

文章编号: 1006-9941(2008)03-0295-03

NATO 角和飞板速度对平板装药干扰射流频率的影响

李如江, 沈兆武

(中国科技大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为研究射流轴线与飞板的夹角大小(NATO 角)和飞板速度对反应装甲干扰聚能射流的影响,在分析飞板与射流作用的基础上,建立了计算飞板断续干扰射流频率的物理模型,利用此模型分析了 NATO 角以及飞板速度对干扰射流的影响,并进行了试验研究。研究表明,干扰频率在 NATO 角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 时会急剧增加,随着飞板速度的增加干扰频率变大。

关键词: 爆炸力学; 干扰频率; 物理模型; 反应装甲; 射流

中图分类号: TJ8; O385

文献标识码: A

1 引 言

爆炸反应装甲 (explosive reactive armour, ERA) 自 20 世纪 70 年代由 Manfred Held^[1] 发明以来,由于其具有体积小、重量轻、装卸方便、成本较低和安全性好等优点而广泛应用于现代装甲车辆的防护。许多国家投入了大量的人力和物力对其抗弹机理进行研究,并提出了一些分析模型。Maysless 等^[2] 最早建立了破甲射流与反应装甲相互作用的“卵石模型”。Barenea 等^[3] 基于射流与许多飞板作用假设的基础上对射流干扰进行了建模,但是所得结果比较繁琐。朱定波、李景云等^[4] 研究了爆炸装甲对破甲射流的连续干扰机理,把斜侵彻简化为垂直侵彻,推出了扩孔公式,但是所得公式不能直观反映干扰过程规律以及倾斜侵彻时角度变化所带来的影响。因而寻找一种简洁的射流与飞板相互作用的物理模型,对于反应装甲的设计具有重要意义。

ERA 基本组成结构为两层钢板夹一层高能钝感炸药组成的“三明治”,其作用原理是在外界能量作用下引起炸药爆炸,驱动飞板沿其法线方向作高速运动,运动的飞板与射流或弹杆作用,使之偏离轴线运动,从而达到防护目的。

反应装甲爆炸驱动的薄飞板对高速运动的射流干扰分为断续干扰和连续干扰两种方式。当高速运动的射流撞击金属薄板时,在撞击点处形成一个高速扩张的孔,使射流暂时与板脱离接触。由于能量的衰减,孔扩大到一定直径后就不再增加,飞板运动和孔扩张的耦合,使射流与孔壁再次接触,这种过程的反复出现,其结

果使射流受到周期性的干扰,称为断续干扰。两次干扰之间的时间间隔长短可以衡量射流受干扰的程度,用干扰频率表示。当其它参数一定时,可以用干扰频率来衡量反应装甲的性能。干扰频率越大,射流的受干扰程度就越大,射流的残余穿深就越小。本实验研究了飞板对射流的断续干扰,估计了其射流的干扰频率。

2 干扰物理模型描述

假设 $t = 0$ 时,一聚能射流从距离平板装药为 S_0 的虚拟点源形成(见图 1)。射流的半径为 r_j ,头部速度为 V_0 ,平板装药法线与射流轴线的夹角为 ε ,即 NATO 角,平板装药的前后板以及药层厚分别为 T_F , T_B , T_e ,当射流侵彻平板装药时,会引爆炸药,这时两块飞板会朝相反的方向运动。

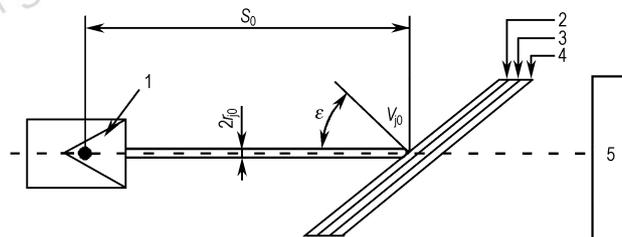


图 1 射流和平板装药物理模型

1—虚拟点源, 2—后板, 3—炸药层, 4—前板, 5—靶板

Fig. 1 Physical model of jet and ERA

1—virtual origin, 2—back plate, 3—explosive layer,

4—front plate, 5—target

为解决问题方便,作以下假设:

