

薄层炸药驱动飞片的性能

卫玉章 周之奎 赵玉华 孙顺进

张寿齐 邓全农 苏林祥

(1985年1月14日收到)

用不同厚度的平板状炸药驱动飞片,测量了飞片飞行一定距离后的速度,并用平面一维反应流体力学程序进行了数值模拟计算。结果表明, Craig 等测得的爆轰压力增长效应似乎与炸药加速飞片的能力无关;适用于厚层炸药的状态方程参数仍然能很好的用来计算薄层炸药加速飞片的能力。

一、问题的提出

近年来,人们发现有些炸药在低压冲击起爆后存在一个“爆轰增长”过程,过程中的爆速基本不变,爆压随爆轰波的传播而不断增长。Craig 用平面波发生器起爆 PBX-9404 炸药得到的爆压增长数据示于图 1⁽¹⁾。Mader 根据 Craig 的数据提出一个 PBX-9404 炸药的爆轰增长经验模型⁽²⁾

$$\gamma = \rho_0 D^2 / p_{ECJ} - 1 = 2.68 + 1.39/x \quad (1)$$

式中, γ 是通过 CJ 点的等熵线方程 ($pV^\gamma = \text{常数}$) 的指数, ρ_0 是炸药的初始密度, D 是爆速, p_{ECJ} 为“有效 CJ 压力”, x 是爆轰传播距离 (cm)。式 (1) 所描述的爆压增长过程如图 1 中实线所示。Mader 引用 Davis 测得的混合炸药 B 的爆压增长过程如图 1 虚线所示。Mader 说:“虽然大尺寸的 PBX-9404 与混合炸药 B 推平板的性能有很大差别,但在薄层情况下 ($\sim 1\text{cm}$), 它们几乎是相同的”⁽³⁾。他认为不能用厚炸药标定的数据来计算薄炸药的行为^(4,5)。

陈启珍等采用与 Craig 等相似的方

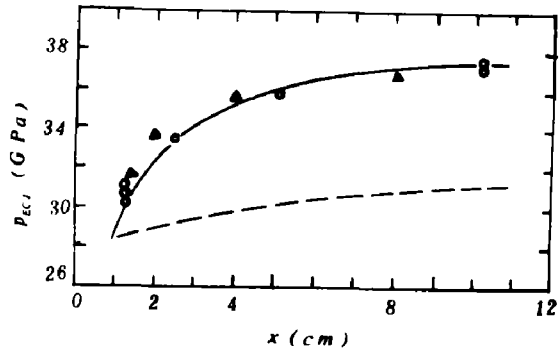


图 1 爆压随传播距离的增长
○Craig 数据 (PBX-9404) △陈启珍数据 (PBH-9) --- 混合炸药 B 的增长曲线

法,对性能与PBX-9404相似的PBH-9炸药作了实验^[6],其数据示于图1。有人认为,实验证实了爆压随装药厚度减薄而下降,从而导致炸药能量利用率降低。

Hardesty等指出,炸药的格尼能与爆压有密切关系^[7]。Aziz等指出,炸药爆速不变而 ν 值增大,会使飞片所能获得的速度显著下降^[8]。那么,上述“爆轰增长”现象是否表明用PBX-9404或PBH-9薄层炸药驱动飞片时其效能会有明显降低?是否表明10mm厚的这种炸药加速飞片的能力会与10mm厚的混和炸药B一样?是否表明适用于厚层炸药的状态方程参数不能用来计算薄层炸药加速飞片的能力?为了澄清这些在工程应用上有重要意义的问题,我们用不同厚度的PBH-9炸药和混合炸药B作了驱动飞片实验。

