DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0121-08

# 高速碰撞下圆柱壳自由梁的穿孔特性*

唐恩凌,施晓涵,王 猛,王 迪,相升海,夏 瑾,刘淑华,贺丽萍,韩雅菲
(沈阳理工大学装备工程学院,辽宁 沈阳 110159)

**摘要**: 利用二级轻气炮加载,进行了球状 2A12 铝弹丸垂直撞击圆柱壳自由梁实验。并进行了弹丸速度、圆柱壳直径和壁厚等因素对穿孔直径影响的数值模拟,数值模拟结果和实验结果基本吻合。通过量纲分析和数值模拟结合,推导了穿孔直径与相关影响参数的经验关系式。研究结果表明:当圆柱壳直径和厚度不变时,高速撞击产生的穿孔直径在径向和轴向都随着弹丸速度增大而增大;当弹丸速度和圆柱壳厚度不变时,高速撞击产生的穿孔直径随着圆柱壳自由梁直径的增大而减小;当弹丸速度和圆柱壳直径不变时,穿孔直径随着圆柱壳厚度的增大而减小。

**关键词**: 爆炸力学;穿孔直径;二级轻气炮;圆柱壳自由梁;ANSYS/LS-DYNA 软件;量纲分析
**中图分类号**: O385 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

E. H. Lee 等[1]首次利用理想刚塑性模型,对自由梁中点受三角形分布脉冲载荷作用下的动力响应进行了分析,得出初始输入能量在响应各阶段的分配。为模拟航天飞机的着陆过程,N. Jones 等[2]研究了均匀截面或阶梯截面自由梁受到三角形分布冲击载荷作用下的变形及失效,指出空中自由梁在载荷相同条件下比受约束的梁更难发生失效。J. L. Yang 等[3]进行了自由梁任意截面受冲击的实验和理论研究,用高速摄影测量自由梁任意截面受弹丸冲击的初始变形,试件材料为 2ALY12 铝,冲击速度为 20～200 m/s,并推导了自由梁求解真实加速度场的运动方程和一般离散表达式。

目前,对实心自由梁的研究成果多局限于弹速为 200～300 m/s 的低速碰撞,且重点集中在实心截面梁整体变形效应的动态力学响应研究方面[4],该问题在航空、航天工程中具有重要的应用背景[5-9]。而对于弹体以高速碰撞圆柱壳自由梁产生的局部破坏模式、穿孔效应等情况,研究报导甚少。

本文中,基于二级轻气炮加载弹丸高速碰撞圆柱壳自由梁实验,并利用 ANSYS/LS-DYNA 软件中拉格朗日法,对高速撞击圆柱壳自由梁过程进行数值模拟,通过实验和数值模拟结果的对比和量纲分析,得出弹丸高速碰撞圆柱壳自由梁产生的穿孔规律以及影响穿孔直径的主要因素。

## 1 实 验

### 1.1 实验参数

实验采用二级轻气炮加载弹丸,二级轻气炮一级驱动气体为氮气,充气压力为 2～40 MPa;二级驱动气体为氢气,充气压力为 0.1～1 MPa;最高发射速度可达 7 km/s。速度测量采用磁感应测速法,靶舱内压力小于 100 Pa。

实验时,调整好靶舱内薄壁圆柱壳的位置和高度,使铝弹丸垂直撞击圆柱壳长度方向的中点。实验布置如图 1 所示。

圆柱壳自由梁的材料为 304 无缝不锈钢管,壁厚均为 3 mm,圆柱壳的直径为 30～60 mm;弹丸为 2A12 球形铝合金,直径为 4.6 mm,质量为 0.14 g;实验 1～9 的碰撞速度分别为 2.10、2.06、2.10、2.06、1.80、2.30、2.58、2.71 和 3.30 km/s。

* **收稿日期**: 2014-06-09; **修回日期**: 2014-10-28
**基金项目**: "十二五"兵器预研支撑基金项目;辽宁省百千万人才工程项目(2012921044);
辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2013008)
**第一作者**: 唐恩凌(1971— ),男,博士,教授,tangenling@126.com。

### 1.2 实验分组

实验分为 2 组，考察穿孔直径的大小：(1)相近碰撞速度，分别碰撞 4 种不同直径(分别为 30、40、48 和 60 mm)的圆柱壳自由梁；(2)不同碰撞速度，分别碰撞直径为 60 mm 的圆柱壳自由梁。图 2 为 4 种不同直径圆柱壳自由梁试件。



