

文章编号: 1001-1455(2003)06-0569-04

# 炸药爆炸驱动下铜板的层裂现象\*

蒋小华<sup>1, 2</sup>, 陈 朗<sup>1</sup>, 冯长根<sup>1</sup>, 龙新平<sup>2</sup>, 彭其先<sup>3</sup>

- (1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;  
2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;  
3. 中国工程物理研究院流体力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在进行炸药驱动铜板实验中, 用激光速度干涉仪(VISAR)记录铜板自由面速度, 观察到了铜板层裂现象, 并用非线性有限元方法对爆炸载荷下铜板层裂过程进行数值模拟分析, 得到了与实验结果吻合的计算结果。

关键词: 固体力学; 层裂; 爆轰; 模拟; 材料本构

中图分类号: O346.1 国标学科代码: 130°1545 文献标志码: A

## 1 引 言

层裂是材料内部在强冲击载荷下的一种结构失效。由于压应力波在自由表面反射后形成拉应力, 这种拉应力波在往回传播时引起层裂<sup>[1]</sup>。J. Buchar 等<sup>[2]</sup>根据能量理论, 建立了高强度钢层裂强度和材料性能, 如密度、屈服强度、断裂韧性等之间的关系。朱兆祥等<sup>[3]</sup>认为在平板撞击实验中, 一维平面应变假定可以给出很好的结果, 但对于钢板与炸药接触爆炸引起的层裂, 由于侧向稀疏效应十分明显, 一维应变假定与实际问题就有较大出入。本文中, 利用激光速度干涉仪直接观测到炸药驱动铜板自由表面速度的异常变化, 经分析认为是铜板发生了层裂现象, 为此, 进行了进一步实验和应用非线性有限元方法对实验中层裂过程进行了三维数值模拟分析。

## 2 实 验

炸药驱动实验装置如图 1 所示, 实验装置由雷管、加载炸药( $\varnothing 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ )和黄铜板( $\varnothing 50\text{mm} \times 3.5\text{mm}$  或  $\varnothing 50\text{mm} \times 2\text{mm}$ )组成。雷管起爆加载炸药, 炸药爆炸驱动铜板运动, 激光速度干涉仪记录铜板中心自由表面速度。

实验中采用了 RDX/TNT (40/60) 和 RDX/AP/Al (20/43/25/12) 两种加载炸药, 对铜板产生不同的加载效果。

## 3 数值模拟

采用非线性有限元方法进行三维爆轰数值模拟分析<sup>[4]</sup>。加载炸药采用 CJ 爆轰模型, 药柱上端中心起爆。铜板采用塑性材料模型, 材料临界屈服极限为  $\sigma_s$ , 则当  $\sigma \geq \sigma_s$  时, 发生断裂。铜板的主要材料参数为<sup>[5]</sup>: 密度  $\rho = 8.92\text{g}/\text{mm}^3$ , 杨氏模量  $E = 136.0\text{GPa}$ , 剪切模量  $G = 48.4\text{GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.35$ , 屈服强度  $\sigma_s = 310\text{MPa}$ , 硬化系数  $k = 1.0$ 。