二、炸药驱动飞片实验

实验装置如图2所示。用直径200mm的平面波发生器起爆混合炸药B-3(TNT/RDX 40/60,密度 1.70g/cm^3),再通过钢隔板起爆待研究的炸药PBH-9(密度 1.857g/cm^3)和混合炸药B(TNT/RDX 35/65,密度 1.72g/cm^3)。通过钢隔板后的入射冲击压力与平面波发生器直接起爆这些炸药时的入射冲击压力相近。陈启珍的实验表明,在这两种起爆条件下,PBH-9炸药的爆轰增长数据是一致的。从图1看出:当PBX-9404或PBH-9炸药的厚度大于40mm时,爆压变化缓慢,其增长曲线与混合炸药B差不多平行;从40mm到10mm时,爆压迅速下降,与混合炸药B的增长曲线逐渐靠拢。我们选用厚度为10mm和40mm的两种炸药作实验。采用0.8mm厚有机玻璃加0.5mm厚硬铝或加1mm厚黄铜两种组合飞片,后者的质量是前者的4倍。为便于数值计算,设计实验装置时,考虑了在测试范围内平面波发生器不影响飞片加速过程,为此采用了比较薄的飞片和足够厚的加载炸药B-3。

用台阶闪光隙技术通过高速转镜扫描相机测量飞片飞行一定距离后的速度,所测速度是飞片飞经一定台阶高度时的平均速度,用来与计算的相应平均速度比较。每发实验测量直径80mm以内6个同心圆上的速度。从飞片击靶波形和所测速度看,这个范围内未受到侧面稀疏影响,可视为平面一维运动过程。

实验几何模型尺寸和实验结果列于表1。表1所列每个实验速度值系3发实验18个数据的平均值;所列误差是18个数据的标准误差,换算成百分误差,一般不超过 $\pm 1\%$,平均值本身的误差会更小一些。

实验测得10mm厚的混合炸药B驱动铝飞片的速度($4.99\text{mm}/\mu\text{s}$)比同样厚度的PBH-9炸药驱动飞片的速度($5.24\text{mm}/\mu\text{s}$)小5%;39mm厚的混合炸药B得到的铝飞片速度($5.90\text{mm}/\mu\text{s}$)比PBH-9炸药得到的铝飞片速度($6.40\text{mm}/\mu\text{s}$)低8%。显然,从加速飞片的能力看,未见两种炸药“在厚尺寸时有很大差别,而在薄层情况下($\sim 10\text{mm}$)几乎相同。”为了检验用厚炸药标定的参数能否用来计算薄层炸药加速飞片的能力,我们作了数值模拟计算。

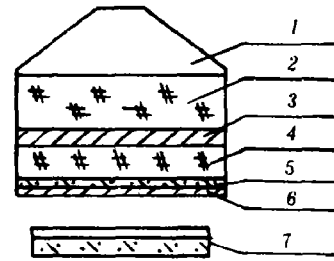


图2 实验装置示意图

1. 平面波发生器, 2. 混合炸药B-3,
3. 钢隔板, 4. 待测炸药, 5. 有机玻璃片,
6. 金属飞片, 7. 台阶光探板。

表1 实验几何模型*和实验结果

序号	混合炸药 B-3厚度 (mm)	钢隔板 厚度 (mm)	待测 炸药	待测炸 药厚度 (mm)	有机玻 璃片厚度 (mm)	金属 飞片	金属飞片 厚度 (mm)	飞片飞行 距离 (mm)	实测速度 (mm/ μ s)
1	39	15	PBH-9	10	0.81	硬铝	0.52	8.7	5.07 ^{±0.04}
2	39	15	PBH-9	39	0.81	硬铝	0.52	8.7	6.21 ^{±0.04}
3	39	15	PBH-9	10	0.81	硬铝	0.52	17.7	5.24 ^{±0.04}
4	39	15	PBH-9	39	0.81	硬铝	0.52	17.7	6.40 ^{±0.04}
5	78	15	PBH-9	10	0.81	黄铜	1.02	9.7	3.66 ^{±0.02}
6	39	15	PBH-9	39	0.81	黄铜	1.01	9.7	4.30 ^{±0.04}
7	78	15	PBH-9	10	0.81	黄铜	1.02	18.7	4.00 ^{±0.02}
8	39	15	PBH-9	39	0.81	黄铜	1.01	18.7	4.56 ^{±0.03}
9	39	15	混合炸药B	10	0.81	硬铝	0.52	17.7	4.99 ^{±0.04}
10	39	15	混合炸药B	39	0.81	硬铝	0.52	17.7	5.90 ^{±0.04}