图 1 实验布局

Fig. 1 Experimental layout



图 2 圆柱壳自由梁试件

Fig. 2 Cylindrical shell free beam samples

### 1.3 实验结果

弹丸高速碰撞圆柱壳自由梁过程中，产生的压缩波和反射稀疏波的共同作用，使弹丸和圆柱壳材料被部分抛出，从而在圆柱壳自由梁上形成穿孔。圆柱壳自由梁上均出现了近似椭圆形的穿孔，穿孔边缘整齐，无裂纹和撕裂现象。穿孔的轴向直径比径向直径稍大些，相差约 1 mm。穿孔形状大致为圆锥台，外壁孔径较大，内壁孔径较小，相差 3 mm 左右。弹丸未对圆柱壳造成完全贯穿，在远离撞击端的一侧出现一个很小的弹坑。图 3 分别给出了 4 种不同直径圆柱壳自由梁的穿孔效果。

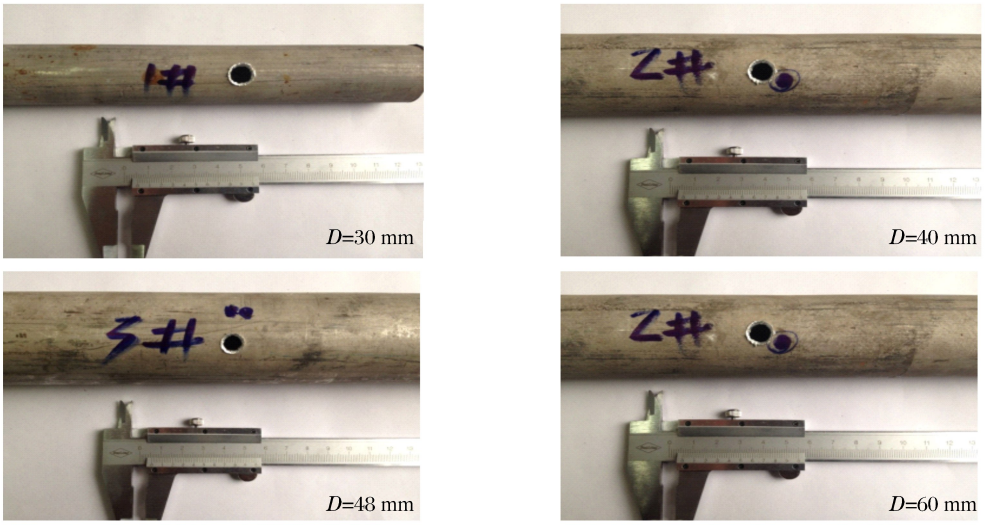


图 3 碰撞速度约 2 km/s 时不同直径圆柱壳自由梁的穿孔形貌

Fig. 3 Morphology of perforation for cylindrical shell free beams with different diameters when the collision velocity is about 2 km/s

## 2 数值模拟

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件，对高速碰撞圆柱壳自由梁进行数值模拟。弹丸和圆柱壳均采用黏塑性理论的 Johnson-Cook 材料本构模型和 Mie-Grüneison 状态方程。弹丸材料为 2A12 铝，圆柱壳材料为 304 钢，采用 Lagrange 法建模。Lagrange 法优势在于，变形后材料的自由表面能自动被网格边界

捕捉到，在网格中不存在材料的流动，纯拉格朗日法可很好地分析各种中等变形程度的问题，具有计算精度高、效率高，界面清晰等优势[6]。圆柱壳中间受撞击部分采用细化网格的方法，以 0.25 mm 为单位划分网格，能较好地模拟撞击点的穿孔情况；圆柱壳自由梁两端大部分未变形或小变形区网格进行粗化，以 2 mm 为单位划分网格。

### 2.1　材料模型和结果

高速撞击过程中，弹、靶接触区域发生剧烈的塑性变形和局部穿孔破坏。数值计算中，弹丸和自由圆柱壳均采用经典的基于黏塑性理论的 Johnson-Cook 材料模型，模拟材料的应变硬化、应变率硬化和热软化效应。流动屈服应力可表示为：

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)\ (1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)\ (1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中：$\sigma_y$ 为材料流动屈服强度，$A$、$B$、$n$、$C$、$m$ 为材料相关常数，$\varepsilon_p$ 为有效塑性应变，$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0$，表示为量纲一有效塑性应变率，取参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ s^{-1}$。$T^* = (T - T_r)/(T - T_m)$，其中 $T_r$ 和 $T_m$ 分别对应为室温和材料熔化温度。破坏应变定义如下：

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2\exp(D_3\sigma^*))(1 + D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)\ (1 + D_5 T^*) \tag{2}$$

式中：$\sigma^*$ 为压力与有效压力之比。当破坏参数 $D = \sum \Delta\varepsilon^p/\varepsilon_f = 1$ 时，就会发生破裂。