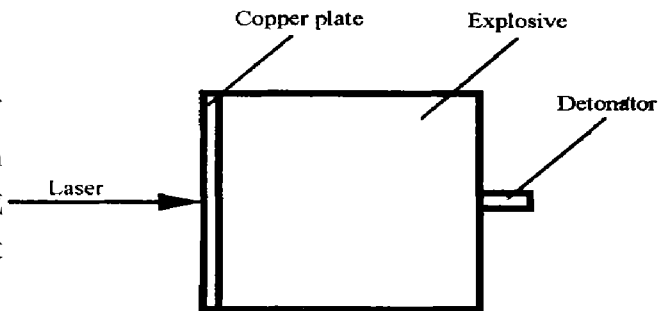


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

\* 收稿日期: 2002-12-06; 修回日期: 2003-01-08  
作者简介: 蒋小华(1966—), 男, 硕士研究生。

## 4 结果分析

图 2 是由激光速度干涉仪测量的铜板在炸药驱动下自由面速度变化历程。在两种炸药分别驱动下,铜板自由面速度都发生了相似的变化。自由面速度突跃上升达到一定以后,在  $4\mu\text{s}$  左右的时间内基本保持一定值并有少许的下降,后来又继续升高,直到达到最大值。图 2 中自由面速度变化与通常情况下炸药驱动铜板自由面速度有区别。在通常情况下,铜板在自由面速度在突跃上升到一定值后会继续相对比较缓慢上升,直到达到最大值<sup>[6]</sup>。而在本实验中,铜板在炸药爆炸的冲击波作用下发生了层裂,铜板分成了上下两部分,激光速度干涉仪记录的下部分在冲击波作用下瞬间获得了比上部分高的速度,上下两部分分离一定距离,但由于下部分没有爆轰产物的推动作用,速度保持一定值,并在空气阻力的作用下有少许的下降。铜板上部分在爆轰产物推动作用下速度增加,在大约  $4\mu\text{s}$  以后赶上了下部分,发生碰撞后上下部分又重新结合在一起,在爆轰产物作用下速度继续增加。因此,实验中出现了图 2 中自由面速度变化情况。图 3 是考虑铜板发生层裂时,爆轰数值模拟计算给出的  $3.5\text{mm}$  铜板在 B 炸药驱动下铜板自由表面速度计算结果与实验结果比较。计算结果与实验测得的铜板自由表面速度吻合。

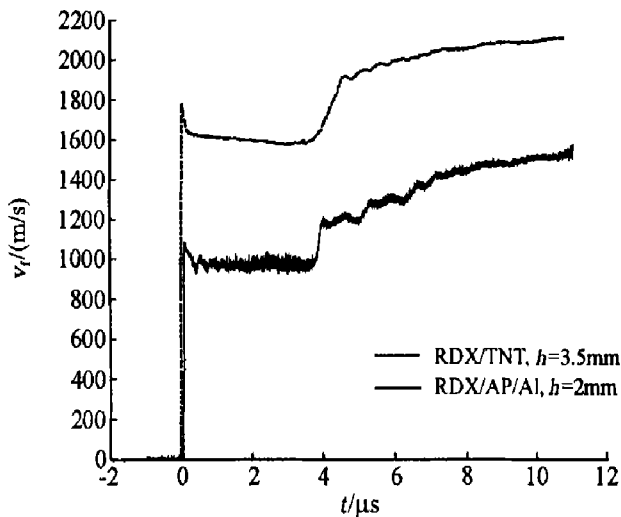


图 2 铜板中心自由表面速度

Fig. 2 The free surface velocities of the copper plate center

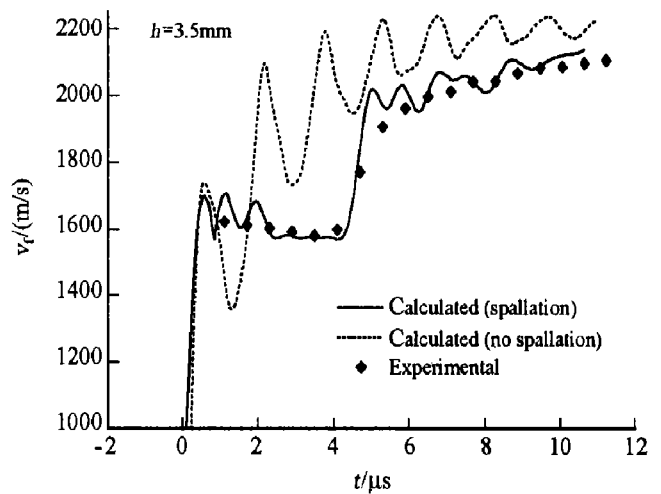


图 3 铜板中心自由表面速度实验与数值计算结果

Fig. 3 The calculated and measured free surface velocities of the copper plate center

