第21卷 第2期
2007年6月

高 压 物 理 学 报
CHinESE JOURNAL of HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 21, No. 2
June, 2007

文章编号:1000-5773(2007)02-0121-08

锥头弹丸撞击下FRP层合板的侵彻与穿透的理论研究*

覃 悦,文鹤鸣,何 涛

(中国科学技术大学材料力学行为和设计国家重点实验室,安徽合肥 230027)

摘要:研究了锥头弹丸撞击下FRP层合板的侵彻和穿透性能,在局部化破坏模式假定的基础上改进了Wen提出的能量简化分析模型。改进模型仍假设弹体在侵彻过程中表面所受靶体的平均压力由靶体材料弹塑性变形所引起的静态阻力和速度效应引起的动阻力两部分组成,认为侵彻过程中靶体对弹体的阻力不再是一个常数,而是侵彻速度的函数。并由此推导出了锥头弹丸在侵彻和贯穿过程中的侵彻深度、残余速度和弹道极限速度的公式。理论预测与实验结果符合得很好。

关键词:FRP层合板;侵彻;穿透;弹道极限;锥头弹丸

中图分类号:O347.3 **文献标识码**:A

1 引 言

纤维增强树脂基复合材料层合板(FRP)在航空、航天、海洋、交通、化工、核工业以及国防等诸多领域得到了广泛的应用。但是由于层合板结构及材料特性的复杂性,其弹道冲击过程十分复杂,影响因素也较多。因此,用单一的研究手段,不管是实验的,理论的还是数值的方法,来建立简化理论模型都显得尤为困难。近年来很多学者致力于侵彻和穿透过程中靶板材料的动态力学变形机制的研究,如Greaves[1-2]利用平头弹丸撞击S2 Glass/Phenolic厚层合板靶板,对其弹道穿透过程中的变形机制进行了研究;Zhu[3-4]对锥头弹撞击下Kevlar-29/Polyester层合板吸能机制的研究;Taylor[5]和Morye[6]提出的相似的柔性层合板弹道冲击吸能的分析模型;Lee等[7]根据平头弹撞击CFRP层合板提出了三阶段模型并进行了数值模拟。这些模型能很好解决某一类问题,但都存在很大局限性。

Wen[8-9]在建立侵彻力公式的基础上,根据能量守恒原理,针对不同形状弹头(截断弹头、平头、锥形头、卵形头、半球形头),得到了预测侵彻深度和弹道极限的公式,认为弹体侵彻过程中受到靶体的平均侵彻阻力由两部分组成:由于层合板材料的弹塑性变形而引起的静态应力和由速度效应产生的动应力(只与初始速度有关),同时不考虑弹丸在侵彻过程中的变形,并假设靶板变形为局部效应。并通过与大量实验结果的比较证明了其模型的可靠性。

本研究对Wen[8-9]基于侵彻力分析的能量简化分析模型进行了改进,认为侵彻过程中靶体对射弹的平均压力不再为常数而是侵彻速度的函数。并对理论预测结果与已有实验结果进行了比较和讨论。

2 模型的建立

2.1 靶体阻力假设

图1(a)给出了锥头弹丸的几何尺寸:弹体半径为a,直径为d,弹身长L,锥顶角为θ。本研究基于

* **收稿日期**:2006-05-15;**修回日期**:2006-09-28

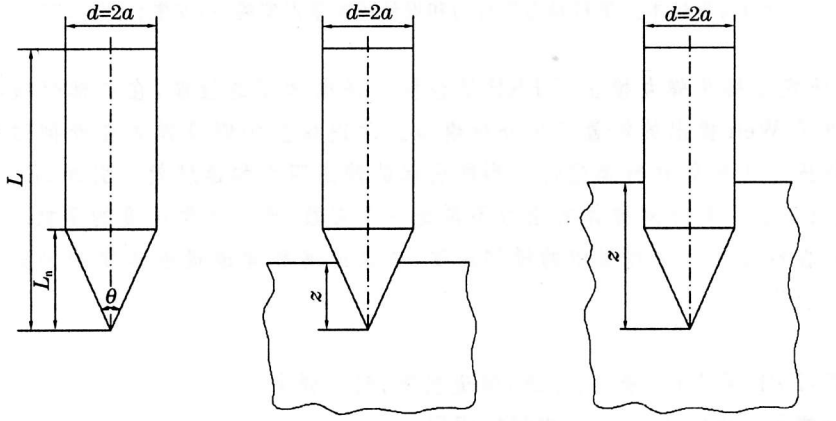
作者简介:覃 悦(1982—),女,博士研究生,主要从事冲击动力学研究. E-mail:yqin@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:文鹤鸣(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事冲击动力学研究. E-mail:hmwen@ustc.edu.cn