另外，高速撞击压力远超过材料的动态屈服强度，接触区域材料的塑性变形如流体流动，可采用 Mie-Grüneisen 状态方程描述材料静水压力与内能关系：

$$p - p_H = \Gamma\rho\,(E - E_H) \tag{3}$$

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu(1+\mu)}{(1-(s-1)\mu)^2} \tag{4}$$

$$E_H = \frac{p_H}{2\rho_0}\left(\frac{\mu}{1+\mu}\right) \tag{5}$$

Grüneisen 状态方程基于 Hugoniot 冲击曲线，可根据冲击波和波后粒子速度的简单线性关系描述材料的冲击特性，$u = c_0 + su_p$。假设 $\Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0$ 为材料常数，$\Gamma_0$ 为 Grüneisen 系数，$\rho$、$\rho_0$ 分别为材料当前和初始状态密度。设 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$，$c_0$ 为材料体积声速，$s$ 为材料参数，由冲击实验确定。

计算模型中，铝球弹丸和钢管的部分材料参数见表 1。数值模拟结果见表 2，表中，$D$ 为圆柱壳直径，$H$ 为壁厚，$v$ 为碰撞速度，$d_a$、$d_r$ 分别为轴向、径向穿孔直径。

**表 1　材料参数**

**Table 1　Material parameters**

| 材料 | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $G$/GPa | $A$/MPa | $B$/MPa | $n$ | $C$ | $m$ | $s$ | $c_0$/(km·s$^{-1}$) | $\gamma_0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2A12 铝 | 2 780 | 27.6 | 265 | 426 | 0.34 | 0.015 | 1.0 | 1.34 | 5.330 | 2.0 |
| 304 钢 | 7 830 | 77.0 | 332 | 245 | 0.36 | 0.022 | 1.0 | 1.92 | 3.570 | 1.67 |

**表 2　数值模拟结果**

**Table 2　Simulation results**

| No. | $D$/mm | $H$/mm | $v$/(km·s$^{-1}$) | $d_a$/mm | $d_r$/mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 3 | 2.2 | 6.5 | 6.0 |
| 3 | 30 | 3 | 3.2 | 9.4 | 8.4 |
| 4 | 40 | 3 | 2.2 | 6.4 | 6.0 |
| 5 | 40 | 3 | 3.2 | 8.5 | 8.4 |
| 6 | 40 | 2 | 2.7 | 7.7 | 7.3 |
| 7 | 48 | 3 | 2.2 | 6.3 | 5.8 |
| 9 | 48 | 3 | 3.2 | 8.5 | 8.0 |
| 10 | 60 | 3 | 2.2 | 6.0 | 5.8 |
| 12 | 60 | 3 | 3.2 | 8.1 | 7.5 |

### 2.2 结果对比

实验和数值模拟采用的均为内壁孔径。图 4 为典型工况下实验和数值模拟穿孔直径对比结果。表 3 给出了穿孔直径大小,可知实验结果比数值模拟结果高出量最大为 21.5%,最小 2.53%,平均高出量为 15.22%。因使用了单元侵蚀,数值模拟材料选取的是模拟软件材料库中铝和钢的标准性能参数,与实验所用 2A12 铝和 304 不锈钢的实际性能参数略有差别。因此实验结果和数值模拟结果也存在微小差别,由表 3 可看出两者有差异是合理的。如图 5 所示,数值模拟和实验结果拟合的曲线变化规律基本相同,因此可以利用数值模拟对圆柱壳自由梁高速撞击产生的穿孔规律进行分析和预测。

