

破片发生器爆轰驱动数值模拟

屈明, 钱立新

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用 ANSYS/LSDYNA 软件对一定向破片战斗部试验件进行了二维和三维数值模拟, 获得了破片速度、飞散角分布和定向战斗部对破片的爆轰驱动过程的物理图象, 计算结果和试验结果具有良好的一致性。

关键词: 破片群; 数值模拟; 爆轰驱动

中图分类号: O245; O383

文献标识码: A

1 引言

定向破片战斗部是一种特殊的爆轰驱动装置, 通过特殊的爆轰设计, 实现对破片群的定向驱动, 得到满足速度和密度要求的破片和破片群以实现预定目标的打击。为了对该类战斗部威力进行评估, 需要对破片群的定向驱动性能(如速度、密度分布和飞散角等)进行计算, 并通过改进设计来获得破片群毁伤目标所需的总体速度和分布密度。在工程上, 采用分析方法一般只能获得破片群的初速峰值和破片总体飞散角, 同时对战斗部装药形状存在一定的限制^[1]。随着计算机软件技术的迅速发展, 采用基本物理方程通过数值求解方法来研究爆轰驱动和破片飞散性能成为战斗部设计和威力评估的重要手段, 同时也出现了基于拉氏方法、欧拉方法和二者结合的 ALE 方法的各种软件或软件系统, 并取得了广泛应用。

本文对文献[1]中设计的一药型罩截面圆心角(central angle)为 10° 的破片发生器, 利用 ANSYS/LS-DYNA 对其进行了二维和三维的爆轰驱动数值模拟, 计算结果与试验结果具有很好的一致性, 同时也获得了试验中未能测得的破片的速度分布、驱动加载规律以及粗略的爆轰流场运动和爆轰产物从破片发生器端部泄漏喷射现象等, 初步再现了爆轰驱动破片定向飞散的物理过程。

2 物理模型

文献[1]设计的定向破片群发生器(见图1), 药型罩材料选 A3 钢(common carbon steel), 厚度 1 mm, 直径 98 mm, 设计翻边以便装配和固定预制破片, 药型罩截面圆心角(central angle)为 10° ; 破片为直径 5 mm 的钢球(0.514 g), 共 500 颗(底层 253 颗, 顶层 247 颗), 钢球在药型罩上的固定采用胶粘方式; 主装药为 TNT/RDX (35/65)(相当于 Comp. B), 装药质量为 555 g; 壳体为 A3 钢, 厚度 5 mm, 质量 816 g; 端盖(tamper)为 A3 钢, 厚度 20 mm, 质量 158 g。起爆方式为单端一点起爆, 爆轰产物推动药型罩上的破片群高速运动, 并期望以一定密度的分布和速度对目标构成打击。

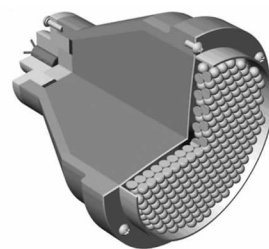


图1 密集破片群发生器示意图

Fig. 1 Schematic of dense fragment cluster generator

在计算模型中, 对炸药材料, 取爆燃材料模型与 JWL 状态方程的组合, 金属材料简化成理想弹塑性模型和弹塑性硬化模型^[2,3]。

本文分别采用二维和三维模型对破片发生器的爆轰驱动进行模拟研究, 由于发生器的结构特点决定了炸药在完成爆轰后, 会从前端形成产物泄漏, 采用拉氏算法模拟存在当产物冲出后网格奇异, 使计算不能进行的问题。

收稿日期: 2003-03-31; 修回日期: 2003-04-03

作者简介: 屈明(1969-), 男, 工程师, 从事爆轰驱动、侵彻、穿甲等方面的数值模拟研究。

因此在二维模型中,采用 ALE 加网格重分方法,在三维模型中,采用流固耦合方法进行求解,其中破片、外壳等采用拉氏网格,炸药(附加空气)采用欧拉网格。计算中所需的材料参数和状态方程参数分别见表 1 和表 2。

