中起爆雷管为军用八号雷管;一级传爆药为泰安,二级传爆药为钝化黑索金,均为压装;主药柱为铸装 B 炸药;飞片为锥形,选用低碳钢加工。飞片受爆轰波作用后产生变形,其平面度利用同轴探针进行研究,具体布针位置如图 4(b)所示,在同一直径上布置 6 个探针,2 号探针位于探针盘的中心,1 号和 2 号探针间距 10 mm,2 号、5 号、3 号、6 号和 4 号探针相邻间距 25 mm,探针到飞片的距离为 50 mm。

实验方案主要考虑了以下因素:

(1) 炸药爆炸瞬间压力很大,要求金属飞片要能承受较大的塑性变形,选用普通钢进行加工,而将其设计为锥形,是借鉴等强度梁的思想,同时也考虑了波的传播,因为中心最先受到波的作用,最先加速,加厚中间部分,可以增加速度均匀化所用时间,从而使心部与其它部分尽可能同时达到最大速度,最终保证飞片底部在受冲击载荷作用后仍然近似为平面;

(2) 考虑到爆炸过程中对锥形飞片的飞行不能有影响,要求对其起支撑作用的材料强度不能太高,

静态的时候能承受上面所用重量(大约 16.5 kg),爆炸瞬间又很容易被炸坏,所以选用普通纸板卷成纸筒,并沾蜡固化;

(3) 为保证整套装置的上下同心,在飞片的底面和底座的上表面加工了环形定位槽,以确保与支撑纸筒的紧密装配;

(4) 所有导线均选用天津 609 厂的 SYV-3 同轴电缆,底座中心开直径 150 mm 的孔,使导线从探针盘下面直接由地下走线,既保护了导线,又避免了爆轰产物对测试信号的影响;

(5) 由于炸药爆炸时产生的爆轰产物传播速度很快,处于等离子态,可以导电,为了使探针在飞片到达前不被爆轰产物触发,在主药柱的周围布置了环形档板,阻挡爆轰产物,增加其达到探针所用时间;