Wen[8-9]的能量简化分析模型，仍假设弹体在侵彻过程中表面所受靶体的平均压力(σ)由两部分组成：由靶体材料弹塑性变形所引起的静态阻力(σ_s)；由速度效应引起的动阻力(σ_d)。并进一步假设静阻力 $\sigma_s=\sigma_e$，动阻力 $\sigma_d=\beta(\rho_t/\sigma_e)^{1/2}v_n$，即

$$\sigma=\sigma_e+\beta\sqrt{\rho_t\sigma_e}\cdot v_n \tag{1}$$

式中：σ_e 为准静态条件下 FRP 层合板厚度方向的压缩线弹性极限，ρ_t 为 FRP 层合板的密度，β 为经验常数，由实验确定，与弹丸的锥角有关。所不同的是，这里 v_n 不再是常数，而是侵彻过程中垂直于弹体表面的瞬时速度。在计算过程中仍假设弹体为刚性。



(a) Geometry (b) Partial penetration $z\leqslant L_n$ (c) Full penetration $z>L_n$

图 1 锥头弹侵彻示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a cone-nosed projectile for penetration

2.2 锥头弹丸的侵彻方程

设侵彻深度为 P，弹体的初始撞击速度为 v_s，弹体在运动方向上的位移为 z。则对于锥头弹丸(如图 1 所示)，侵彻可分为两种情况：(a) $P\leqslant L_n$ 和(b) $P>L_n$。以下对这两种情况分别进行分析。

(a) $P\leqslant L_n$

部分侵彻($P\leqslant L_n$)时弹头没有完全进入靶体即停止侵彻。由公式(1)得到弹体在侵彻方向所受阻力(含摩擦力)为

$$F_z=\pi z^2\tan^2(\theta/2)\sigma_n[1+\mu/\tan(\theta/2)]$$

即

$$F_z=\pi z^2\tan^2(\theta/2)[\sigma_e+\beta\sqrt{\rho_t\sigma_e}\cdot v_z\cdot\sin(\theta/2)][1+\mu/\tan(\theta/2)] \tag{2}$$

运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=mv_z\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}z}=-F_z \tag{3}$$

这里令 $A=\sigma_e$，$B=\beta(\rho_t/\sigma_e)^{1/2}\sin(\theta/2)$，$\mu$ 为摩擦系数，v_z 为弹体侵彻方向的速度。则由方程(2)和方程(3)可得

$$mv_z\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}z}=\pi z^2[\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{4}$$

积分上式得

$$P=\left\{\frac{3m[v_s-A/B\cdot\ln(1+B/A\cdot v_s)]}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]}\right\}^{1/3} \tag{5}$$

(b) $P>L_n$ 时

完全侵彻($P>L_n$)时，弹头最终将全部进入靶体。当完全进入靶体以后，弹体在侵彻方向所受阻力为

$$F_z=A_0[1+\mu/\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{6}$$

式中:$A_0=\pi a^2$ 为弹体截面面积。把(6)式代入(3)式得弹体最终的侵彻深度

$$P=\frac{m}{A_0B[1+\mu/\tan(\theta/2)]}[v_1-A/B\cdot\ln(1+B/A\cdot v_1)]+L_n \tag{7}$$

式中:v_1 为弹头完全进入靶体即 $P=L_n$ 时刻的速度。把 $P=L_n$ 代入(5)式可得 v_1 的计算表达式

$$\left\{\frac{3m\{(v_s-v_1)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_1)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]}\right\}^{1/3}=L_n \tag{8}$$

2.3　锥头弹丸的穿透方程

根据板厚(T)和锥头弹弹头长度(L_n)相对大小,靶板可分为薄板($T\leqslant L_n$)和中厚板($T>L_n$)。其相应的穿透过程可分为三个阶段,对薄靶 ($H\leqslant L_n$):$z\leqslant T$,$T\leqslant z<L_n$ 和 $L_n\leqslant z<L_n+T$;中厚靶 ($T>L_n$):$z\leqslant L_n$,$L_n\leqslant z<H$ 和 $T\leqslant z<L_n+T$。

