第 19 卷　第 2 期　　爆　炸　与　冲　击　　Vol.19, No.2
1999 年 4 月　　EXPLOSION　AND　SHOCK　WAVES　　Apr., 1999

爆炸载荷作用下离散平板运动速度的工程计算*

贾光辉　张国伟　裴思行　董永香

（华北工学院　太原　030051）

摘要　选择轴对称结构作为研究对象，在合理的假设条件下，导出了离散平板运动速度的解析表达式。该式不仅可用于进行离散平板运动速度的工程计算，也可用于进行类似结构破片速度的工程估算。同时结合牛顿切应力公式，导出了整体平板的临界断裂厚度估算式。

关键词　爆炸　速度　动量　动能

中图法分类号　O313

1　引　言

爆炸载荷作用下整体平板运动速度的工程计算，通常采用格尼公式。格尼公式以动量守恒和能量守恒定律为基础，运动速度为显函数表达式，计算简单，计算结果也接近于实验和数值模拟结果，误差在 10％的范围内，符合工程计算要求[1]。

近年来，离散平板结构（及类似结构）被广泛用于各类战斗部上。如预制破片式定向战斗部，它具有较高的命中率以及理想的威力效果。此类战斗部设计中的关键环节就是根据目标特性确定破片的极限穿透速度，进而确定破片的初始运动速度。离散平板结构形成的破片初始运动速度计算，传统上也是采用格尼公式。但是它难以确定破片的速度分布规律，因而造成某些破片设计速度过高、某些破片设计速度过低的状况，难以进行威力的优化设计。

爆炸载荷作用下离散平板的运动，严格意义上应为三维问题。考虑到大多数实际问题采用轴对称结构，为简化分析，我们选择轴对称结构作为研究对象。在一定的假设条件下，导出离散平板运动速度的解析表达式，计算结果与实验结果符合较好。它可进行离散平板运动速度的工程计算，也可参照进行其它类似结构破片的运动速度估算。同时应用牛顿切应力公式，导出了整体平板的临界断裂厚度估算式，为类似结构的平板厚度选取提供了工程参考。

2　工程计算模型

如图 1 所示，整体平板结构的平板为一整体，而离散平板结构的平板为径向离散，形成圆板或环形平板，但装药结构完全相同，平板材料和厚度也相同。因此可以假设，装药起爆后，整体平板的动能和动量应与离散平板的动能和动量相等。

---

* 兵器工业总公司预研基金资助（课题代号 22B.3.4）。

贾光辉：男，1965 年 3 月生，硕士，讲师。

1998-05-21 收到原稿，1998-09-28 收到修改稿。

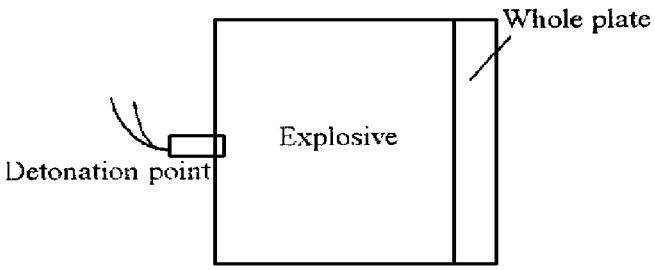

图 1(a) 整体平板装药结构

Fig.1(a) Explosive structure with whole plate

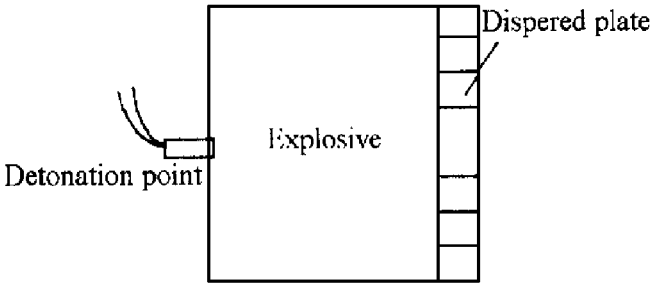

图 1(b) 离散平板装药结构

Fig.1(b) Explosive structure with dispersed plate

裸装药起爆后,整体平板的运动速度即格尼速度[1]

$$v_{\mathrm{E}}=\sqrt{2e}\left|\frac{1}{3}\left(\frac{4m}{m_{\mathrm{ex}}}+1\right)\left(\frac{m}{m_{\mathrm{ex}}}+1\right)\right|^{-1/2} \tag{1}$$

