

第5章脆值理论

一、冲击理论基础

二、包装件损坏模式及脆值

三、流通环境的振动特性

四、流通环境的压力特性

五、流通环境的气象条件

六、环境条件标准化

第1节 冲击理论基础

1. 冲量定理
2. 恢复系数
3. 速度增量
4. 水平冲击

1. 冲量定理

一般用于冲击过程的基本定理是动量定理的积分形式：

$$m\bar{u} - m\bar{v} = \int_0^{\tau} \bar{F} dt = \bar{S}$$

式中： \bar{v}, \bar{u} 分别为冲击开始和结束时的速度；

\bar{S} 为冲量； τ 为冲击作用时间； \bar{F} 为冲击力。

由于冲击过程中的一般外力远远小于冲击力，所以冲击过程中的一般外力（包括重力）可以不计。而平均冲力则可表示为：

$$F = \frac{1}{\tau} (mu - mv) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{W}{g} u - \frac{W}{g} v \right)$$

2. 恢复系数

(1) 冲击过程

变形阶段：冲击开始 $v \rightarrow 0$ ，动量 $\max \rightarrow 0$

物体变形从 $0 \rightarrow \max$ ，以 S_1 表示变形阶段的冲量：

$$0 - (-mv) = S_1$$

物体变形从 $\max \rightarrow 0$

恢复阶段：

速度 $0 \rightarrow u$ (回弹速度，物体反弹时脱离固定面瞬间的速度)

动量 $0 \rightarrow \max$

S_2 表示恢复阶段的冲量： $mu - 0 = S_2$


$$\frac{u}{v} = \frac{S_2}{S_1}$$

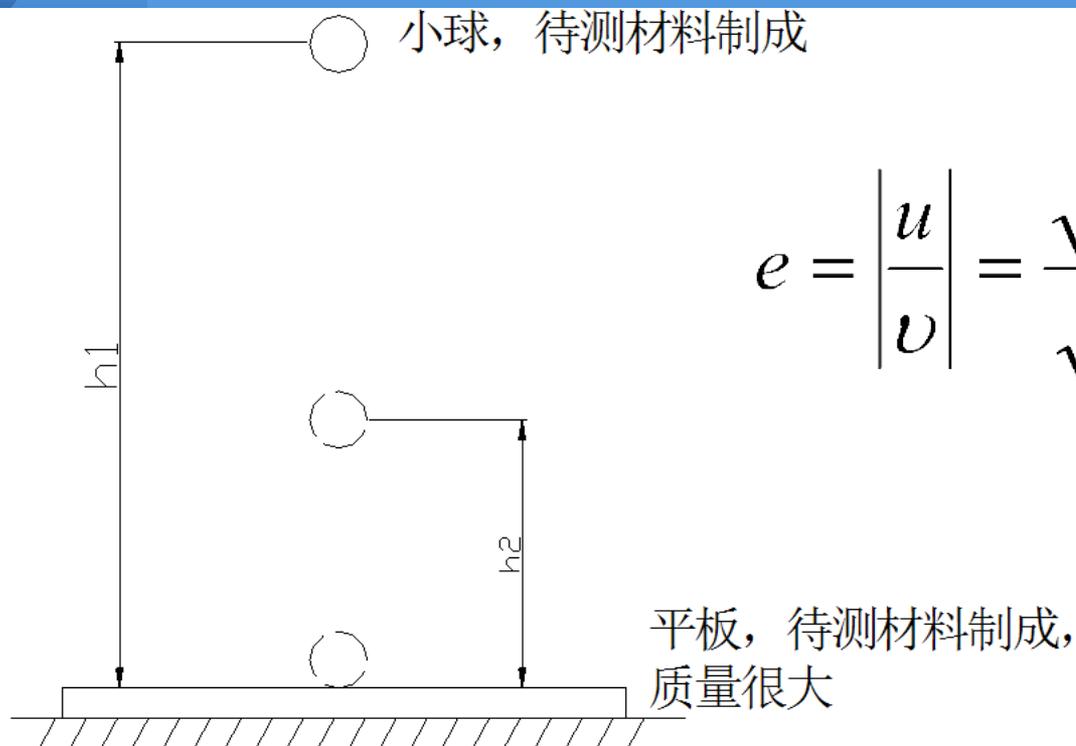
冲击过程有能量损失 (发热、发声、残余变形等)