表 1 材料模型参数表
Table 1 Parameters of material

部件名称	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	切模量 E_t/GPa	动屈服限 σ_y/GPa	失效应变 ε^{ef}
外壳	7800	210	0.284		1.5	
药形罩	7800	210	0.284		1.5	3.0
破片	7800	210	0.284	2.1	1.5	
炸药	1710	6.0	—		0.005	
空气	1.29					

表 2 状态方程参数
Table 2 Parameters of equation of state

炸药 JWL								空气	
A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	p_{CJ}/GPa	$D/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	C_4	C_5
488.9	28.6	4.5	1.5	0.3	9.4	31.0	7900	0.4	0.4

3 计算结果及分析

3.1 二维模型计算结果及分析

破片发生器上的预制破片简化为方形破片环,采用各向异性弹性材料模型来释放由破片环径向变形所带来的与实际问题不符的环向内力,从而简化成二维轴对称模型,计算模型见图 2。图 3 为 $t=45\text{ }\mu\text{s}$ 爆轰产物冲出、壳体变形和破片被驱动的形象。

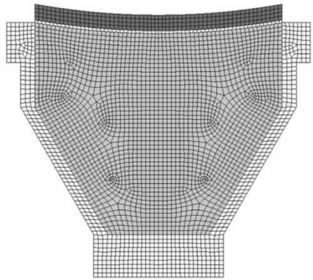


图 2 二维计算网格图
Fig. 2 2D FEM mesh

计算结果表明,破片最大的速度在靠近中心的部位,如图 4,其值为 $1\,960\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值在最边缘倒数第二个位置上,大小为 $1\,450\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。所有破片的总体平均速度为 $1\,710\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与实际测量平均值 $1\,450\sim 1\,550\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [1] 相比,偏高。主要原因为模型中没有考虑药型罩破裂造成的产物泄漏,加强了炸药对破片的推动力和时间,其次,计算中考虑成方形破片环,且破片环之间不存在空隙的简化假定也加大了炸

药对破片的作用压力。从图 4 的破片飞散角看最大飞散角不到 5.5° ,比试验结果要小。

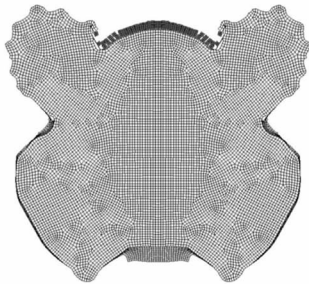


图 3 $t=45\text{ }\mu\text{s}$ 时产物和结构变形图
Fig. 3 Detonation product and structural deformed shape at time $t=45\text{ }\mu\text{s}$

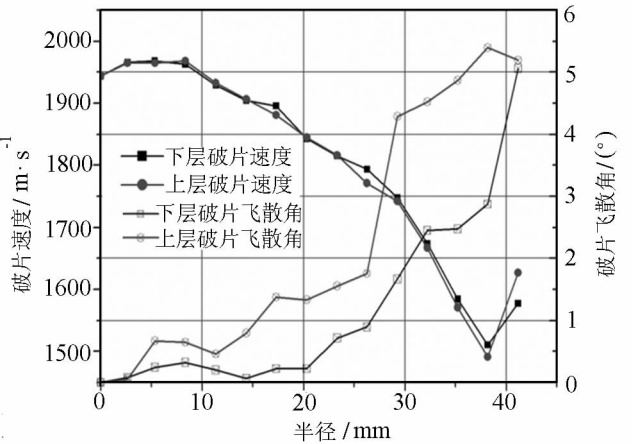


图 4 破片沿径向的速度和飞散角分布曲线
Fig. 4 Distribution of velocity and ejection angle for fragements along radius direction