(6) 为方便对整套加载装置进行水平调整,在塑料盘里面放沙子,简单实效又经济。

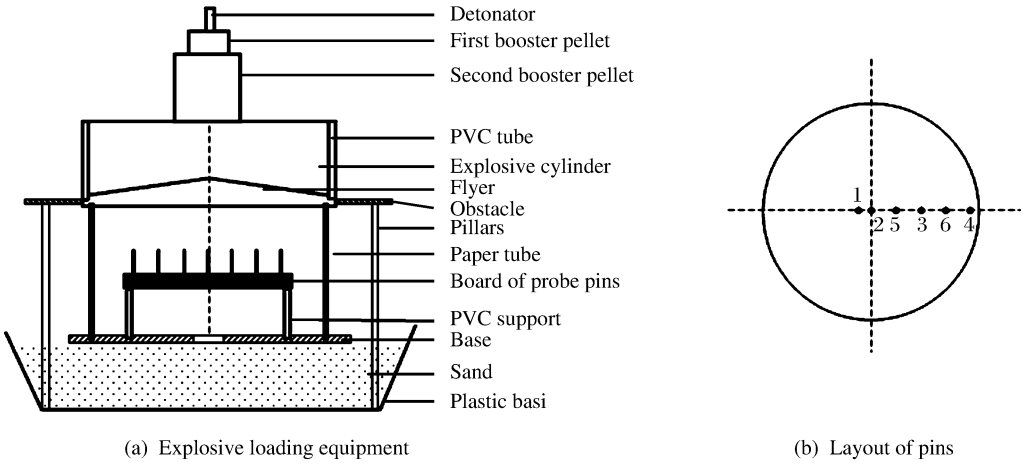


图 4 化爆加载装置及探针布置示意图

Fig. 4 The explosive loading setup and layout of pins

3.2 平面度测试及结果分析

由于主药柱本身是轴对称的,所以假定飞片的变形也为轴对称。为此,只要测得飞片沿同一个半径方向上的变形,就可以说明飞片整体变形。飞片的变形情况依靠探针触发时间来衡量,1 号探针为两台示波器的触发探针,高度 10 mm,2 号、5 号、3 号、6 号和 4 号探针高度为 5 mm,利用 1 号和 2 号探针的高度差除以二者触发时间差,即得飞片的平均速度。对每个探针触发时间的测定利用脉冲形成网络、两台四通道示波器以及若干同轴电缆连接完成。

必须注意:

(1) 由于同轴探针由自己手工制作,必须保证每个探针在实验中都能有效触发,所以必须利用万用表进行多次检测通、断情况;

(2) 每发实验中的 1 号探针需要同时触发两台示波器,为保证其可行,事先利用相同探针在中国科学院力学研究所的一级轻气炮上进行了可行性测试实验,1 个探针同时触发 3 台示波器,12 通道可以同时工作,保证了探针触发方式的可行性;

(3) 由于事先并不知道每个探针触发时间的先后顺序,所以作为提供电压的脉冲形成网络必须是多进多出模式,保证各个通道之间互相独立,彼此不受影响,绝对不能选用多进单出模式;

(4) 示波器的采样频率不能太低,否则无法检测到脉冲信号。

共进行了 3 发实验,总装药量大约 10 kg,具体实验结果见表 3。观察表 3 中的实验数据可知:

(1) 全部实验按照方案执行,准确采集到所有实验数据,证明了整体实验方法的可行性;

(2) 在第 1 发实验中 $t_6 < t_3$,第 3 发实验中 $t_5 < t_2$,说明探针的触发顺序并不是唯一不变的,也证明实验中选用多进多出模式的脉冲形成网络是非常必要的;

(3) 3 发实验中飞片的速度各不相同,偏差较大,其主要原因可能是由于主药柱采用铸药方式,铸药过程中局部的小气泡或其它因素对爆轰波的影响很大,今后需要加强铸药质量;

(4) 总体来看,飞片速度大于数值模拟所得速度(1 200 m/s),具体原因有待进一步分析探明;

(5) 3 发实验中金属飞片在直径 150 mm 范围内的平面度较好,不平度小于 2 μs,在直径 200 mm 范围内的平面度不是很理想。

表 3　金属飞片平面度实验结果

Table 3　Experimental results of flyers

Experiment No.	Trigger time of each pin/(μs)		Average velocity of flyer and Δt_{max}
1	$t_1=0$ $t_5=3.02$ $t_6=3.49$	$t_2=2.74$ $t_3=3.98$ $t_4=6.30$	$v_1=\frac{5\ \text{mm}}{2.74\ \mu\text{s}}=1\,824\ \text{m/s}$ $\Delta t_{max}=t_4-t_2=3.56\ \mu\text{s}$
2	$t_1=0$ $t_5=3.74$ $t_6=5.30$	$t_2=3.38$ $t_3=4.58$ $t_4=6.88$	$v_1=\frac{5\ \text{mm}}{3.38\ \mu\text{s}}=1\,479\ \text{m/s}$ $\Delta t_{max}=t_4-t_2=3.50\ \mu\text{s}$
3	$t_1=0$ $t_5=2.98$ $t_6=4.40$	$t_2=3.09$ $t_3=3.75$ $t_4=5.17$	$v_1=\frac{5\ \text{mm}}{3.09\ \mu\text{s}}=1\,618\ \text{m/s}$ $\Delta t_{max}=t_4-t_5=2.19\ \mu\text{s}$