$$\frac{u}{v} \leq 1 \quad e = \left| \frac{u}{v} \right|$$

e 为“恢复系数”，它表明冲击后速度恢复的程度，也表明了物体变形的程度。一般情况下 e 的取值范围为： $0.3 < e < 0.5$ 。

$$0 < e < 1$$

(2) 恢复系数的测定

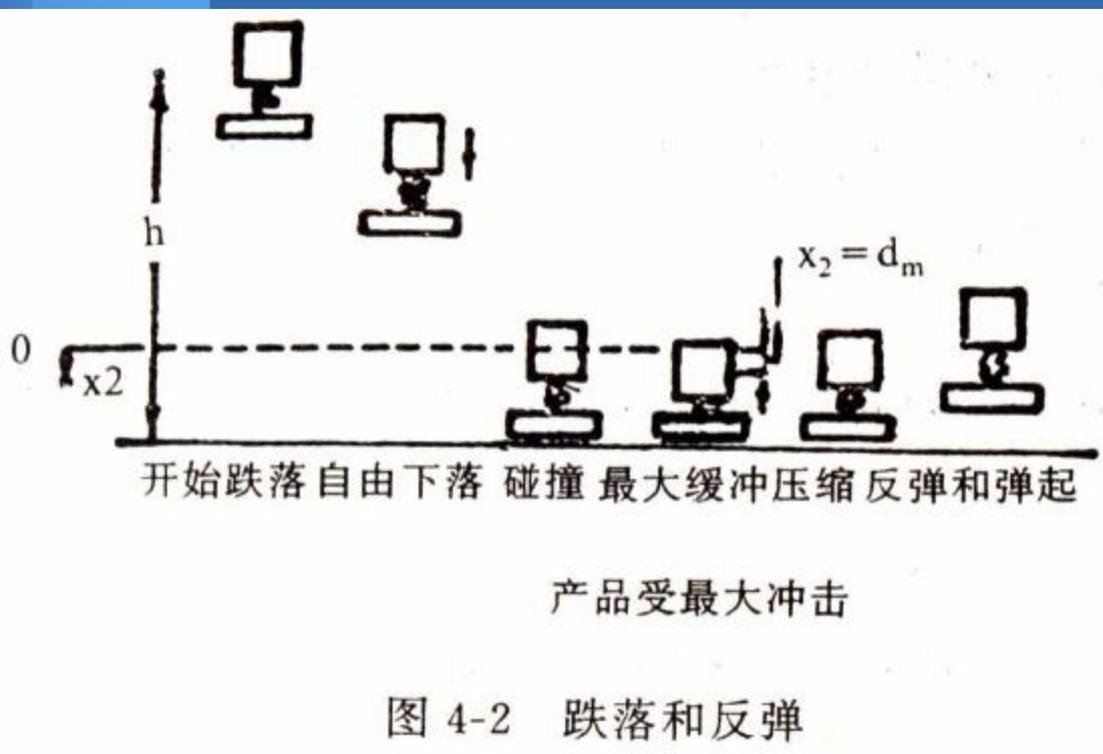


$$e = \left| \frac{u}{v} \right| = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

(3) 冲击的分类

- $0 < e < 1$ 时为弹性冲击。
- $e = 1$ 时称作完全弹性冲击。
- 非弹性冲击（塑性冲击），这种情况对应于 $e = 0$ 。

3. 速度增量——引起破损的三个相关因素之一



$$v = \sqrt{2gh}$$

$$u = e v$$

速度增量的定义：
冲击开始瞬时的速度（冲击速度 v ）
与冲击结束瞬时的速度（回弹速度 u ）
的绝对值之和，
即：

$$\Delta v = v + u$$

$$\Delta v = (1 + e)v = (1 + e)\sqrt{2gh}$$

$$0 < e < 1 \quad \sqrt{2gh} \leq \Delta v \leq 2\sqrt{2gh}$$

4. 水平冲击

水平冲击本质上和垂直冲击相同。如果水平冲击速度为 v_1 ，其效果与垂直冲击速度为 v_1 时相同，由

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad \text{可经从 } v_1 \text{ 算出 } h, \quad h = \frac{v_1^2}{2g}$$