(a) 薄板($T\leqslant L_n$)

对于薄靶,如图 2 所示穿透过程可分成三个阶段:$z\leqslant T$,$T<z\leqslant L_n$ 和 $z>L_n$。弹体在三个过程中所受轴向阻力分别为

$$F_z=\pi z^2[\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{9}$$

$$F_z=\pi(2z-T)T[\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{10}$$

$$F_z=\pi[L_n^2-(z-T)^2][\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{11}$$

把以上方程代入(3)式并积分,可以得到三个过程结束时(即 $z=T$,$z=L_n$,$z=T+L_n$)的速度分别满足

$$\frac{T^3}{3}=\frac{m\{(v_s-v_1)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_1)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]} \tag{12}$$

$$TL_n(L_n-T)=\frac{m\{(v_1-v_2)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_1)/(1+B/A\cdot v_2)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]} \tag{13}$$

$$T^2(L_n-T/3)=\frac{m\{(v_2-v_r)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_2)/(1+B/A\cdot v_r)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]} \tag{14}$$

式中:v_1、v_2、v_r 分别为三个过程结束时的速度。将以上三个方程相加,得到最终的残余速度满足下式

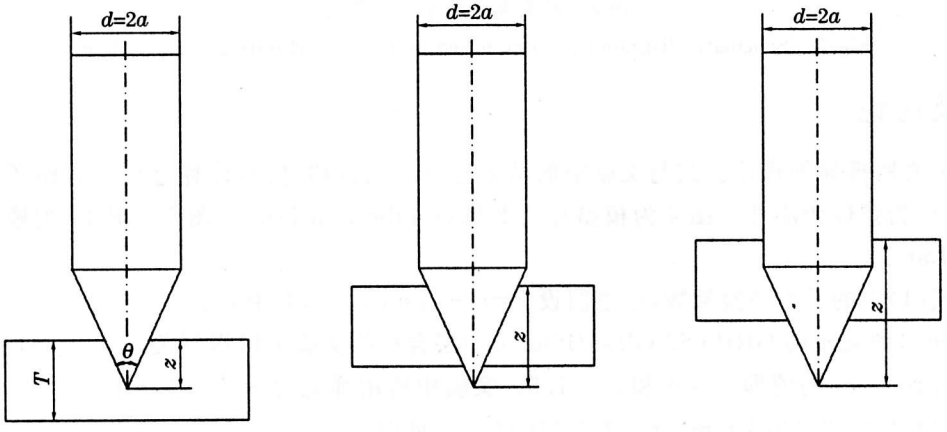
$$TL_n^2=\frac{m\{(v_s-v_r)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_r)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]}$$

即

$$v_r=v_s-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_r)]-\pi BTL_n^2\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]/m \tag{15}$$

当残余速度 $v_r=0$ 时,即得到穿透靶板的极限速度 v_b,满足方程

$$v_b=A/B\cdot\ln(1+B/A\cdot v_b)+\pi BTL_n^2\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]/m \tag{16}$$



(a) $z\leqslant T$　　(b) $T<z\leqslant L_n$　　(c) $z>L_n$

图 2　锥头弹穿透薄靶示意图

Fig. 2　Schematic diagram of a cone-nosed projectile perforating a thin plate

(b) 中厚靶 ($T>L_n$)

对于中厚靶的穿透问题(如图 3 所示)也分成三个阶段:$z\leqslant L_n$,$L_n<z\leqslant T$ 和 $T<z\leqslant L_n+T$。三个过程中弹体在轴向所受阻力分别为

$$F_z=\pi z^2[\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{17}$$

$$F_z=\pi L_n^2[\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{18}$$

$$F_z=\pi[L_n^2-(z-T)^2][\tan^2(\theta/2)+\mu\tan(\theta/2)](A+Bv_z) \tag{19}$$

把以上方程代入方程(3)中,同样可以得到三个过程结束时(即 $z=L_n$,$z=T$,$z=T+L_n$)的速度满足

$$\frac{L_n^3}{3}=\frac{m\{(v_s-v_1)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_1)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]} \tag{20}$$

$$L_n^2(T-L_n)=\frac{m\{(v_1-v_2)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_1)/(1+B/A\cdot v_2)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]} \tag{21}$$