图5所显示的压力曲线表明,炸药轴线上各点上的峰值压力偏低,其主要原因可能是:破片发生器结构呈喇叭形,同时采用一端单点起爆,爆轰波阵面为典型的球面散心结构,爆轰波后压力迅速下降^[4],ALE方法对单元采用单点积分,在二维模型中单元平均尺寸为2 mm,根据JWL方程,可以推算,如果内能取炸药释放的热量值,取相对体积为1.0,则其压力只有13 GPa,反推如果要在单元体内达到 p_{CJ} 压力31 GPa,在单元体内当反应完成后其体积相对压缩量必需达到0.308 9,由于该爆轰波不存在会聚,要让更早完成反应的炸药膨胀或周围质点动能对其压缩到此值可能是困难的。另外,单元的反应时间约为0.25 μs ,单元内的炸药在反应的同时,单元随之膨胀,也会降低压力。理论上爆轰波前沿的冲击波阵面上的相对压缩量应该较大,压力至少应该达到CJ点以上,但由于阵面厚度很薄,而计算中所采用单点算法不能捕捉到很薄的波阵面上的压力,只能为一平均值,因此计算显示的压力峰值偏低。然而单元的大小并不影响其三大守恒定律,在爆轰驱动结构中,影响预制破片最后的驱动速度的主要因素的是作用在预制破片上的整个压力历程,即对预制破片所作的功。因此,在不关心爆轰内部爆轰精细结构的前提下,这样处理在工程上应该是可以的。另外,作者把该模型中的炸药网格缩小一倍,即平均单元尺寸为1 mm,随着爆轰的推进,其单元压力可以上升到30 GPa左右。

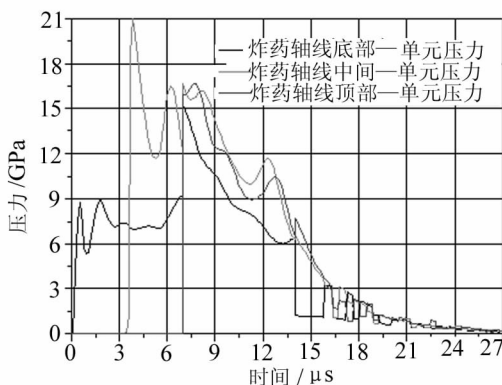


图5 炸药轴线上三点的应力变化曲线

Fig.5 Pressure history of detonation product along axis direction

3.2 三维模型计算结果

球形破片采用质量等效法简化成方形破片,且每一破片建立一个单元,上下层破片总体坐标系下相差 30° ,以模拟球形破片在球面上的自然铺砌,计算模型见图6。

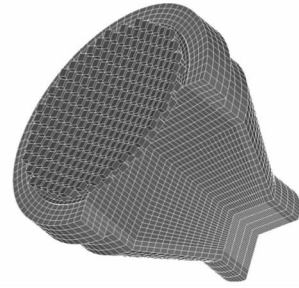


图6 三维计算网格图

Fig.6 3D FEM mesh

在15 μs 时刻,药型罩网格畸变很大,认为药型罩已经破碎,炸药产物直接对破片进行加速作用,计算中删除药型罩,图7为35 μs 时的结构变形图,根据结构变形情况认为外壳已经破裂,同时根据图8的炸药轴线上欧拉网格压力随时间的变化曲线,认为炸药产物已经不能对破片加速,因此删除炸药、空气和外壳网格,只留下破片继续进行计算,以给出较好的破片分布图象,图9为200 ms时刻破片的正投影和侧投影散布图象。图10为破片穿靶试验后靶板上的孔洞分布图象,其中,靶面大小为1 260 mm $\times$ 1 500 mm,距离破片发生器为2 m,比较图9和图10可以发现,破片分布的数值仿真结果和试验结果具有较好的一致性。

图11为沿径向破片的速度和飞散角随半径的变化曲线,从曲线上可以看出,在半径方向上总共排布9层破片,第8层的破片速度最低,上下层破片速度分别为1 387 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、1 391 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,几乎在图上相交于一点,上层中心破片速度最高,达到2 064 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,从总体趋势上,破片中心至外层速度呈下降趋势,在半径小于30 mm地中心区域,上层破片速度明显高于下层破片,中心部位的速度差达458 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,下层破片变化较小。造成此现象的主要原因在于在计算模型中,破片简化成了方形破片,改变了上下层破片的作用方式,因此,与试验的平均测得速度在1 450 ~1 550 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[1]之间相对集中的速度相比,其速度分散性会相对较大,但是计算中的破片群的平均速度为1 539 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,与试验平均速度范围是非常接近的。另外破片飞散角变化趋势正好与速度变化相反,在30 mm半径区域内,破片具有良好的聚焦性能,在此范围内破片飞散角小于 6° ,而在25 mm半径区域内,飞散角迅速下降到 3° 以下。在聚焦区域,上层破片飞散角比下层的稍小。图10所示试验计算得到的聚焦区域内破片飞散为 4.5° ,因此破片飞散角与试验也符合得较好。