也就是说，以水平速度 v_1 进行的水平冲击，等效于从跌高 h 进行的自由跌落垂直冲击。由水平冲击速度 v_1

算出的跌高 $h = \frac{v_1^2}{2g}$ 称为等效跌高。

第2节 包装件损坏模式及脆值

一. 包装损坏模式

1. 对于内装物

- 冲击过载损坏
- 疲劳损坏
- 过度变形
- 表面磨损

不同企业对其不同产品不同的破损程度的定义：
即不合格类型——A、B、C、D（表5-1）

第2节 包装件损坏模式及脆值

一. 包装损坏模式

2. 对于包装

- 可能引起内装物损伤的包装任何变化
- 缓冲垫破裂，无法继续保持内装物安全
- 外包装破损，露出内装物
- 超过分销商对于在包装的要求与结构损伤限制

企业制定相应的检验项目和其不合格判据

第2节 包装件损坏模式及脆值

二. 产品脆值

1. 定义：产品经受振动和冲击时用以表示其强度的定量指标。

又称为产品的易损度。此值表示产品对外力的承受能力。

2. 表示方法：

• 用重力加速度的倍数G表示。G值愈大，表示产品对外力的承

受能力愈强，在设计防振包装时，选择刚度大些的材料，反之，则意味着产品对外力的承受能力愈差，设计时应慎重考虑。

$$G_c = \frac{a_c}{g}$$

a_c —— 产品破损前的临界加速度
 G_c —— 产品脆值（国内外一致认可的）

3. 破损定义：

丧失了合格品质量指标之一的就叫破损。

4. 破损的分类

- (1) 失效：又叫严重破损，指产品丧失使用功能且不可逆转。
- (2) 失灵：轻微破损，指产品功能虽已丧失，但可以恢复。
- (3) 商业性破损：指不影响产品使用功能而仅在外观上造成的破损，虽可使用，但也降低商品的价值。