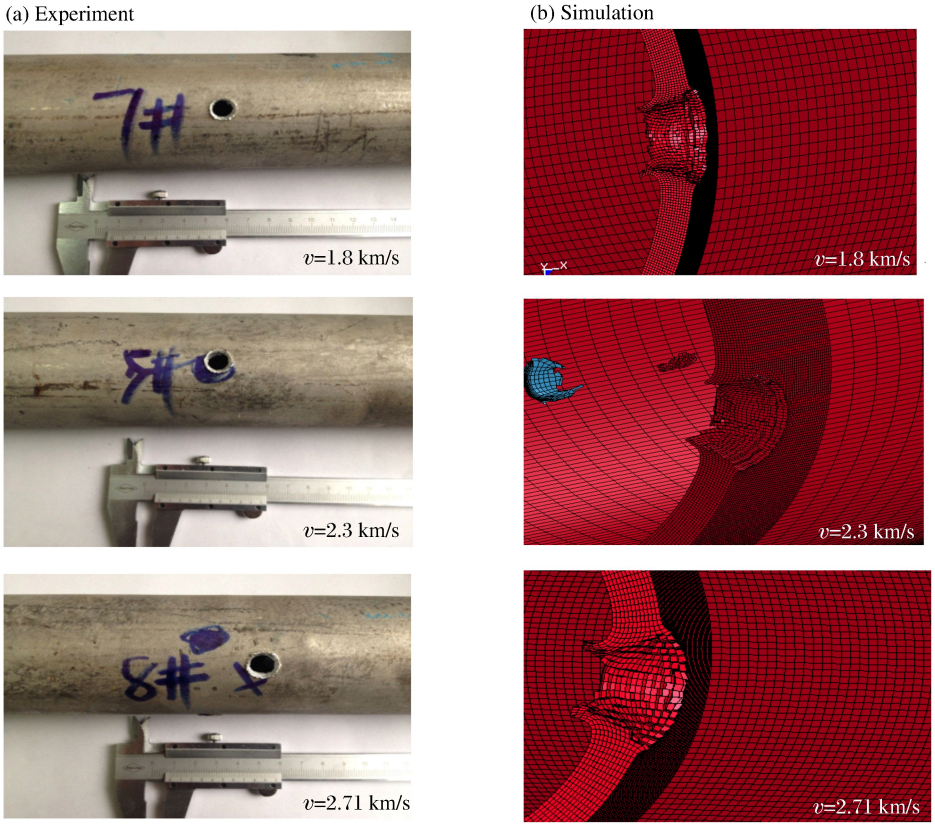


图 4 实验与数值模拟结果的比较

Fig. 4 Comparison of simulation and experimental results

**表 3 实验与数值模拟结果的比较**

**Table 3 Comparison of simulation and experiment results**

| $D$/mm | $v$/(km·s$^{-1}$) | $d_a$/mm | | $d_r$/mm | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 实验 | 模拟 | 实验 | 模拟 |
| 30 | 2.10 | 7.9 | 6.2 | 7.4 | 6.0 |
| 40 | 2.06 | 7.5 | 6.1 | 7.4 | 5.9 |
| 48 | 2.10 | 7.3 | 6.1 | 6.7 | 5.9 |
| 60 | 2.06 | 7.2 | 6.0 | 6.5 | 5.8 |
| 60 | 1.80 | 7.2 | 6.0 | 6.5 | 5.0 |
| 60 | 2.30 | 7.2 | 6.2 | 7.0 | 5.9 |
| 60 | 2.58 | 8.4 | 6.8 | 7.5 | 6.5 |
| 60 | 2.71 | 8.4 | 7.0 | 7.8 | 6.5 |
| 60 | 3.30 | 8.9 | 8.6 | 7.9 | 7.7 |