4　结　论

出于对混凝土和钢筋混凝土的动态力学性能实验研究的需要,进行了初步的探索工作,提出了一套大尺寸简易化爆加载装置,利用炸药直接驱动锥形金属飞片,实现大尺寸加载。一方面,将数值模拟作为实验研究的主要辅助手段,基于 ALE 与 Lagrange 耦合方法,模拟了炸药驱动飞片的动力过程,给出了飞片在特定位置的平面度,完成了对简易化爆加载装置的初步研究;另一方面,在综合考虑各方面因素的基础上完成了靶场实验,得到了有效数据,说明利用炸药直接驱动金属飞片用以实现对大尺寸试件的动态加载的总体设计方案是可行的,适当地对飞片尺寸进行修改会达到更好的平面度。

本文在完成过程中得到北京理工大学赵衡阳教授、中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室沈乐天研究员和张虎生老师的帮助,在此表示感谢。

References:

[1] Wang L L. Progress in Studies on Dynamic Response of Structures and Materials under Explosive Impact Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 81-88. (in Chinese)
王礼立. 爆炸与冲击载荷下结构和材料动态响应研究的新进展 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 81-88.

[2] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1999: 125-169. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第 2 版. 北京:科学出版社, 1999: :125-169.

[3] Hu S S. The Application Development of Experimental Technique of Hopkinson Pressure Bar [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4): 589-494. (in Chinese)
胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展 [J]. 实验力学, 2005, 20(4): 589-494.

[4] Li Y L, Guo W G, Xu F, et al. The Extended Application of Hopkinson Bar Technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 385-391. (in Chinese)
李玉龙, 郭伟国, 徐　绯, 等. Hopkinson 压杆技术的推广应用 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 385-391.

[5] Ning J G, Shang L, Sun Y X. Investigation on Impact Behavior of Concrete [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(2): 199-208. (in Chinese)
宁建国,商 霖,孙远翔. 混凝土材料冲击特性的研究 [J]. 力学学报, 2006, 38(2): 199-208.

[6] Sun C W, Wen S G, Zhao F. An Optimal Analysis of Multi-Stage Explosive Accelerated High Velocity Flyers with the Improved Gurney Model [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(4): 299-304. (in Chinese).
孙承纬,文尚刚,赵 锋. 多级炸药爆轰高速驱动技术 Gurney 模型优化分析 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 299-304.

[7] Zhao F, Wen S G, Sun C W, et al. Experimental Studies on Multiple-Stage Flyers [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 13-16. (in Chinese).
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.

[8] Wen S G, Deng W R, Zhao F, et al. Analysis of Two Stages Explosive/Flyer System [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(4): 343-347. (in Chinese)
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 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(4): 343-347.

[9] Wen S G, Zhao F, Sun C W, et al. Experimental Study on Hypervelocity Flyer Driven by Strong Detonation at Low Vacuum Conditions [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(4): 315-318. (in Chinese)
文尚刚,赵 锋,孙承纬,等. 低真空条件下炸药强爆轰驱动超高速飞片实验研究 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(4): 315-318.

Flatness Study on the Metallic Flyer Driven by Explosive Loading Assembly

ZHANG Zhu[1,2], LUAN Guang-Bo[1], NING Jian-Guo[1]

(1. *State Key laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institutive of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: The split Hopkinson pressure bar and light gas gun as the two common means of dynamic loading are widely used in dynamic mechanical characteristics of many materials, while it can not meet the experimental study requirements of the concrete and reinforced concrete because of the small loading samples dimensions. To solve this problem, a simple large-dimension explosive loading assembly, which directly drive the flyer devised cone shape to achieve a large-dimension loading, was presented. Numerical simulation was first used to complete the design optimization of experiment conception. The dynamic process which an explosion drove the flyer was simulated based on ALE and Lagrange coupling methods. Then target range experiments were performed and the flyer flatness was measured by using self-made concentric pins, pulse networks and two oscilloscopes. The improvement was proposed prepared for the finally dynamic experiments of the large-dimension concrete and reinforced concrete samples.

Key words: explosion; flyer; flatness; numerical simulation; experiment