5. 许用脆值

$$[G] = \frac{G_c}{n} \quad n > 1$$

6. 最大加速度

α 、 α_m 、 α_c 分别表示产品加速度，最大加速度和极限加速度。

$$G = \frac{a}{g} \quad G_m = \frac{a_m}{g}$$

$$[G] = \frac{[a_m]}{g} = \frac{G_c}{n} \quad G_c = \frac{a_c}{g}$$

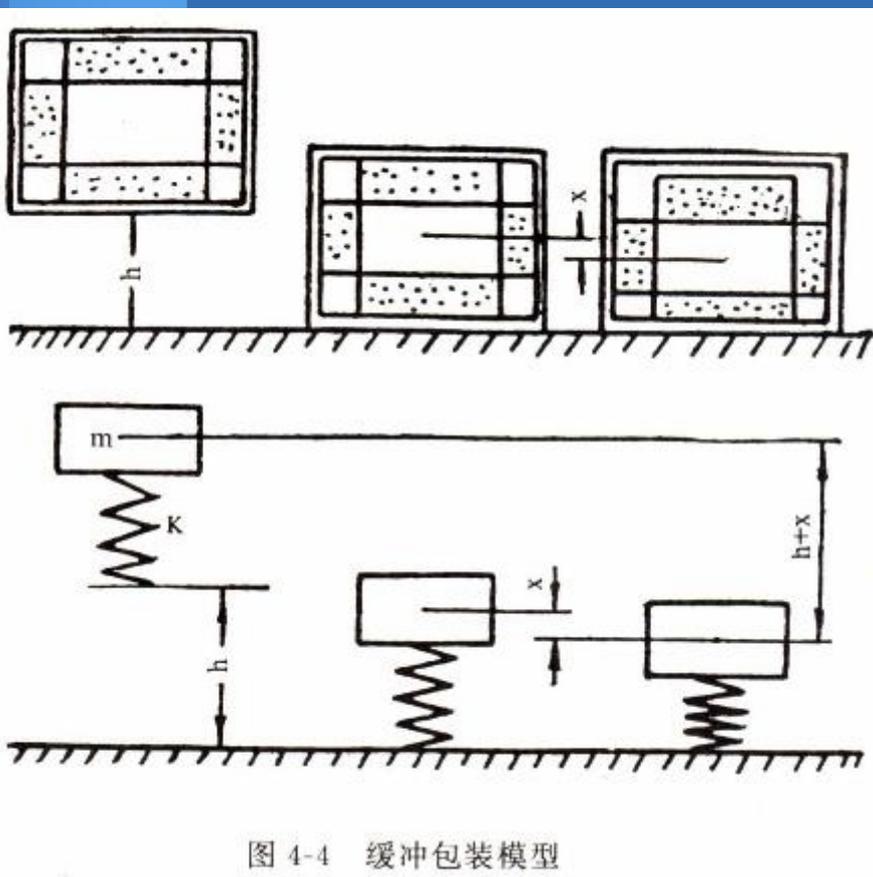
G_m 决定于冲击速度、缓冲材料、产品重量和跌落高度

$$G_m \leq [G] = \frac{G_c}{n}$$

G_c 决定于产品，产品一定 G_c 就一定

二. 传统脆值理论 (基于产品的破坏性跌落试验规定)

1. 冲击脆值



• 模型简化

• 能量守恒定理: 从 H 高跌落到弹簧受压发生最大变形 x_m , 产品具有的位能 mgH 转化为弹簧的变形能(略去产品在 x_m 上拥有的位能), 其大小等于产品克服弹簧反作用力所做的功, 即:

$$mg(H + x_m) = \int_0^{x_m} p(x) dx$$

$p(x)$ ——作用在产品上的弹簧反力
($H+x_m$) ——相对于最大压缩位置的跌落高度, 近似记作 H ;

$$P(x) = kx \quad mgH = \frac{1}{2} kx^2$$

$$P(x) = \frac{2mgH}{x}$$

由牛顿第二定律,

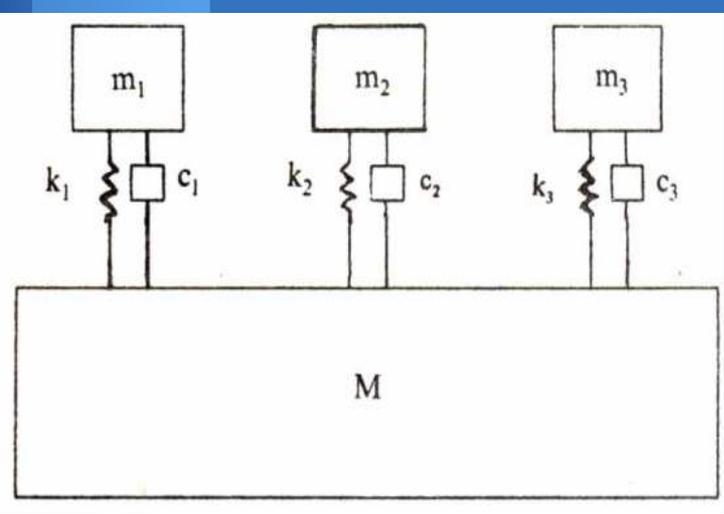
$$F = ma \quad P(x) = ma \quad a = \frac{P(x)}{m} = \frac{2H}{x} g$$