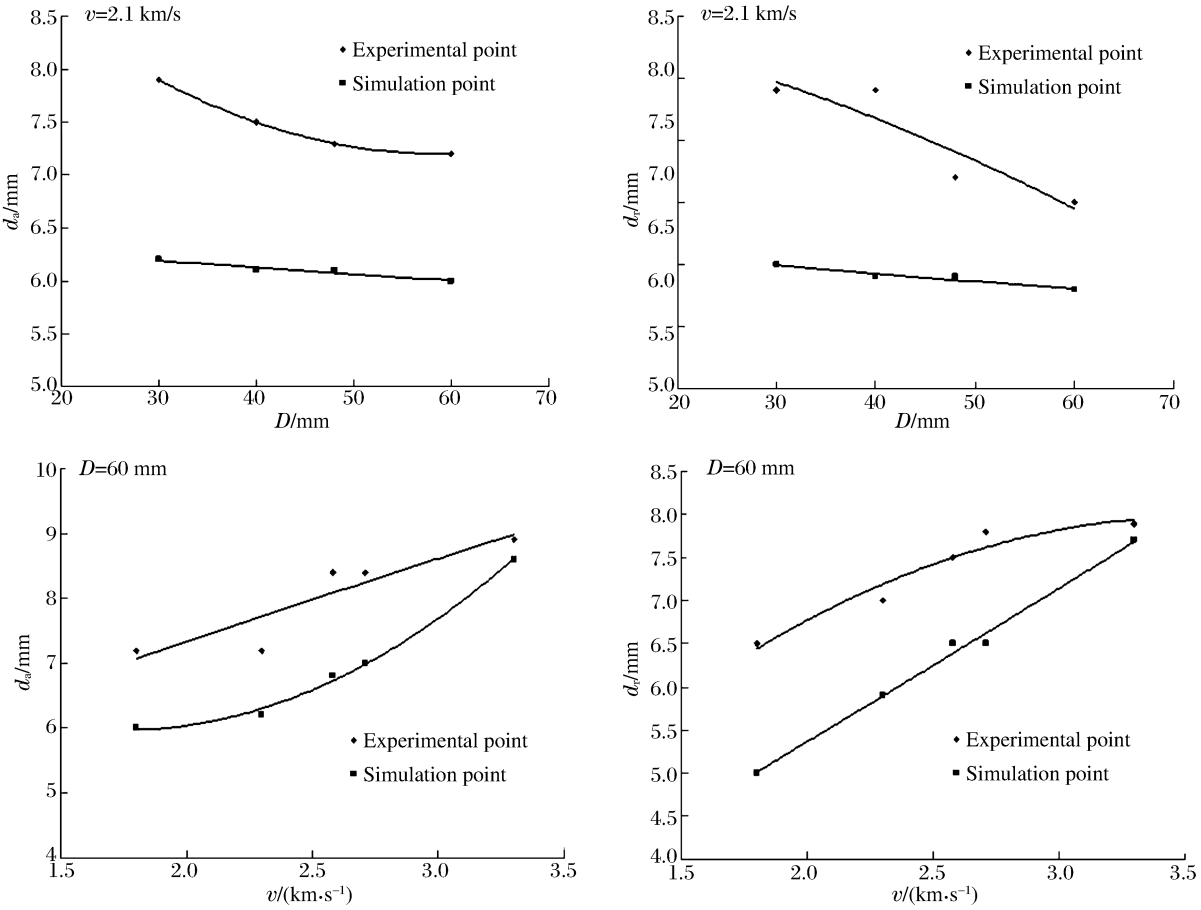


图 5　实验与数值模拟的穿孔直径

Fig. 5　Perforation diameters of experiment and simulation

## 2.3　穿孔直径的变化规律

图 6 为高速撞击圆柱壳自由梁产生的穿孔直径随碰撞速度变化的规律，当圆柱壳直径不变时，穿孔直径随碰撞速度的增大而增大，但穿孔直径增大的幅度随着碰撞速度增大而减小。

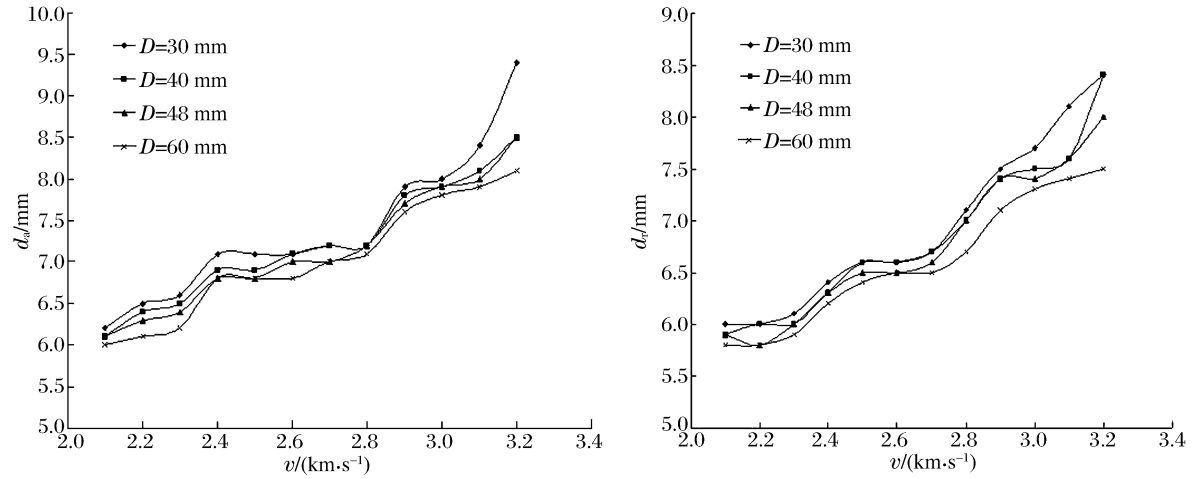


图 6　圆柱壳自由梁穿孔直径随碰撞速度的变化规律

Fig. 6　Perforation diameters of cylindrical shell free beam varying with impact velocity

图 7 为高速撞击圆柱壳自由梁产生的轴向穿孔直径随圆柱壳直径变化的规律，当碰撞速度和圆柱壳壁厚不变时，穿孔直径随圆柱壳直径的增大而减小，但减小幅度随圆柱壳自由梁直径的增大而减小。