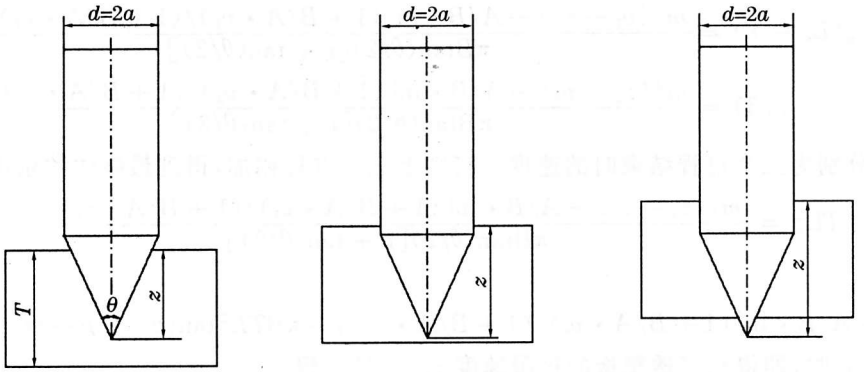
$$\frac{2L_n^2}{3}=\frac{m\{(v_2-v_r)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_2)/(1+B/A\cdot v_r)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]} \tag{22}$$

以上三式相加得到残余速度满足

$$TL_n^2=\frac{m\{(v_s-v_r)-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_r)]\}}{\pi B\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]}$$

即
$$v_r=v_s-A/B\cdot\ln[(1+B/A\cdot v_s)/(1+B/A\cdot v_r)]-\pi BTL_n^2\tan(\theta/2)[\mu+\tan(\theta/2)]/m \tag{23}$$

与方程(15)比较发现,对于薄靶和厚靶的穿透,虽然穿透过程不同,但最终所得的残余速度表达式是一致的。同理,穿透的极限速度仍满足(16)式。



(a) $z\leqslant L_n$ (b) $L_n<z\leqslant T$ (c) $T<z\leqslant L_n+T$

图 3 锥头弹穿透厚靶示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a cone-nosed projectile perforating a thick plate

3 结果及讨论

本节对上文所推导的理论公式与文献中的结果进行了比较和讨论,计算过程中忽略了摩擦力的影响($\mu=0$),并认为弹体为刚性。图 4 为模型标定数据(Calibration Data),图 5～图 10 为模型验证数据(Validation Data)。

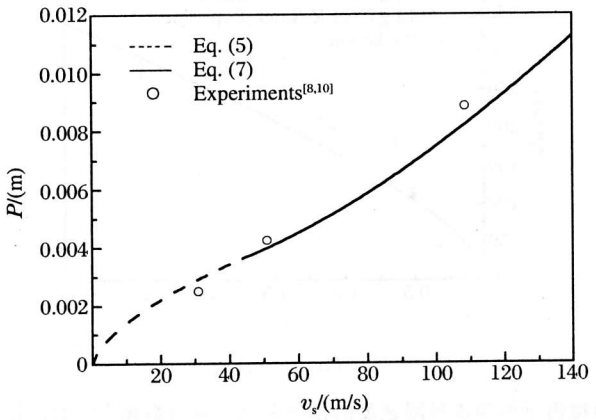
因为公式(1)中的 β 为经验常数,这里假设 $\beta=c_1+c_2\sin(\theta/2)$,其中 c_1、c_2 为待定常数。通过两组不同锥角(45°、90°)弹丸侵彻 GRP (S2-Glass/Phenolic)层合板的实验可以得到关于 c_1、c_2 的联立方程组,解方程组可得到 c_1、c_2 的值即 $c_1=4$ 和 $c_2=1.5$。实验中所用弹丸的直径为 7.5 mm,质量分别为 69 g 和 47 g,靶板密度 $\rho_t=2\,200$ kg/m^3,$\sigma_e=755$ MPa[8,10]。此时