(1) 平板装药横向尺寸足够大,这样可不考虑金属板中侧向稀疏波的作用。

(2) 假定射流在与板作用过程中连续,并忽略爆轰

收稿日期: 2007-09-20; 修回日期: 2007-12-11

作者简介: 李如江(1978 -),男,在读博士,从事现代爆炸技术研究。

e-mail: liru7841@mail.ustc.edu.cn

产物对射流的影响。实际作用过程中由于爆轰产物及其压力对射流作用时间较短,在抗侵彻机理中起次要作用。

(3) 当射流穿过平板装药,炸药立即爆炸。当射流引爆被包覆的炸药时,由于其前驱波的作用,使炸药钝感,存在一定时间的起爆延滞期。

(4) 忽略射流强度。这样飞板在对某射流微元干扰时,不会引起相邻微元的状态变化。

(5) 炸药爆炸瞬时把飞板加速至最大速度。

3 干扰频率估算

3.1 爆炸驱动飞板运动速度估算

假定平板装药结构如图2所示,装药爆轰后,其气体产物在距 M_B 平板表面 a 处和距 M_F 平板表面 b 处形成稳定平面,应用 Gurney 假设和能量守恒,可分别推得其速度为^[4]:

$$V_B = \sqrt{2E} \left[\frac{1}{3} \times \frac{1 + (b/a)^3}{1 + b/a} + \frac{M_F}{C} \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{M_B}{C} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$V_F = bV_B/a \quad (2)$$

式中, $\sqrt{2E}$ 为 Gurney 比能, C/M 为炸药与平板的单位面积质量之比,当平板装药对称时有:

$$V_B = V_F = V = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{3C/M}{3C/M + 2}} \quad (3)$$

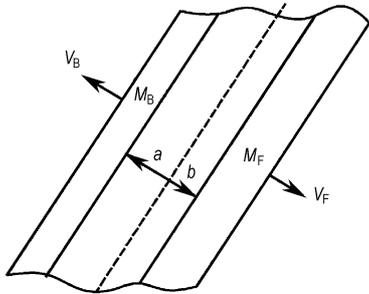


图2 飞板速度计算模型
Fig.2 Calculation model of plate velocity

3.2 射流侵彻飞板扩孔速度计算

高速射流侵彻飞板的扩孔半径随时间的变化可用式(4)表达^[5]:

$$r_c(t) = \sqrt{A/B - (\sqrt{A/B - r_j^2} - \sqrt{B}t)^2} \quad (4)$$

$$A = r_j^2 \cdot V_{j0}^2 (1 + \sqrt{\rho_i/\rho_j})^{-1} \quad (5)$$

$$B = 2R_1/\rho_j \quad (6)$$

式中, r_c 为开孔半径; R_1 为板的动态强度; ρ_i, ρ_j 分别为板和射流的密度,其它符号意义同前。

3.3 干扰频率计算物理模型

前板和背板孔边缘上分别取 B 点和 F 点,建立如

图3所示的坐标系,则 B 点即后板的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = Vt \cos \varepsilon \\ y = Vt \sin \varepsilon - r_c(t) \end{cases} \quad (7)$$

上述方程消去 t ,并结合式(4)得:

$$y = \text{stg} \varepsilon - \sqrt{\frac{A}{B} - \left[\sqrt{\frac{A}{B} - r_j^2} - \frac{\sqrt{B}x}{V \cos \varepsilon} \right]^2} \quad (8)$$

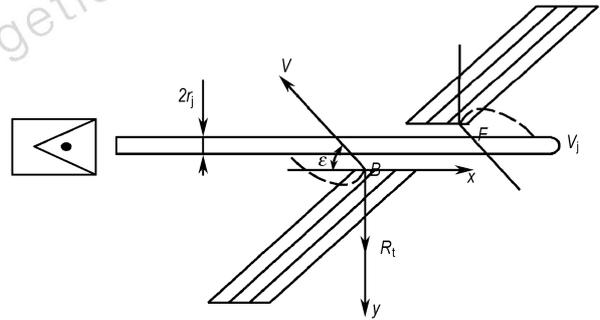


图3 飞板干涉射流频率计算物理模型
Fig.3 Physical model of interaction frequency between flying plates and jet