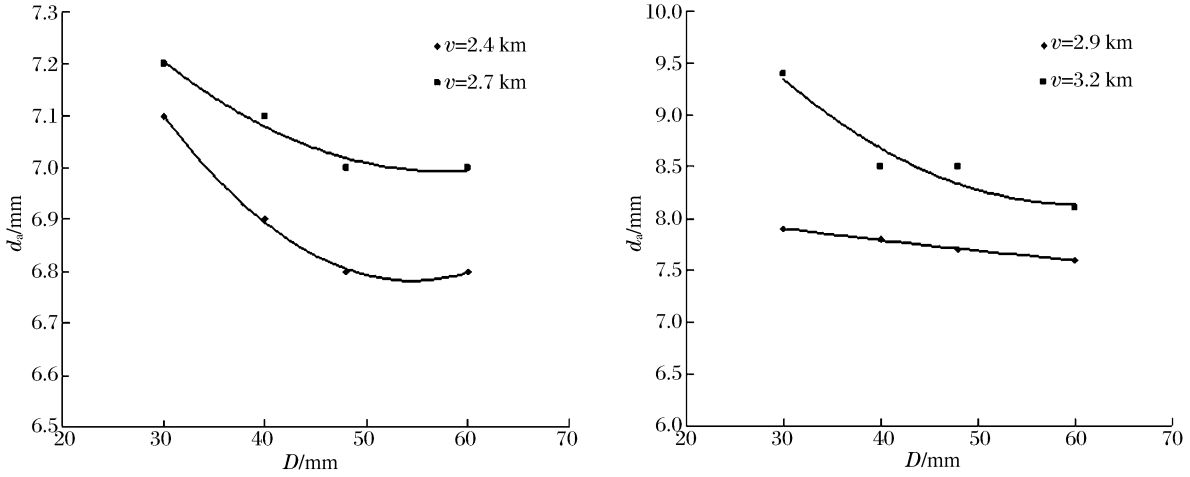


图 7 圆柱壳自由梁穿孔直径随圆柱壳直径的变化规律

Fig. 7 Perforation diameter of cylindrical shell free beam varying with cylindrical shell diameter

图 8 为高速撞击圆柱壳自由梁产生的轴向和径向穿孔直径随圆柱壳自由梁壁厚变化的规律，对于直径分别为 40 和 60 mm 的圆柱壳自由梁，当碰撞速度为 2.7 km/s 时，高速撞击圆柱壳自由梁产生的穿孔直径随圆柱壳自由梁壁厚的增加而减小，在圆柱壳壁厚大于 4.5 mm 后，圆柱壳将不再被穿透。

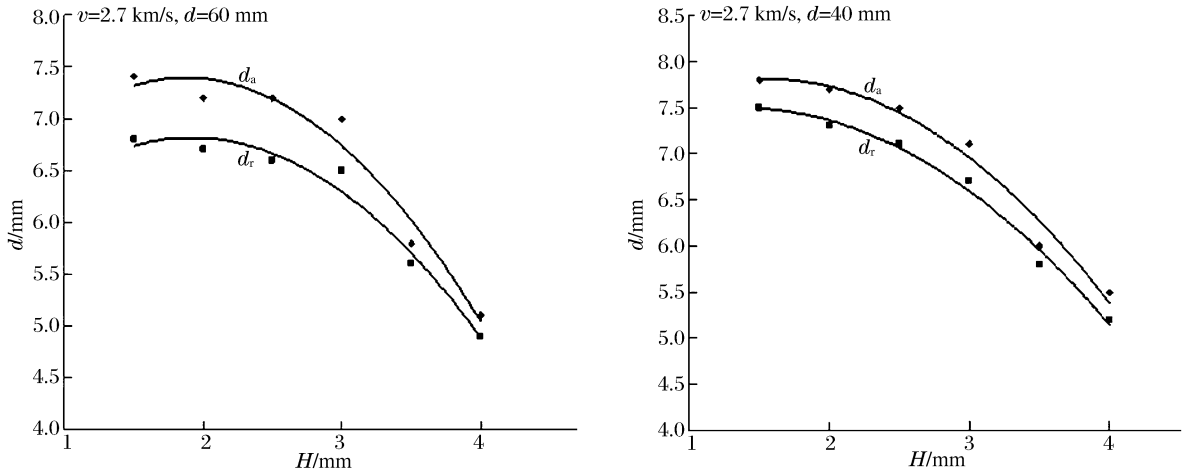


图 8 圆柱壳自由梁穿孔直径随圆柱壳厚度的变化规律

Fig. 8 Perforation diameter of cylindrical shell free beam varying with thickness of cylindrical shell thickness