*表中惰性材料密度:45°钢 7.84,有机玻璃 1.18,硬铝(LY12) 2.79,黄铜(H62) 8.43(单位: g/cm^3)

三、数值模拟计算

用平面一维反应流体动力学程序CHD 824^[9]作了计算。在这个程序的物理模型中没有引入爆轰增长概念。炸药起爆后,爆轰波则以稳态CJ压力向前传播。未反应炸药采用冲击两相关系和格临爱森关系确定的状态方程^[10],反应产物采用JWL状态方程^[11,12],用生核-成长反应速率关系^[11]描述反应过程。为了节省计算机时,钢隔板上面的混合炸药B-3用一个简单的比容点火函数代替反应速率关系。惰性材料用Tillotson状态方程^[13]。计算中不考虑平面波发生器的作用,从混合炸药B-3上表面瞬时起爆算起。我们通过计算和实验检验了设计,在我们的测试范围内,平面波发生器对飞片加速过程不起作用。

图3示出了计算得到的PBH-9炸药驱动下飞片的速度曲线。初始阶段是一个明显的振荡加速过程。实验点选取在加速度已相当微小的后期阶段。表2列出了计算的速度,并和实验数据作了比较。

从计算和实验的对比可以看出,无论是厚炸药还是薄炸药,计算与实验的相对偏差一般都在 $\pm 1\%$ 范围内,而10mm厚的薄层炸药的相对偏差与39mm厚炸药的相对偏差之差不超过 $\pm 0.5\%$ 。这表明适用于厚炸药的状态方程参数仍然能用来计算薄层炸药加速飞片的能力,未见到爆轰增长效应使薄层炸药能量输出效率下降的现象。

表 2 计算速度与实验值的比较

序号	待测炸药	待测炸药厚度 X (mm)	金属飞片	飞行距离 (mm)	计算速度 $u_{\text{算}}$ (mm/ μ s)	实测速度 $u_{\text{测}}$ (mm/ μ s)	相对偏差 $\frac{u_{\text{算}} - u_{\text{测}}}{u_{\text{算}}}$	相对偏差之差 $r_{10} - r_{39}$
1	PBH-9	10	硬铝	8.7	5.07	5.07	0	0.3%
2	PBH-9	39	硬铝	8.7	6.23	6.21	0.3%	
3	PBH-9	10	硬铝	17.7	5.20	5.24	0.8%	0.5%
4	PBH-9	39	硬铝	17.7	6.38	6.40	0.3%	
5	PBH-9	10	黄铜	9.7	3.69	3.66	0.8%	0.3%
6	PBH-9	39	黄铜	9.7	4.35	4.30	1.1%	
7	PBH-9	10	黄铜	18.7	4.01	4.00	0.2%	0.5%
8	PBH-9	39	黄铜	18.7	4.59	4.56	0.7%	
9	混合炸药B	10	硬铝	17.7	4.96	4.99	0.6%	0.1%
10	混合炸药B	39	硬铝	17.7	5.86	5.90	0.7%	