$$\beta=4+1.5\sin(\theta/2) \tag{24}$$

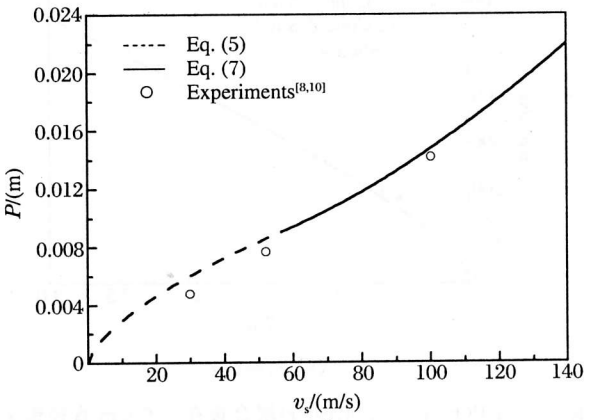
由图 4 可以看出,简化模型所得结果与文献[10]中报道的实验数据吻合得很好。

图 5 给出了我们通过简化模型得到的弹道极限速度与实验数据的比较结果。实验用靶板材料为 GRP(E-Glass/Polyester)层合板,弹丸直径 $d=10.5$ mm,质量 $m=18.7$ g,锥形顶角 $\theta=90°$。由(24)式

可知 $\beta=4+1.5\sin(\theta/2)=5.06$,靶板密度 $\rho_t=1\,650\ \mathrm{g/m^3}$,$\sigma_e=225\ \mathrm{MPa}$[8,11]。从图 5 中可以看出,简化模型所得结果与文献[11]中报道的实验数据吻合得很好。



(a) $m=47$ g,$\theta=90°$



(b) $m=69$ g,$\theta=45°$

图 4　GRP (S2-Glass/Phenolic)层合板在 7.5 mm 直径锥头弹撞击下侵彻深度的预测曲线与实验数据的比较

Fig. 4　Comparison of the theoretical predictions with the experimental data for the penetration of thick GRP (S2-Glass/Phenolic) laminates struck normally by a 7.5 mm diameter cone-nosed projectile

图 6 给出了我们通过简化模型得到的弹道极限速度的理论曲线与实验数据的比较结果。实验用靶板材料为 GRP(E-Glass/Polyester)层合板,$d=7.6$ mm,质量分别为 6 g 和 12 g,锥形顶角 $\theta=90°$。由(24)式可知 $\beta=4+1.5\sin(\theta/2)=5.06$,靶板密度 $\rho_t=1\,650\ \mathrm{kg/m^3}$,$\sigma_e=225\ \mathrm{MPa}$[8,12]。从图中可以看出,简化模型所得结果与文献[12]中报道的实验数据吻合得很好。

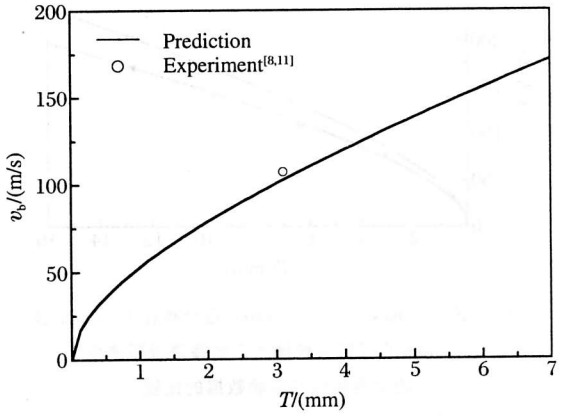


图 5　GRP(E-Glass/Polyester)层合板在 18.7 g、10.5 mm 直径锥头弹撞击下的弹道极限速度的预测曲线与实验数据的比较

Fig. 5　Comparison of the theoretical predictions with the experimental data for the perforation of GRP(E-Glass/Polyester) laminates struck transversely by a 18.7 g,10.5 mm diameter cone-nosed missile

图 7 分别为直径 $d=12.7$ mm、质量 $m=28.9$ g 和 $d=7.5$ mm、$m=12.5$ g 的锥头弹丸撞击 KFRP (Kevlar 29/Polyester)层合板的理论曲线与实验结果比较。靶板密度 $\rho_t=1\,231\ \mathrm{kg/m^3}$,$\sigma_e=145\ \mathrm{MPa}$[8,13],锥顶角 $\theta=60°$,由(24)式可知 $\beta=4+1.5\sin(\theta/2)=4.75$。简化模型所得结果与文献[12]中报道的实验数据吻合得很好。

图 8 为直径 $d=12.7$ mm、质量 $m=28.9$ g 的锥头弹丸撞击 KFRP (Kevlar 29/Polyester)层合板的理论曲线与实验结果比较。靶板密度 $\rho_t=1\,231\ \mathrm{kg/m^3}$,$\sigma_e=145\ \mathrm{MPa}$[8,13],锥顶角 $\theta=60°$。由(24)式可知 $\beta=4+1.5\sin(\theta/2)=4.75$,从图中可以看出理论曲线与实验数据吻合得较好。