图8为炸药压力变化曲线,图中从左到右各曲线分别为在炸药中轴线上从底部至顶部等距各欧拉网格点的压力随时间变化曲线,其中在各空间点上的压力峰值顺序变化反映了爆轰波向前的传播和在该位置上炸药的爆轰,其曲线形态与典型散心爆轰波的爆轰压力特征曲线一致^[5]。图12为以炸药初始构形为参考的空间区域内的压力峰值随时间的变化曲线,该图从另一侧面反映了爆轰波向前的传播并具有稍微增强的趋势,同时该图也可看出,在10 μs 以后,该区域内的压力迅速下降,说明炸药产物开始沿外壳端部四周向外喷射。另外,从炸药底部中心至炸药顶部和最远点的距离分别为71 mm和87 m,而爆轰波速度为 $7.9 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$,到达和完成分别为9 μs 、11 μs ,由于破片和药型罩与外壳之间不存在任何约束,在爆轰波到达后,爆轰产物应首先从外壳前端泄漏,所以计算结果具有较好理论预估性。最后从图8和图12的压力幅值看,其压力峰值偏低,原因与在二维计算分析中的基本一致,在此不再做分析。

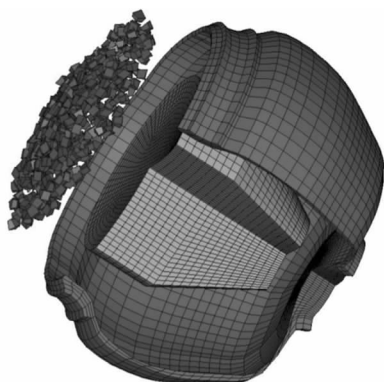


图7 $t = 35 \mu\text{s}$ 时的结构变形图

Fig. 7 Structural deformed shape and fragments ejecting at time $t = 35 \mu\text{s}$

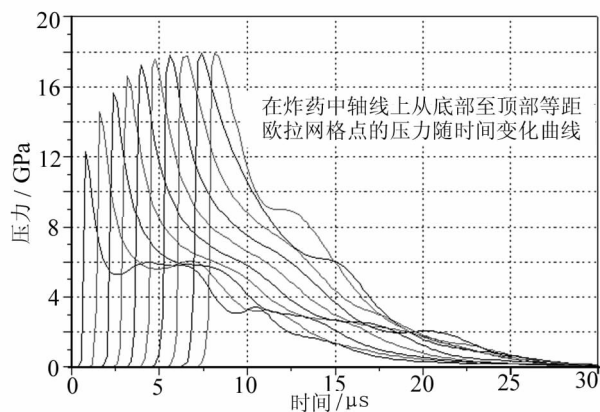


图8 炸药产物轴线上欧拉网格压力变化

Fig. 8 Pressure history of Euler mesh in detonation product along axis direction



图9 $t = 200 \mu\text{s}$ 时刻破片分布正投影和侧向投影图

Fig. 9 Normal and lateral projection of fragments distribution at time $t = 200 \mu\text{s}$