图 4 是计算的  $3.5\text{mm}$  铜板不同时刻的变形图。图中把冲击波到达铜板底面的时间设为零时刻。在  $1\mu\text{s}$  时铜板中间已分裂成上下两个部分,在铜板的两边上下两个部分还连接在一起;在  $2\mu\text{s}$  时上下两个部分已完全分开,在  $2\sim 3\mu\text{s}$  之间两部分间达到最大距离;随后上部分在爆轰产物驱动下加速,追赶下

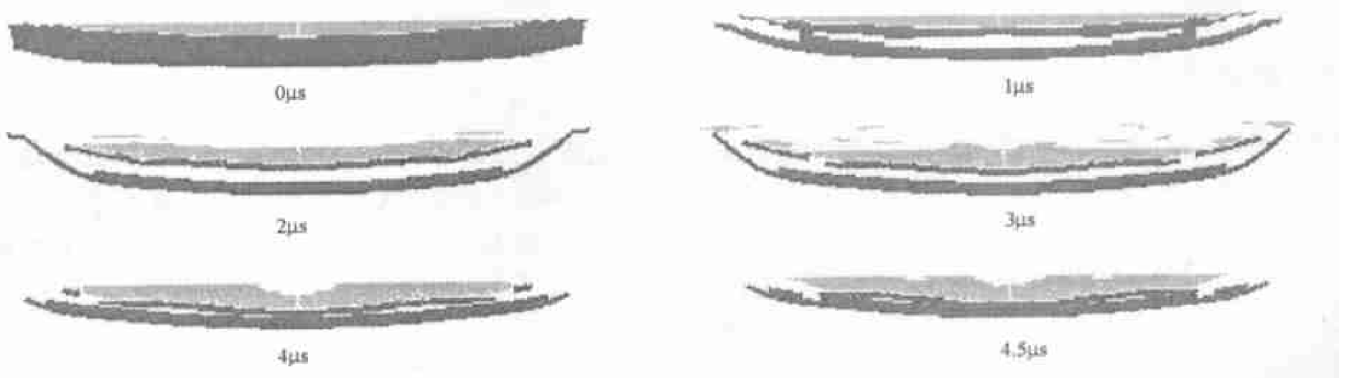


图 4 计算的铜板层裂过程 ( $h=3.5\text{mm}$ )

Fig. 4 The numerical simulation of spallation process of  $3.5\text{mm}$  copper plate

部分,两部分间的距离逐渐减小;当  $4\mu\text{s}$  时,上部分撞击到下部,两个部分又重新结合在一起,铜板自由面获得第二次加速。

对如图 5 所示的铜板径向不同位置的自由表面速度进行计算。计算结果如图 6 所示,图中把冲击波到达铜板底面中心的时间设为零时刻,中心点 H1091 单元的自由表面速度最大,H501 单元的速度变化趋势与 H1091 单元基本相同。H581 单元靠近径向边沿,由于侧向稀疏效应,该单元计算速度明显低于中心点。