作为锥头弹丸的一种特例,平头弹丸的侵彻和穿透过程中弹体所受阻力只与弹体的瞬时速度有关,与弹头位置无关,此时无论是侵彻还是穿透过程都只存在一个阶段,而且摩擦阻力为零。由方程(6),弹体在运动过程中所受阻力为

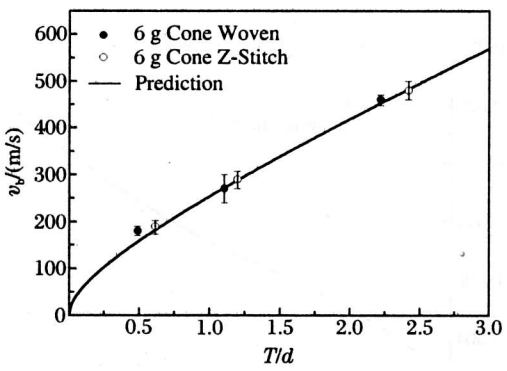
$$F_z = A_0(A + Bv_z) \tag{25}$$

对于平头弹 $L_n \cdot \tan^2(\theta/2) = a$,$L_n=0$,$\mu=0$。由方程(7)得到弹体的侵彻深度为

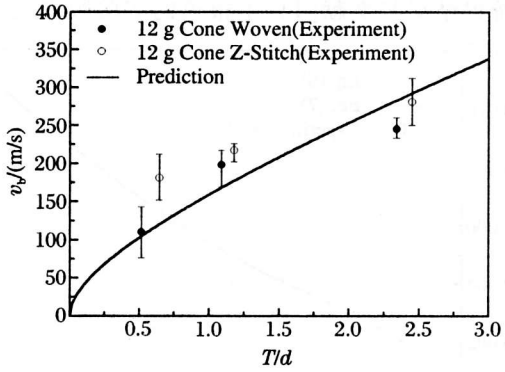
$$P = \frac{m}{A_0 B}[v_1 - A/B \cdot \ln(1 + B/A \cdot v_1)] \tag{26}$$

又由方程(23)可得残余速度满足

$$v_r = v_s - A/B \cdot \ln[(1 + B/A \cdot v_s)/(1 + B/A \cdot v_r)] - A_0 BT/m \tag{27}$$



(a) $m=6$ g



(b) $m=12$ g

图 6 GRP(E-Glass/Polyester)层合板在 7.6 mm 直径锥头弹撞击下的弹道极限速度的预测曲线与实验数据[8,12]的比较

Fig. 6 Comparison of the theoretical predictions with the experimental data[8,12] for the perforation of GRP(E-Glass/Polyester) laminates struck transversely by 7.6 mm diameter cone-nosed missiles

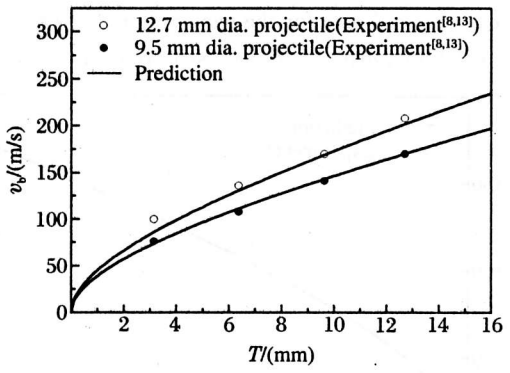


图 7 KFRP(Kevlar 29/Polyester)层合板在 12.7 mm 及 9.5 mm 直径锥头弹撞击下的弹道极限速度的预测曲线与实验数据的比较

Fig. 7 Comparison of the theoretical predictions with the experimental data for the perforation of KFRP (Kevlar 29/Polyester) laminates struck transversely by 12.7 mm and 9.5 mm diameter cone-nosed missiles

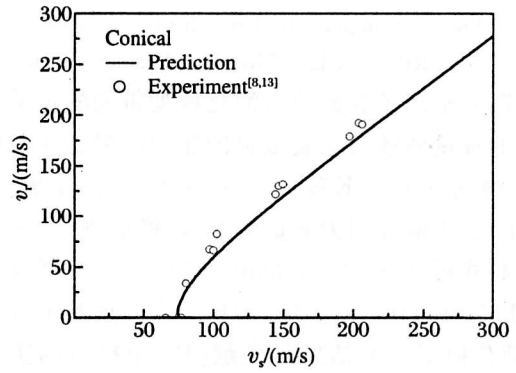


图 8 KFRP(Kevlar 29/Polyester)层合板在 12.7 mm 直径锥头弹撞击下残余速度的预测曲线与实验数据的比较

Fig. 8 Comparison of the theoretical predictions with the experimental data for the perforation of KFRP (Kevlar 29/Polyester) laminates struck transversely by 12.7 mm diameter cone-nosed missiles