令 $G = \frac{2H}{x} \quad \alpha = Gg$ 显然 $2H \gg x$, 故 $G \gg 1$ $P = GW$

当P超过产品极限时, 产品发生损坏或者失效。G是**表征产品反抗破损能力的唯一因素**。

产品不发生破损的最大加速度值叫脆值 G_c 。它是由产品特征所确定的, 与外部环境因素无关。即, 对具体的产品, G_c 是常数。

2. 实际产品的包装模型



包装件: 由多个具有不同弹性和阻尼的零部件
每个零件的响应不同

→ 临界零件, 关键零件, 易损件

3. 脆值的确定：

- 冲击试验机（GB/T15099-1994）
- 跌落试验机（GB81710-1987）

4. 脆值的标准

各国的脆值标准不完全相同，原因：试验方法未规范，产品质量区别。

5. 传统脆值理论的缺点

最大加速度——评价破损情况

实际产品破损原因：冲击加速度的大小，冲击脉冲的形状，冲击脉冲持续时间，产品的共振频率——破损边界理论。

三. 破损边界理论

1. 冲击传递过程

1968年美国学者R. E. Newton提出了产品破损的边界条件论——破损边界理论。

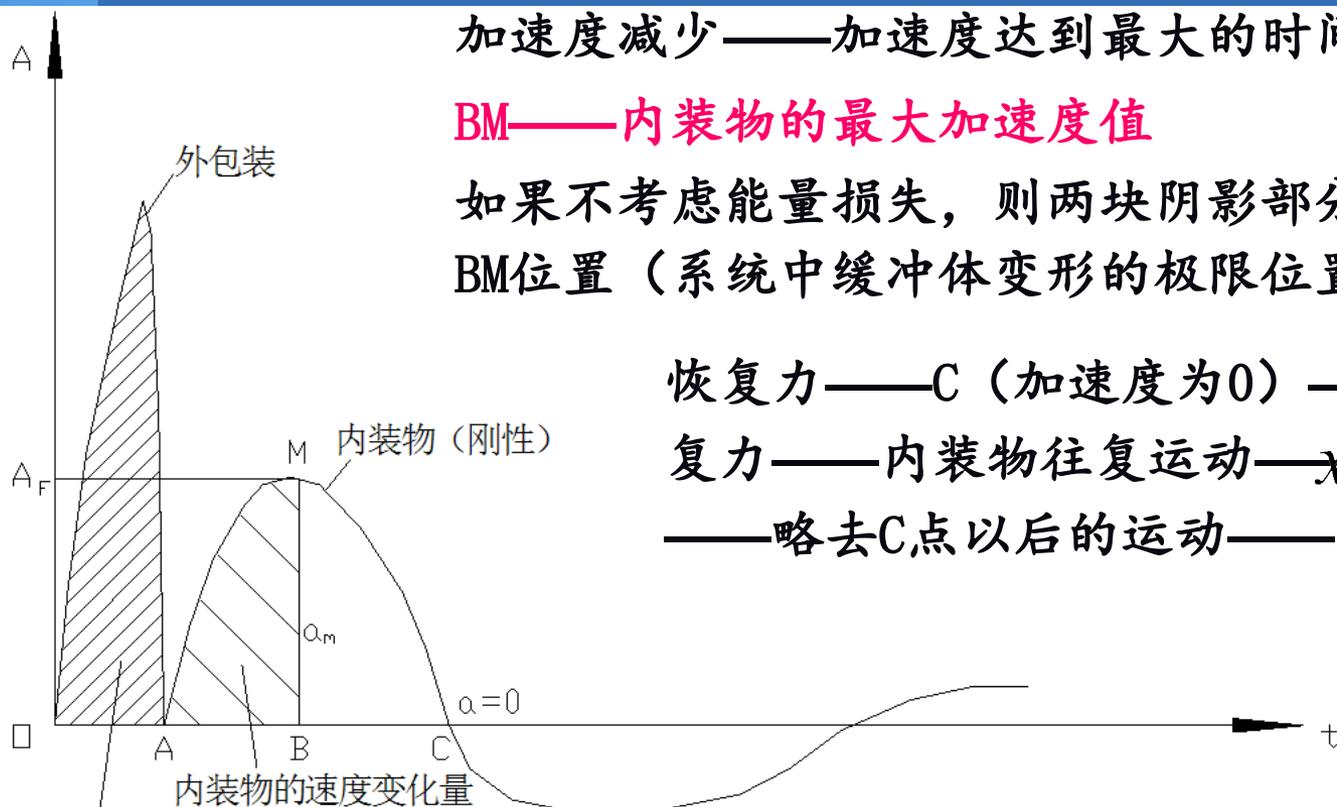
包装物跌落停止时，外包装箱由于突然减速——很大的加速度——介质（衬垫或填充物）——传递到内装物的加速度减少——加速度达到最大的时间延时