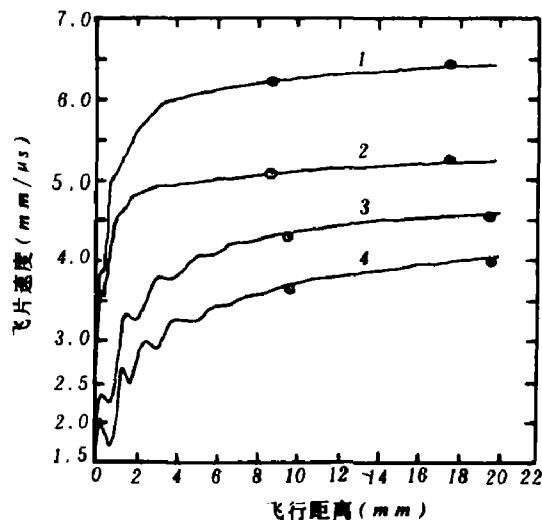


图 3 PBH-9 炸药驱动下飞片在不同距离的速度

1. 39 mm 厚 PBH-9 驱动铝飞片 2. 10 mm 厚 PBH-9 驱动铝飞片
3. 39 mm 厚 PBH-9 驱动铜飞片 4. 10 mm 厚 PBH-9 驱动铜飞片

⊙实验点

四、讨 论

在 Mader 提出爆轰增长经验模型后不久, Davis 等提出了另一种爆轰增长模型—双反应模型¹⁴。后来他用电磁法测量了不同厚度的 PBX-9404 炸药的爆轰产物粒子速度剖面, 发现并没有明显的爆轰增长现象, 实验数据可以很好地用 CJ 模型描述, 与用自由面速度法得到的结果有无法解释的矛盾。Davis 认为, 用自由面速度法数据推出显著的爆轰增长现象, 一个可能的原因是金属板有其自己的时间依赖行为, 因而通常的那些解释是不正确的⁽¹⁵⁾。目前, 爆轰增长现象仍然是一个有争议的问题。从爆轰学科的角度出发, 值得进一步研究, 得到确切

的结论。我们更关心的是它对工程应用的影响,通过实验和计算,我们得到的结论是:可以用厚炸药标定的参数计算薄层炸药加速飞片的能力;不会由于爆轰增长效应而使薄层炸药的能量输出效率降低;10 mm厚的PBH-9薄层炸药加速飞片的能力更不会降低到几乎等于混合炸药B的程度。

张光升、罗晓林、郝建中、李峰、梁红、马绍根、苏玉芬和高宁等参加了实验工作,在计算中得到了孙义亭和高文等的帮助,在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Mader, C. L., Numerical Modeling of Detonation, Univ. Calif. Press, (1979), P. 108.
- [2] 同[1] P. 107.
- [3] 同[1] P. 308.
- [4] 同[1] P. 103.
- [5] 同[1] P. 305.
- [6] 陈启珍, 第二次全国爆轰学术讨论会论文集(二), 南京, No. 8, (1983).
- [7] Hardesty, D. R. et al, *Combustion and Flame*, 28(1) (1977), 45.
- [8] Aziz, A. K. et al, *Proc. 4th Symp. Detonation*, (1965), P. 205.
- [9] 孙义亭等, 私人通讯, (1982).
- [10] 苏林祥等, 爆炸与冲击, (2) (1981), 12.
- [11] Cochran, S. G. et al, *UCID-18024*, (1979).
- [12] Kurg, J. W. et al, *Proc. 4th Symp. Detonation*, (1965).
- [13] Hageman, L. J. et al, *AD B015343*, (1976).
- [14] Bdzil, J. B., Davis, W. C., *LA-5962-MS*, (1975).
- [15] Davis, W. C., *Proc. 8th Symp. Detonation*, (1976), P. 637.

PERFORMANCE OF THE THIN EXPLOSIVE DRIVING A FLYER

Wei Yuzhang Zhou Zhikui Zhao Yuhua Sun Shunjin

Zhang Shouqi Deng Quannong Su Linxiang

Abstract

The measured velocities of flyers driven by explosives with different thicknesses are compared with the results calculated by our CHD 82, one-dimensional reactive hydrodynamic code. The results show that the so-called "effective CJ pressure", as proposed by Craig et al, does not influence the explosive performance for driving flyer and that the characteristic parameters in equation-of-state which are applicable to a thick explosive can be used in calculating the thin explosive as well.