## 3 经验关系式

为确定穿孔直径与圆柱壳自由梁的几何、物理参数及碰撞速度之间的关系，考察弹丸高速撞击圆柱壳自由梁的情况。穿孔直径可表示为：

$$d = f(d_\mathrm{p}, \rho_\mathrm{p}, E_\mathrm{p}, \sigma_\mathrm{yp}, \mu_\mathrm{p}, \varepsilon_\mathrm{fp}, l_\mathrm{t}, D, D_\mathrm{i}, \rho_\mathrm{t}, E_\mathrm{t}, \sigma_\mathrm{yt}, \mu_\mathrm{t}, \varepsilon_\mathrm{ft}, v) \tag{6}$$

式中：$d_\mathrm{p}$ 为弹丸直径，$\rho_\mathrm{p}$ 为弹丸密度，$E_\mathrm{p}$ 为弹丸的杨氏模量，$\sigma_\mathrm{yp}$ 为弹丸材料的屈服极限，$\mu_\mathrm{p}$ 为弹丸材料的泊松比，$\varepsilon_\mathrm{fp}$ 为弹丸材料的屈服应变；$D$ 为圆柱壳自由梁的外径，$D_\mathrm{i}$ 为圆柱壳自由梁的内径，$l_\mathrm{t}$ 为圆柱壳自由梁的长度，$\rho_\mathrm{t}$ 为圆柱壳自由梁的材料密度，$E_\mathrm{t}$ 为圆柱壳自由梁材料的弹性模量，$\sigma_\mathrm{yt}$ 为圆柱壳自由梁材料的屈服极限，$\mu_\mathrm{t}$ 为圆柱壳自由梁材料的泊松比，$\varepsilon_\mathrm{ft}$ 为圆柱壳自由梁材料的屈服应变。

根据量纲分析，从所列的 16 个参数中(其中包括穿孔直径 $d$)可以组成 12 个彼此独立的量纲一量。

取其中 $\rho_p$、$\sigma_{yp}$ 和 $d_p$ 作为基本量，可得到量纲一函数关系：

$$\frac{d}{d_p}=f\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{yp}/\rho_p}},\frac{E_p}{\sigma_{yp}},\frac{l_t}{d_p},\frac{D}{d_p},\frac{D_i}{d_p},\frac{\rho_t}{\rho_p},\frac{\sigma_{yt}}{\sigma_{yp}},\frac{E_t}{\sigma_{yp}},\frac{\delta_t}{d_p},\mu_p,\varepsilon_{fp},\mu_t,\varepsilon_{ft}\right) \tag{7}$$

如果模型实验采用与原型相同种类的弹丸和圆柱壳自由梁材料，圆柱壳自由梁的长度和厚度以及弹丸的直径都不变。那么，上式可简化为：

$$\frac{d}{d_p}=f\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{yp}/\rho_p}},\frac{D}{d_p},\frac{D_i}{d_p}\right) \tag{8}$$

将这个隐式方程式写成显示方程式[7]，则：

$$\frac{d}{d_p}=x_0\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{yp}/\rho_p}}\right)^{x_1}\left(\frac{D}{d_p}\right)^{x_2}\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^{x_3} \tag{9}$$

式中：$x_i(i=0,1,2,3)$均是待定系数。

利用最小二乘法，对数值模拟数据进行曲线拟合，确定公式中的待定系数，可得到轴向和径向穿孔直径的经验关系式：

$$\frac{d_a}{d_p}=2.522\,9\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{yp}/\rho_p}}\right)^{0.674\,1}\left(\frac{D}{d_p}\right)^{-1.430\,9}\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^{1.507\,9} \tag{10}$$

$$\frac{d_r}{d_p}=2.545\,4\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{yp}/\rho_p}}\right)^{0.807\,6}\left(\frac{D}{d_p}\right)^{-1.807\,9}\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^{1.838\,5} \tag{11}$$

通过对经验关系式计算得到的穿孔直径与数值模拟得到的穿孔直径的比较，表明计算结果和数值模拟结果吻合得很好。

## 4　结　论

通过高速撞击圆柱壳自由梁的穿孔实验和数值模拟，并利用数值模拟和实验结果的拟合曲线，可以得出以下结论。

(1)高速撞击圆柱壳自由梁产生的穿孔直径在径向和轴向都随碰撞速度增大而增大，二者近似成线性关系，但穿孔直径增大的幅度随着碰撞速度的增大而减小。对于直径分别为 40、48 和 60 mm 的圆柱壳自由梁：当撞击速度为 2～2.5 km/s 时，撞击速度对撞击产生的穿孔直径影响较大；当碰撞速度超过 2.5 km/s 后，弹丸撞击速度对穿孔直径的影响不再明显，穿孔直径随碰撞速度的增加逐渐接近定值。