令 $y=0$,可求得孔边缘与射流下一次作用时的距离,结合式(5),(6)得

$$x = \frac{(\sqrt{A - Br_j^2} \pm \sqrt{A + V^2 r_j^2 \sin^2 \varepsilon}) V \cos \varepsilon}{B + V^2 \sin^2 \varepsilon} \quad (9)$$

由于 x 与 $V \cos \varepsilon$ 方向一致,故取“+”,此点到下一干扰点的时间间隔为:

$$t = \frac{\sqrt{A - Br_j^2} + \sqrt{A + V^2 r_j^2 \sin^2 \varepsilon}}{B + V^2 \sin^2 \varepsilon} \quad (10)$$

在此后的作用过程中,此过程反复出现,从而形成对射流的断续干扰,射流受飞板的干扰频率为: $f=1/t$ 。

同理,可得 F 点即前板对射流作用周期方程,只是前板第一次扩孔时 V_{j0} 需以 V_{je} 代替。设 V_{jB}, V_{je} 分别为射流头部穿透后板和炸药层时的速度,由准定常侵彻理论可分别求得:

$$V_{jB} = V_{j0} (1 + T_B \sec \varepsilon / S_0)^{-1/\gamma_B} \quad (11)$$

$$V_{je} = V_{jB} (1 + T_e \sec \varepsilon / (S_0 + T_B \sec \varepsilon))^{-1/\gamma_e} \quad (12)$$

式中, $\gamma_B = \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_B}}, \gamma_e = \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_e}}, \rho_e$ 为炸药密度。

4 试验结果与讨论

4.1 NATO 角对干扰频率的影响

假设其它参数不变,仅改变 NATO 角 ε 的大小,利用公式(10)计算,结果如图4所示。可以看出,干扰频率随着 NATO 角的增加而增加,在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间会急剧增加,

此区间对射流干扰频率变化比较明显。60°到90°之间干扰频率趋缓。文献[7]使用96 mm口径的聚能装药,保持其它条件不变,试验研究了NATO角为30°,40°,60°时对射流的干扰情况,用后效靶上的残余穿深来表示,结果如图5所示。结果表明,在该试验条件下,NATO角越大(60°),残余穿深越小,即射流受干扰程度越大。

4.2 飞板速度对干扰频率的影响

假定其它参数保持不变,仅改变飞板速度,利用公式(10)计算,其对干扰频率的影响如图6所示。从图6可以看出,随着飞板速度的增加,干扰频率增加,干扰程

度变大。为验证飞板速度对干扰频率的影响,使用不同的装药来改变飞板的速度,实验装置如图7所示,爆炸后飞板速度分别为600 m·s⁻¹和800 m·s⁻¹。聚能装药使用中北大学研制的标准弹,口部距平板装药后板和后效靶的距离分别为65 mm和150 mm,平板装药厚9 mm(2/5/2),在弹和平板装药中间放置一块2 mm厚的45#钢板模拟外壳,其大小为100 mm×100 mm,后效靶厚50 mm,NATO角为60°,弹在此炸高下的空白穿深为80 mm,试验结果见表1。从试验结果可以看出,随着飞板速度的提高,残余穿深降低,干扰频率增大。

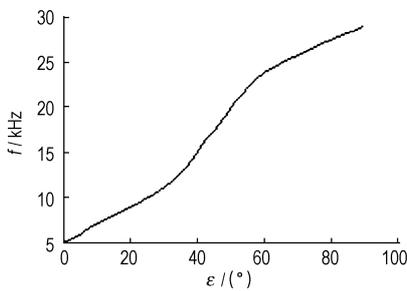


图4 NATO角与干扰频率关系
Fig.4 Relationship between NATO angle and disturbance frequency obtained from physical model

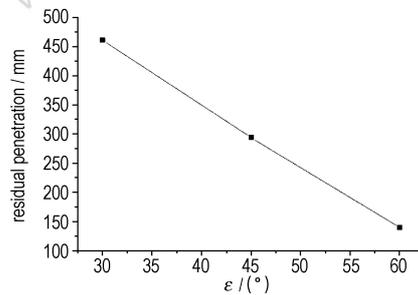


图5 NATO角与残余穿深关系
Fig.5 Relationship between NATO angle and residual penetration obtained from experimental