对于离散平板,不同位置处破片的运动速度一般不同。从装药结构爆炸驱动离散破片速度分布的实验结果及回收破片的变形分析,可以假设 $v(r)$ 遵从如下分布规律(这里 $v(r)$ 表示离散破片的速度,由于破片形状为环形或圆形,装药结构为轴对称结构,因此破片的合速度仅有轴向分量,后文中的向量方向与速度方向相同)

$$v(r)=v_0\cos(\omega r/R) \tag{2}$$

式中:R 为装药半径,v_0 为中心处破片速度,ω为变化系数,v_0、ω待求。

设平板的厚度为 h_{p},材料密度为 ρ,离散平板为 N 等分,则由整体结构与离散结构平板的动能和动量相等假设,有

$$\pi R^2 h_{\mathrm{p}}\rho v_{\mathrm{E}}^2=\sum_{j=1}^{N}\pi(R_{j+1}^2-R_j^2)h_{\mathrm{p}}\rho v_j^2 \tag{3}$$

$$\pi R^2 h_{\mathrm{p}}\rho v_{\mathrm{E}}=\sum_{j=1}^{N}\pi(R_{j+1}^2-R_j^2)h_{\mathrm{p}}\rho v_j \tag{4}$$

当 $N\to\infty$时,(3)~(4)式可写成积分形式

$$\pi R^2 h_{\mathrm{p}}\rho v_{\mathrm{E}}^2=\int_0^R 2\pi r\rho h_{\mathrm{p}}v^2(r)\mathrm{d}r \tag{5}$$

$$\pi R^2 h_{\mathrm{p}}\rho v_{\mathrm{E}}=\int_0^R 2\pi r\rho h_{\mathrm{p}}v(r)\mathrm{d}r \tag{6}$$

将(2)式代入(5)~(6)式,并积分

$$\frac{v_{\mathrm{E}}^2}{v_0^2}=\frac{1}{2}+\frac{\sin 2\omega}{2\omega}+\frac{\cos 2\omega}{4\omega^2}-\frac{1}{4\omega^2} \tag{7}$$

$$\frac{v_{\mathrm{E}}}{v_0}=\frac{2\sin\omega}{\omega}+\frac{2\cos\omega}{\omega^2}-\frac{2}{\omega^2} \tag{8}$$

由(7)~(8)式可解出

$$\begin{cases}\omega=0.766868\\ v_{\mathrm{E}}/v_0=0.857712\end{cases} \tag{9}$$

因此离散平板的速度分布

$$v(r)=1.16589v_{\mathrm{E}}\cos(0.766868r/R) \tag{10}$$

3　实验验证

K.Wemann[2] 对离散平板与整体平板进行了实验研究，用来验证数值模拟中使用到的材料模型参数，并得出了所用炸药的 JWL 状态方程的合理参数。实验采用 B 炸药，装药直径为 75mm，装药高度等于装药直径，壳体外径分别为 81、83、87mm。对该实验结果的数据分析见表 1。离散平板的破片动量总和与整体平板的动量最大相差 1.6%，动能最大相差 2.1%，在工程应用中可以认为相等。由此可见，我们的假设具有实验基础。

表 1　离散平板与整体平板实验结果分析

Table 1　Study on experimental results of dispersed plates and whole plate

破片序号	破片质量/g	φ81 结构			φ83 结构			φ87 结构		
		速度/(m/s)	动量/(kg·m/s)	动能/kJ	速度/(m/s)	动量/(kg·m/s)	动能/kJ	速度/(m/s)	动量/(kg·m/s)	动能/kJ
1	7.0	2156	15.1	16.3	2207	15.4	17.0	2221	15.5	17.3
2	20.9	2127	44.5	47.3	2146	44.9	48.1	2195	45.9	50.3
3	34.8	2034	70.8	72.0	2072	72.1	74.7	2130	74.1	78.9
4	48.8	1875	91.5	85.8	1930	94.2	90.9	2008	98.0	98.4
5	62.5	1629	101.8	82.9	1700	106.3	90.3	1807	112.9	102.0
离散平板合计			323.6	304.2		332.8	321.1		346.5	347.0
整体平板	174.0	1890	328.9	310.8	1935	336.7	325.7	2011	349.9	351.8
相对差异/(%)			−1.6	−2.1		−1.1	−1.4		−1.0	−1.4

表 2　计算结果与实验结果比较

Table 2　Calculating results comparing with experimental results

破片序号	内半径/mm	外半径/mm	φ81 结构			φ83 结构			φ87 结构		
			实验速度/(m/s)	计算速度/(m/s)	相对误差/(%)	实验速度/(m/s)	计算速度/(m/s)	相对误差/(%)	实验速度/(m/s)	计算速度/(m/s)	相对误差/(%)
1	0	7.5	2156	2177	0.97	2207	2253	2.08	2221	2325	5.58
2	7.5	15.0	2127	2126	−0.05	2146	2200	2.52	2195	2270	3.42
3	15.0	22.5	2034	2025	−0.44	2072	2096	1.16	2130	2163	1.55
4	22.5	30.0	1875	1876	0.01	1930	1942	0.62	2008	2003	−0.25
5	30.0	37.5	1629	1683	3.32	1700	1743	2.53	1807	1898	5.03