(2)当弹丸碰撞速度和圆柱壳壁厚不变时，撞击产生的穿孔直径随圆柱壳自由梁直径增大而减小，但减小的幅度随圆柱壳直径的增大而减小。当圆柱壳直径为 30～40 mm 时，圆柱壳直径对穿孔直径影响较大，当圆柱壳直径大于 40 mm 时，圆柱壳直径对穿孔直径的影响将不再明显，穿孔直径随圆柱壳自由梁直径的增加将接近定值。

(3)圆柱壳自由梁的厚度对高速撞击产生的穿孔直径有很大的影响，当碰撞速度为 2.7 km/s 时，高速撞击圆柱壳自由梁产生的穿孔直径随圆柱壳自由梁壁厚的增加而减小，在圆柱壳壁厚大于4.5 mm 后，圆柱壳不会被穿透。

## 参考文献：


[1] Lee E H, Symonds P S, Providence R I. Large plastic deformations of beams under transverse impact[J]. Journal of Applied Mechanics, 1952,19(3):308-314.

[2] Jones N, Wierzbicki T. Dynamic plastic failure of a free-free beam[J]. International Journal Impact Engineering, 1987,6(3):225-240.

[3] Yang J L, Xi F. Experiment and theoretical study of free-free beam subjected to impact at any cross-section along its span[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(7):761-781.

[4] Yu T X, Yang J L, Reid S R. Dynamic behaviour of elastic-plastic free-free beams subjected to impulsive loading [J]. International Journal of Solids Structures, 1996,33(18):2659-2680.

[5] 穆建春,张铁光.刚塑性自由梁中部在横向冲击下的初始变形模式[J].爆炸与冲击,2000,20(1):7-12.
Mu Jianchun, Zhang Tieguang. Initial deformation modes of rigid-plastic free-free beams under transversal impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(1):7-12.

[6] 穆建春,乔志宏,张依芬,等.自由梁中部在平头子弹横向正冲击下的穿透及变形[J].爆炸与冲击,2000,20(3):200-207.
Mu Jianchun, Qiao Zhihong, Zhang Yifen, et al. Perforation and deformation of free-free beam by transverse impact of flat nosed missile at the middle of its span[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(3):200-207.

[7] 席丰,杨嘉陵,郑晓宁,等.自由梁受集中质量横向撞击的刚-塑性动力响应[J].爆炸与冲击,1998,18(1):55-62.
Xi Feng, Yang Jialing, Zheng Xiaoning, et al. Dynamic response of a rigid, perfectly plastic free-free beam subjected to impulsive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(1):55-62.

[8] 尚晓江,苏建宇,王化锋. ANSYS LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 2 版.北京:中国水利水电出版社,2008:140.

[9] 周劲松,甄良,杨德庄.几种金属材料在 2.6～7 km/s 弹丸撞击下的损伤行为[J].宇航学报,2000,21(2):75-81.
Zhou Jinsong, Zhen Liang, Yang Dezhuang. Damage behaviors of several metal materials under impacts of projectiles with hypervelocities of 2.6－7 km/s[J]. Journal of Astronautics, 2000,21(2):75-81.

## Perforation characteristics of cylindrical shell free beam under high-speed impact

Tang Enling, Shi Xiaohan, Wang Meng, Wang Di, Xiang Shenghai,
Xia Jin, Liu Shuhua, He Liping, Han Yafei
(*School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang* 110159, *Liaoning*, *China*)

**Abstract**: In order to study the perforation characteristics generated by a spherical 2A12 aluminum projectile impacting cylindrical shell steel free beams at high-speed, the experiments of a spherical projectile loaded by a two-stage light gas gun impacting cylindrical shell free beams were performed. Simulations were carried out to study different factors such as projectile speed, cylindrical shell diameter and thickness that influence the perforation diameter. Our simulation and experimental results are basically consistent. An empirical correlation of perforation diameter and related parameters was deduced combining dimension analysis and simulation. The results show that the radial and axial perforation diameters increase with the increase of the impact velocity when the thickness and diameter of the cylindrical shell remains unchanged; the radial and axial perforation diameter decreases with the increase of the diameter of the cylindrical shell when the projectile velocity and thickness are remain unchanged; the radial and axial perforation diameters decrease with the increase of the cylindrical shell thickness when the projectile velocity and cylindrical shell diameter remain unchanged.

**Key words**: mechanics of explosion; perforation diameter; two-stage light gas gun; cylindrical shell free beam; ANSYS/LS-DYNA software; dimension analysis

(责任编辑 丁 峰)