BM——内装物的最大加速度值

如果不考虑能量损失，则两块阴影部分的面积相等

BM位置（系统中缓冲体变形的极限位置）， a_m ——

恢复力——C（加速度为0）——惯性力和恢复力——内装物往复运动—— x, a 下降很多——略去C点以后的运动——单向加速度脉冲



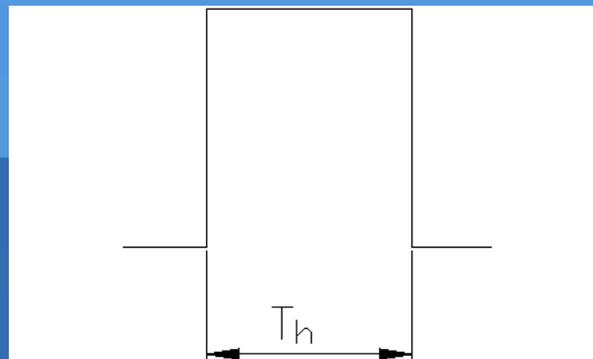
内装物的速度变化量

外包装箱接受脉冲时的速度变化量

2. 常用的脉冲形式

(1) 矩形波

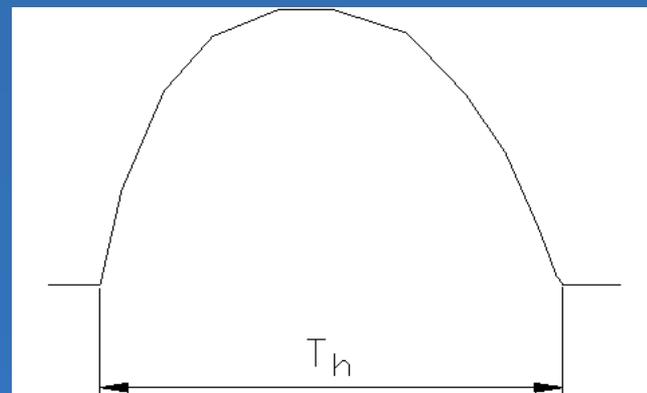
$$\begin{cases} i = i_m & (0 \leq t \leq T_h) \\ i = 0 & (t > T_h) \end{cases}$$



(2) 半正弦波

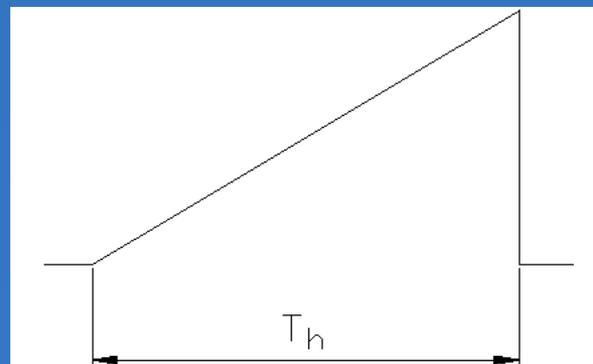
$$\begin{cases} i = i_m \sin \frac{2\pi t}{T_h} & (0 \leq t \leq T_h) \\ i = 0 & (t > T_h) \end{cases}$$

$$T_h = \frac{\pi}{p}$$



(3) 锯齿波

$$\begin{cases} i = i_m \frac{t}{T_h} & (0 \leq t \leq T_h) \\ i = 0 & (t > T_h) \end{cases}$$



3. 破损因素

包装设计中，用产品最大加速度响应来评价包装的破损情况， $\ddot{x}_m < [G]$ ——影响 \ddot{x}_m 因素

(1) 正弦脉冲作用下的响应

• $(0 \leq t \leq T_h)$

$$\ddot{x} = \begin{cases} \frac{F_0 \omega_n^2 / k}{1 - (p / \omega_n)^2} \left[\frac{p}{\omega_n} \sin \omega_n t - \left(\frac{p}{\omega_n}\right)^2 \sin pt \right] & (p \neq \omega_n) \\ \frac{F_0 \omega_n^2}{2k} (\sin \omega_n t + \omega_n t \cos \omega_n t) & (p = \omega_n) \end{cases}$$

• $(t > T_h)$

$$\ddot{x} = \begin{cases} \frac{F_0 p \omega_n / k}{1 - (p / \omega_n)^2} [\sin \omega_n t + \sin \omega_n (t - T_h)] & (p \neq \omega_n) \\ \frac{F_0 \omega_n^2}{k} (\pi \cos \omega_n t - \sin \omega_n t) & (p = \omega_n) \end{cases}$$