下面采用本文模型对离散平板进行计算。对 B 炸药，其格尼能$\sqrt{e}=2682\text{m/s}$[3]，金属质量 $m=174\text{g}$，炸药质量 $m_{ex}=531\text{g}$，则由(1)式可算得裸装药时整体平板的运动速度 $v_E=1537.3\text{m/s}$。考虑到壳体壁厚(用 t_s 表示)效应，参考实验结果对裸装药结构的格尼速度 v_E 进行修正

$$v_{Es}=v_E[1+7.2820(t_s/D)-43.269(t_s/D)^2] \tag{11}$$

可得三种壳体外径 81、83、87mm 对应的格尼速度 v_{Es} 分别为 1878、1944、2006m/s。

整体平板与离散平板厚度为 5mm，环形破片的内外径、由(10)式算得的环形破片速度及计算结果与实验结果的比较，见表 2。由表 2 可见，计算结果与实验结果较为符合。破片速度计算值对试验值的相对误差随壳体壁厚的增加而增加，这是由于壳体壁厚的增加对离散破片

速度的分布形式存在一定的影响。

4 讨 论

(1)本文模型可用于计算爆炸载荷作用下离散平板的运动速度,也可用于估算一般破片的运动速度,只要给出破片的径向坐标,即可由(10)式算出破片初速。

(2)本文模型还可用于计算整体平板结构在爆炸载荷作用下平板的临界断裂厚度。

牛顿切应力公式

$$\tau = \xi \mathrm{d}v/\mathrm{d}r \tag{12}$$

式中:τ 为粘性切应力,ξ 为平板材料真实粘性系数,可通过实验给出[4]。将(10)式代入

$$\tau = 0.894085\xi \frac{v_E}{R}\sin(0.766868\frac{r}{R}) \tag{13}$$

设炸药厚度为 h_{ex},对于平板厚度为 h_p 的裸装药结构,将(1)式代入上式

$$\tau = \frac{0.894085\xi}{R}\sin(0.766868\frac{r}{R})\sqrt{2e}\left|\frac{1}{3}(\frac{4h_p}{h_{ex}}+1)(\frac{h_p}{h_{ex}}+1)\right|^{-1/2} \tag{14}$$

当 $\tau=\tau_s$(τ_s 为平板材料的动态剪应力屈服强度)时,平板产生断裂,临界断裂发生在最大半径处。随着 h_p 的减小或 h_{ex} 的增大,断裂位置向内移动。临界断裂时,(14)式变为

$$\tau_s = \frac{0.894085\xi}{R}\sqrt{2e}\left|\frac{1}{3}(\frac{4h_p}{h_{ex}}+1)(\frac{h_p}{h_{ex}}+1)\right|^{-1/2} \tag{15}$$

由(15)式可以看出,装药半径 R 越大,则 h_p/h_{ex} 越小。可见平板的临界断裂厚度随装药半径 R 的增大而减小(装药高度不变时)。此式可作参考用于进行类似结构平板厚度工程设计。

参 考 文 献

1 (美)威廉普沃尔特斯,等.成形装药原理及应用.王树魁,等译.北京:兵器工业出版社,1992.33~50

2 Wemann K. Experimental and Numerical Investigation of Parameters Influencing the Formation of Projectiles by Explosive. In: Proceedings of llth International Symposium. Belgium: the International Ballistic Committee, 1989.159~166

3 魏惠之,等.弹丸设计理论.北京:国防工业出版社,1985.261~273

4 王明锐,等.球缺药形罩压跨的分析计算.见:中国兵工学会弹药学会,编.破甲文集(第 4 期).西安:203 所科刊编辑部,1984.32~40

ENGINEERING CALCULATION OF DISPERSED PLATES UNDER EXPLOSIVE LOADING

Jia Guanghui, Zhang Guowei, Pei Sixing, Dong Yongxiang

(*North China Institute of Technology*, *Taiyuan*, 030051)

ABSTRACT Under reasonable hypothesis, selected axis symmetry for studying structure, an obvious formula is set up. It can not only be used to calculate the velocity of dispersed plate in engineering, but also to estimate the velocity of fragment of similar structure, meanwhile, combined with Newton shear formular, a formula is set up which can be used to estimate limited cracked thickness.

KEY WORDS exploding, velocity, momentum, kinetic energy