令 $v_s=0$,可得弹道极限速度满足

$$v_b = A/B \cdot \ln(1+B/A \cdot v_b) + A_0 BT/m \quad (28)$$

作为锥形弹的一种特例,本节对平头弹丸的侵彻和穿透结果进行了讨论,当射弹的锥顶角 $\theta=180°$ 时,锥头弹变为平头弹,此时,$\beta=4+1.5\sin(\pi/2)=5.5$。

图 9 给出了由简化模型得到的弹道极限速度与实验数据的比较。实验用靶板材料 GRP(E-Glass/Polyester) 层合板,弹丸直径为 $d=18.7$ mm,质量 $m=10.5$ g,靶板密度 $\rho_t=1\ 650$ kg/m^3,$\sigma_c=225$ MPa[8,11]。简化模型所得结果与文献[11]中报道的实验数据比较吻合。

图 10 给出的仍为贯穿 GRP(E-Glass/Polyester) 层合板所需弹道极限速度与实验数据的比较。

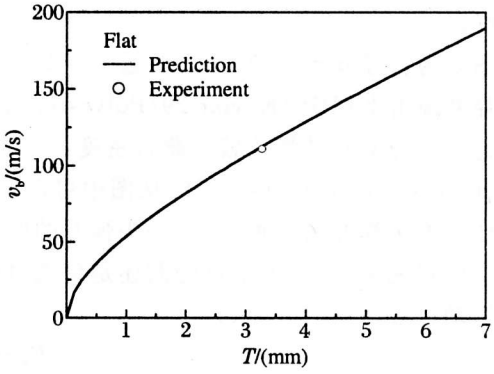
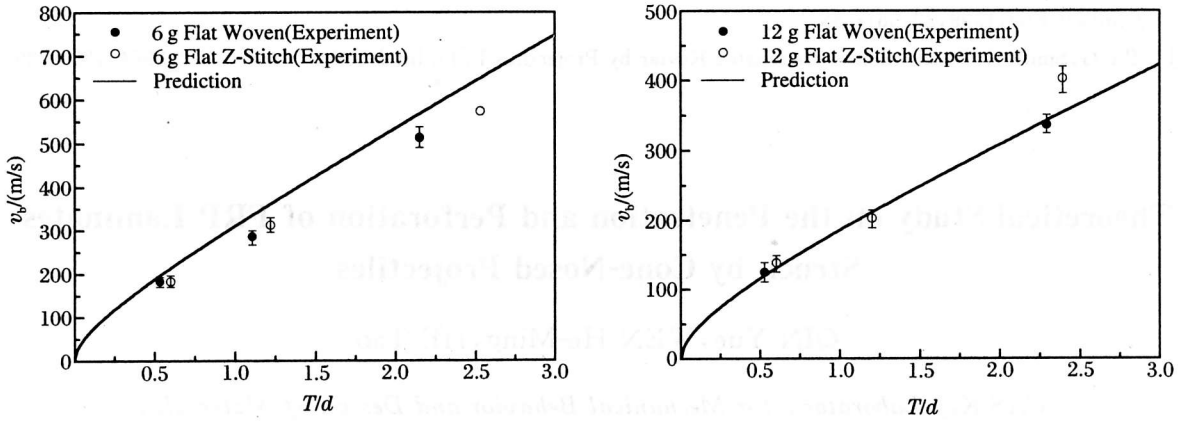


图 9 GRP(E-Glass/Polyester)层合板在 20.4 g、10.5 mm 直径平头弹撞击下的弹道极限速度的预测曲线与实验数据的比较

Fig. 9 Comparison of the theoretical predictions with the experimental data for the perforation of GRP (E-Glass/Polyester) laminates struck transversely by a 17.9 g, 10.5 mm diameter flat-faced missile

直径 $d=7.6$ mm,质量分别为 6 g 和 12 g,靶板密度 $\rho_t=1650$ kg/m^3,$\sigma_c=225$ MPa[8,12]。简化模型所得结果与文献[12]中报道的实验数据吻合得很好。