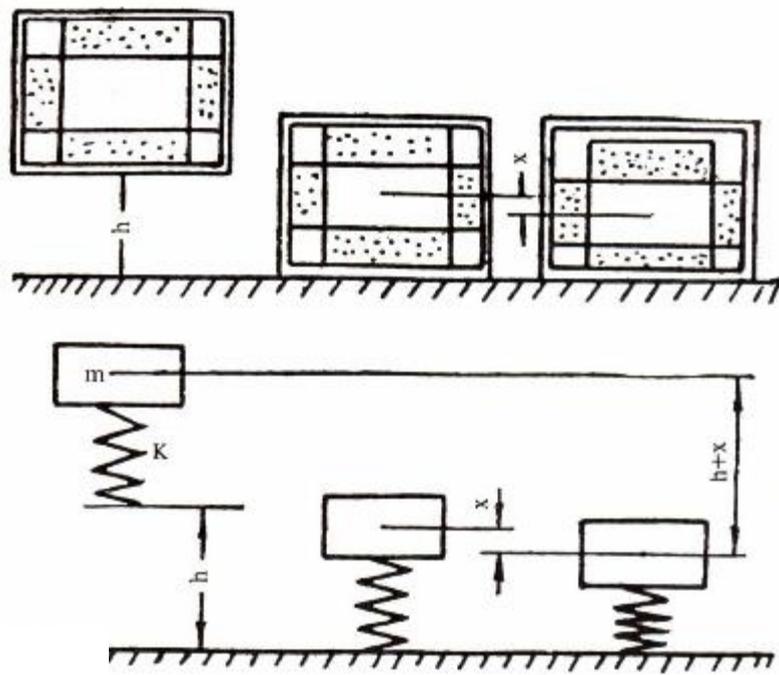


图 4-4 缓冲包装模型

(2) 矩形脉冲作用下的响应

$$\ddot{x} = \frac{F_0 \omega_n^2}{k} [\cos \omega_n (t + T_h) u(t + T_h) - \cos \omega_n (t - T_h) u(t - T_h)]$$

(3) 后峰锯齿脉冲作用下的响应

$$\ddot{x} = \begin{cases} \frac{F_0 \omega_n}{k T_k} \sin \omega_n t & (0 \leq t \leq T_k) \\ \frac{F_0 \omega_n^2}{k} \left\{ \frac{1}{T_k \omega_n} [\sin \omega_n t - \sin \omega_n (t - T_k)] - \cos \omega_n (t - T_k) \right\} & (t \geq T_k) \end{cases}$$

- 结论：1. 同一脉冲波形，不同的产品（频率不同），响应不同；
2. 同一产品，作用的脉冲波形不同，响应不同；

因此，影响产品最大加速度响应的参数为：

冲击脉冲的波形；脉冲持续时间；产品的固有频率；
冲击加速度峰值。

4. 冲击谱

$$A_m = \frac{x_{\max}}{x_{st}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \sin \frac{2n\pi}{\frac{\omega_1}{\omega_2} - 1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \sin \frac{2n\pi}{\frac{\omega_1}{\omega_2} + 1}$$

——冲击放大系数

$$f1/f2 = f_n / f_h$$

f_n 较小时 (k 较小, 弹簧较软) $f1/f2 = f_n / f_h < 1/6$ 时, 产品的最大响应小于最大冲击脉冲的幅值, 此时产品本身类似于一个减振器, 采用缓冲措施的必要性不是很大;