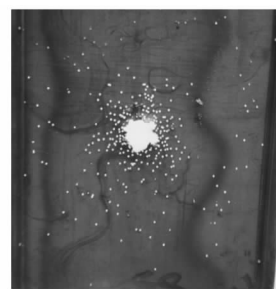


图10 静爆穿靶试验后靶板破坏照片

Fig. 10 Target damage after static blast test

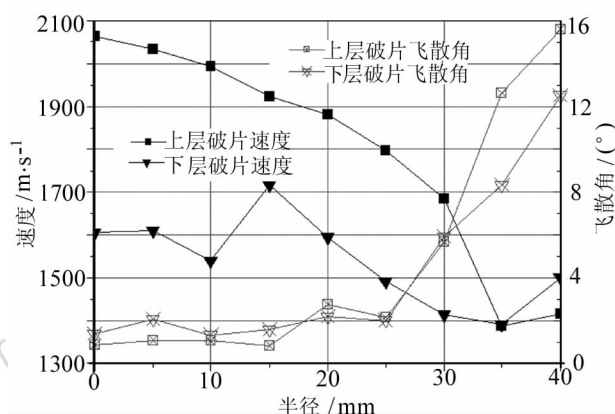


图11 沿径向破片的速度和飞散角

Fig. 11 Fragment's velocity and ejection angle along radius direction

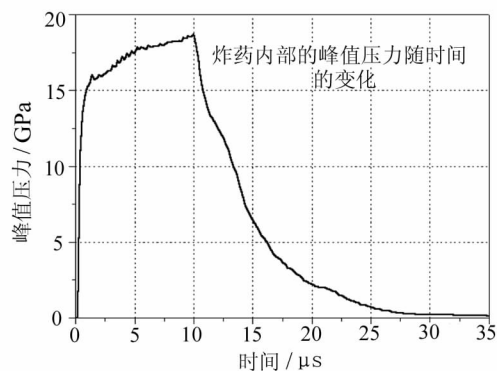


图12 炸药产物内部的峰值压力随时间的变化

Fig. 12 Pressure peak of detonation product via time t

通过对破片发生器定向驱动的数字模拟,获得了与试验结果较一致的结果,再现了爆轰驱动破片定向飞散的全物理过程;得到了每一破片的速度分布和驱动加载规律,以及试验中未能观测到的粗略的爆轰流场的运动和爆轰产物从破片发生器端部侧面泄漏喷射现象。同时数值结果表明,采用一定角度的药型罩截面圆心角对球面散心爆轰波进行有限的整形,可以获得较好的破片群密度分布和驱动速度。

- [1] 钱立新. 密集破片发生器[R]. GF-A,ZW-D-2001150, 904-14-50,2002.
- [2] LS-DYNA keyword user's manual[Z]. ver950, LSTC, May,1999.
- [3] LS-DYNA theoretical manual[Z]. ver950, LSTC, May,1998.
- [4] 方青,等. 塑性粘结 TATB 装药中散心爆轰波驱动的实验研究与数值计算研究[A]. 第一届全国计算爆炸力学会议[C],江西,南昌,2000. 10.
- [5] 谭多望,孙承伟,等. 爆炸驱动柱壳运动[A]. 第一届全国计算爆炸力学会议[C],江西,南昌,2000. 10.

(Institute of Structural Mechanics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Key words: fragment cluster; numerical simulation; detonation drive

本刊启示 1

1 请来稿时提供英文图文摘要

2 英文摘要的编写请注意

(1) 英文摘要是应用符合英文语法的文字语言,以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地论述文献重要内容的短文。(2) 英文摘要必须符合“拥有与论文同等量的主要信息”的原则。为此,英文摘要应重点包括4个要素,即研究目的、方法、结果和结论。在这4个要素中,后2个是最重要的。在执行上述原则时,在有些情况下,英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其它重要的信息(即中文论文的英文摘要尽可能详细些)。当前学术期刊上英文摘要的主要问题是要素不全,繁简失当。(3) 英文摘要的句型力求简单,通常应有10个左右意义完整,语句顺畅的句子。(4) 英文摘要不应有引言中出现的内容,也不要对论文内容作诠释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用的符号和术语,不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文,缩略语、略称、代号,除了相邻专业的读者也能清楚理解的以外,在首次出现时必须加以说明;科技论文写作应注意的其他事项,如采用法定计量单位,正确使用语言文字和标点符号等,也同样适用于英文摘要的编写。

《含能材料》编辑部