(a) $m=6$ g　　(b) $m=12$ g

图 10　GRP(E-Glass/Polyester)层合板在 7.6 mm 直径平头弹撞击下的弹道极限速度的预测曲线与实验数据[8,12]的比较

Fig. 10　Comparison of the theoretical predictions with the experimental data[8,12] for the perforation of GRP (E-Glass/Polyester) laminates struck transversely by 7.6 mm diameter flat-faced missiles

4　结　论

本工作研究了在锥形弹头弹丸撞击下,FRP 层合板的侵彻和穿透问题。在局部变形假设的基础上,进一步假定在侵彻过程中,侵彻阻力不再是一个常数,而是侵彻速度的函数,从而进一步发展了 Wen 基于 FRP 层合板侵彻力分析的简化模型,得到了在锥形弹丸撞击下 FRP 层合板的侵彻深度和弹道极限速度的计算公式。

模型预测与实验数据进行了比较,发现侵彻深度和弹道极限的理论预测值与实验数据吻合得很好。须指出的是,新模型相对于旧模型来说,最大的一个优点就是可以反映出弹丸侵彻和穿透 FRP 靶板过程中的时间历程。

References:

[1] Greaves L J. Failure Mechanisms in GFRP Amour [R]. UK DRA Report,1992.

[2] Greaves L J. Progress in Modeling the Perforation of GFRP by Ballistic Projectiles [R]. UK DRA Report,1994.

[3] Zhu G,Smith W G. Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles-I [J]. Int J Solids Struct,1992,29(4):399-420.

[4] Zhu G,Smith W G. Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles-II [J]. Int J Solids Struct,1992,29(4):421-436.

[5] Taylor J W,Vinson J R. Modelling Ballistic Impact into Flexible Materials [J]. AIAA J,1990,28(12):2098-2103.

[6] Morye S S,Hine P J,Duckett R A,et al. Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites upon Ballistic Impact [J]. Compos Sci Technol,2000,60:2631-2642.

[7] Lee S W R,Sun C T. Dynamic Penetration of Graphite/Epoxy Laminates Impacted by a Blunt-Ended Projectile [J]. Compos Sci Technol,1993,49:369-380.

[8] Wen H M. Predicting the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Projectiles With Different Nose Shapes [J]. Compos Struct,2000,49:321-329.

[9] Wen H M. Penetration and Perforation of Thick FRP Laminates [J]. Compos Sci Technol,2001,61:1163-1172.

[10] Reid S R. Reddy T Y,Ho H M,et al. Dynamic Indentation of Thick Fibre-Reinforced Composites [A]//Rajapakse Y D S,Vinson J R. High Strain Rate Effects on Polymer,Metal and Ceramic Matrix Composites and Other Advanced Materials [C]. AD-Vol. 48,ASME,1995:71-79.

[11] Wen H M, Reddy T Y, Reid S R, et al. Indentation Penetration and Perforation of Composite Laminates and Sandwich Panels under Quasi-Static and Projectile Loading [J]. Key Eng Mater, 1998, (141-143): 501-552.

[12] Mines R A W, Roach A M, Jones N. High Velocity Perforation Behaviour of Polymer Composite Laminates [J]. Int J Impact Eng, 1999, 22: 561-588.

[13] Zhu G, Smith G. Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles-I [J]. Int J Solids Struct, 1992, 29(4): 399-420

Theoretical Study on the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck by Cone-Nosed Projectiles

QIN Yue, WEN He-Ming, HE Tao

(CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The penetration and perforation of FRP laminates struck transversely by cone-nosed projectiles has been theoretically investigated. Based upon the assumption that the deformation is localized, the mean pressure offered by the laminate targets to resist the projectiles can be decomposed into two parts: one part is a cohesive quasi-static resistive pressure due to the elastic-plastic deformation of the laminate materials and the other is a dynamic resistive pressure arising from velocity effects. Furthermore, Wen's model has been developed by assuming that the resistance of the FRP laminate is no longer a constant, but a function of penetration velocity. Equations are obtained for predicting the depth of penetration, the residual velocity and the ballistic limit in the case of perforation. It transpires that the theoretical predictions are in good correlation with available experimental data in terms of penetration depth, residual velocity and ballistic limit.

Key words: FRP laminates; penetration; perforation; ballistic velocity; conical-nosed projectile