当 $f1/f2 = f_n / f_h > 1/6$ 时, 其加速度响应也随之增大, 直到超过环境脉冲的峰值。——包装设计中应该避免。

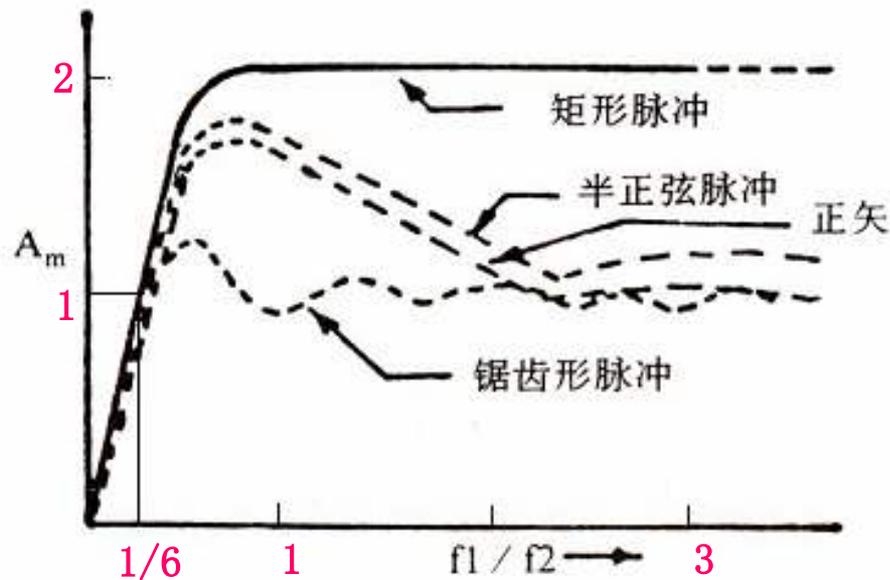


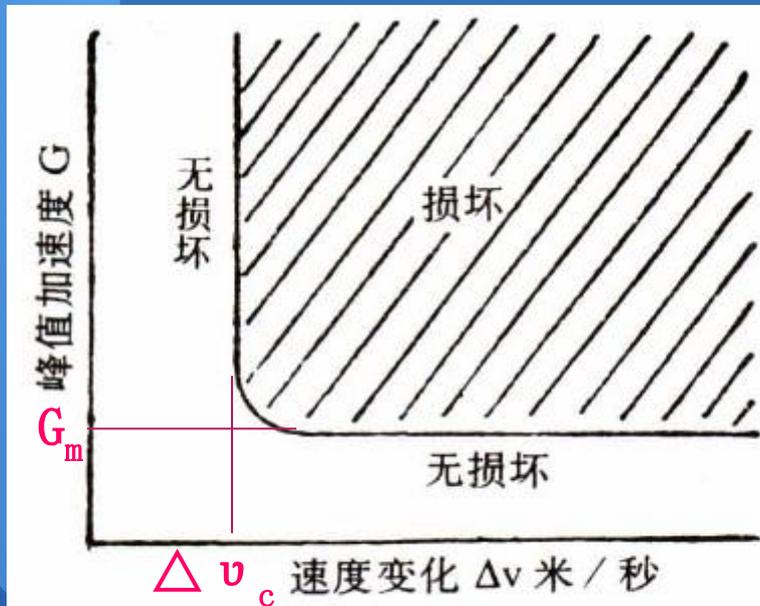
图 4-7 各种波形的最大冲击谱

5. 破损边界曲线

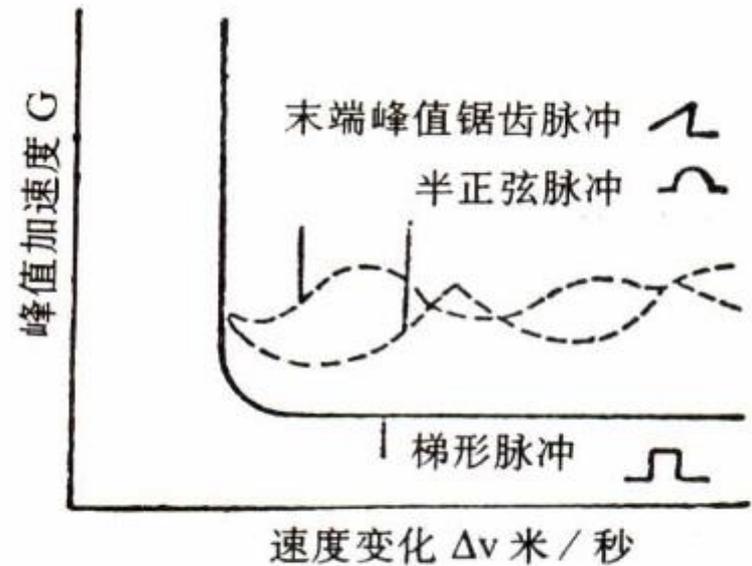
产品破损受许用的最大加速度和冲击脉冲持续的时间 T_h 影响，但 T_h 在实际中不易掌握，工程上用速度增量 Δv 来代替。

用最大加速度和脉冲过程的速度变化量的边界条件来反映产品破损规律的曲线称为**破损边界曲线（或破损极限曲线）**。

- 破损区： $|\Delta v| \geq |\Delta v_c|$ 和 $G_m \geq G_c$
- 非破损区： $|\Delta v| < |\Delta v_c|$ 或 $G_m < G_c$



(a)



(b)

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/407165002025010005>