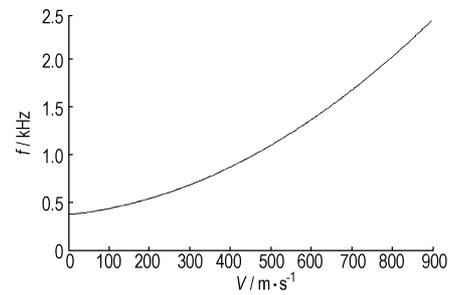


图6 飞板速度与干扰频率关系
Fig.6 Relationship between plate velocity and disturbance frequency obtained from physical model

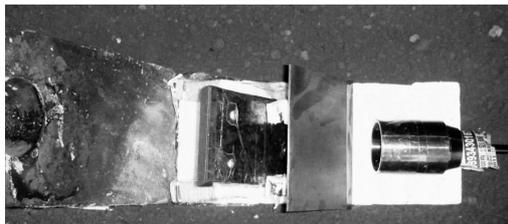


图7 试验装置

Fig.7 Experimental set-up for plate velocity test

表1 飞板速度和残余穿深

Table 1 Experimental results for plate velocity and residual penetration

No.	plate velocity /m·s ⁻¹	residual penetration /mm	cratering /mm×mm
1	600	29	12×25
2	800	20	16×23

5 结论

(1) 建立的断续干扰物理模型可定量反映平板装药爆炸驱动薄板对射流的干扰。

(2) 其它参数不变时,干扰频率随着 NATO 角的

增加而增加,在40°~60°之间会急剧增加。

(3) 干扰频率随着飞板速度的增加而增加。飞板速度越高,干扰频率越大。

参考文献:

- [1] Held M. Explosive reactive armor [P]. British Patent No. 1581125. 1974.
- [2] Mayselless M, Erlich Y. Interaction of shaped charge jets with reactive armor[C]//Proc. 8th ISB. Raustics, 1984: 198-204.
- [3] Barenea N, Sela N, Ravid M. Ananalytical model for shaped charge jet interaction with reactive armour and residual penetration[C]//14th ISB, Canada, 1993: 651-660.
- [4] 朱定波,李景云,李德君. 爆炸装甲对射流干扰机理的研究[J]. 兵工学报, 1991, 2(1): 46-52. ZHU Ding-bo, LI Jing-yun, LI De-jun. Distrbance on an armour-piecing jet caused by an explosive armour [J]. *Acta Armamentarii*, 1991, 2(1): 46-52.
- [5] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 80-82.
- [6] Held M. Verification of the equation for radial crater growth by shaped charge jet penetration[J]. *Int J Impact Engng*, 1995, 17: 387-398.
- [7] Held M. Stopping power of explosive reactive armours against different shaped charge diameters or at different angles [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2001, 26: 97-104. (下转 318 页)

Relationship between the Characteristic Value of PDSC and Burning Rate of NEPE Propellant Containing CL-20

DING Li, ZHAO Feng-qi, LIU Zi-ru, ZHANG La-ying, HENG Shu-yun

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Thermal decomposition of NEPE propellant containing hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) at ambient pressure (0.1 MPa) and high pressure (2, 4, 6, 8 MPa) was researched with pressure differential scanning calorimetry (PDSC). The results show that the temperature and heat of thermal decomposition are changed according to adding catalysts. The variation change with pressure. The PDSC characteristic values, which are the square roots of heat release rate and pressure on PDSC tests, can be correlate to burning rate of NEPE propellant containing CL-20 using a linear equation. k_r , correlation factor of burning rate with PDSC characteristic value was given. k_r can be used to analyze the influence of burning catalysts on burning rate of CL-20-NEPE propellant.

Key words: physical chemistry; hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20); NEPE propellant; burning rate

(上接 297 页)

Effect of NATO Angle and Plate Velocity on Disturbance Frequency of Reactive Armor against Shaped Charge Jet

LI Ru-jiang, SHEN Zhao-wu

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The frequency calculation on the intermittent disturbance is of importance for the penetration calculation of the escaping jet and the design of anti-shaped charge jet. A physical model was presented based on the analysis of interaction process. The effects of north atlantic treaty organization (NATO) angle and the plate velocity on the disturbance frequency were discussed and compared with experimental results. Results show that the disturbance frequency increases drastically when the NATO angle changes from 40° to 60° , and increases with the plate velocity.

Key words: explosion mechanics; disturbance frequency; physical model; reactive armor; shaped charge jet