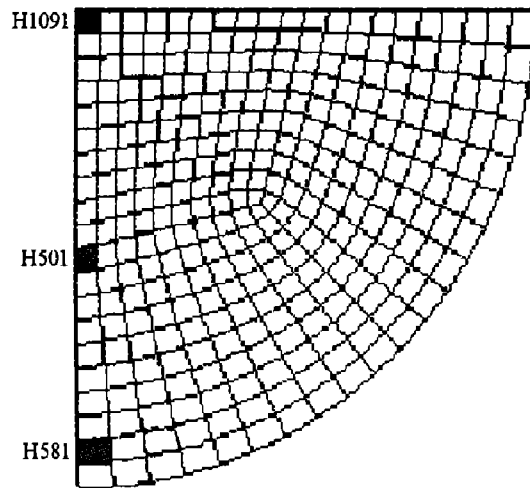


图 5 1/4 模型底视图网格和单元

Fig.5 The reseau and cells of quarter model on bottom

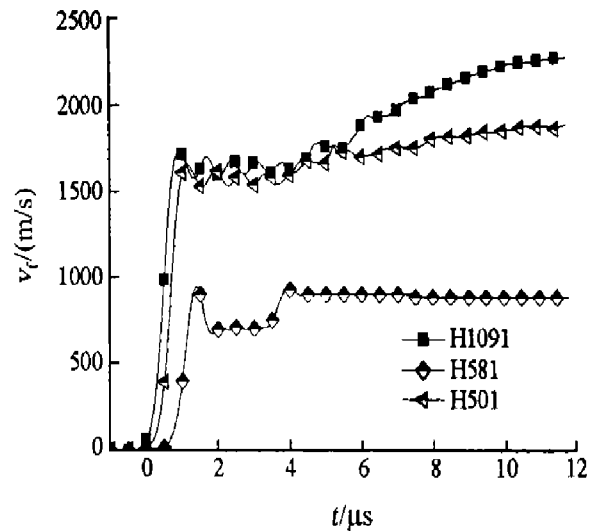


图 6 不同单元速度

Fig.6 The velocities of cells

## 5 结束语

炸药驱动金属平板实验中,有可能发生金属平板的层裂现象,根据激光速度干涉仪记录到的金属平板自由面速度,能够判断平板是否发生了层裂。数值计算表明,铜板的层裂从中心部分开始,不断向两侧延伸扩大,直到两部分完全分开,以后两个完全分离的部分又发生了碰撞聚合在一起。层裂现象对于主要分析炸药驱动能力的平板实验有不利的影响,实验中应采用延展性好,不容易断裂的金属作平板。

实验得到中国工程物理研究院化工材料研究所张明和关立峰的大力协助,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] Nahme H, Worswick M J. Dynamic properties and spall plane formation of brass [J]. Journal de Physique, 1994, 4(8): 707—712.
- [2] Buchar J, Krejci J. Spall behaviour of the low alloyed high strength steel [J]. Journal de Physique, 1994, 4(8): 713—716.
- [3] 朱兆祥,李永池,王肖钧.爆炸载荷下钢板层裂的数值分析[J].应用数学和力学,1980,2(4):296—304.  
ZHU Zhao-xiang, LI Yong-chi, WANG Xiao-jun. Numerical simulation of spallation in a steel plate due to explosive loading [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1980, 2(4): 296—304.
- [4] 郑坚,王泽平.延性材料动态断裂的实验研究和数值分析[J].固体力学学报,1994,15(4):345—350.  
ZHENG Jian, WANG Ze-ping. Experimental study and numerical analysis of dynamic fracture in ductile solids [J]. Acta Mechanical Solida Sinica, 1994, 15(4): 345—350.
- [5] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA 用户手册[Z].1999.
- [6] 陈朗,张寿齐,赵玉华.不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究[J].爆炸与冲击,1999,19(3):250—255.  
CHEN Lang, ZHANG Shou-qi, ZHAO Yu-hua. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 250—255.

## The phenomenon of spallation in a copper plate due to explosive loading

JIANG Xiao-hua<sup>1,2\*</sup>, CHEN Lang<sup>1</sup>, FENG Chang-gen<sup>1</sup>,

LONG Xin-ping<sup>2</sup>, PENG Qi-xian<sup>3</sup>

(1. *Mechanics and Engineering Department, Beijing Institute of Technology,  
Beijing 100081, China;*

2. *Institute of Chemical Material, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China;*

3. *Institute of Physics, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** Using VISAR interferometer techniques, the free-surface velocity of the copper plate is measured. The phenomenon of spallation in a copper plate is observed during the copper plate acceleration experiments. Numerical simulation of spallation in a copper plate due to explosive loading is studied by a non-linear finite element method. The calculation results accords with the experimental data.

**Key words:** solid mechanics; spallation; detonation; numerical simulation; constitutive relations of material

---

\* Corresponding author: JIANG Xiao-hua