文章编号：1000-5773(2010)01-0061-06

内部短药柱爆炸作用下钢筒破裂特征的数值分析*

王新征[1,3]，张松林[1,2]，邹广平[3]

(1. 西北核技术研究所，陕西西安 710024；
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
3. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院，黑龙江哈尔滨 150001)

摘要：采用光滑粒子(SPH)法研究了短药柱在钢筒内爆炸形成破片的特征，采用 Grady 层裂准则描述钢筒的层裂破坏，破坏模式为随机破坏，服从 Mott 分布。分析了破片的质量分布和速度，计算结果表明：钢筒经过一定膨胀后，首先在装药端部位置破裂，然后爆心附近的钢筒解体成破片，如果是封闭钢筒，钢筒端部也是形成破片的重要部位。爆心附近的破片质量小、速度高；端部的破片质量较大、速度低；爆心附近的破片相对集中。

关键词：钢筒；光滑粒子法；爆炸；破片；数值模拟
中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

有关钢筒内爆炸形成破片的研究开始于第二次世界大战，主要用于炸弹、手榴弹等爆炸形成破片的杀伤力评估，研究集中在内部冲击作用下钢筒的破裂机制等方面，Gurney[1] 提出了用于预测内部爆轰加载下金属破片速度的经验公式；Mott 和 Grady 等人[2-7] 比较系统地研究了破坏机制和破片质量的统计分布等；Martineau、Wilson、Garg 等人[8-12] 进一步进行了理论分析和实验设计，测量了破片初始速度和破片质量分布，其破片质量分布与 Mott 分布相近。在国内，陈大年、胡八一、李永池等人[13-18] 通过理论分析、数值计算和实验，对爆炸加载下金属柱壳的膨胀和破裂规律进行了大量研究，并取得了丰富成果。这些研究多是均匀装药，在有些工程应用中需要考虑钢筒在内部短药柱爆炸情况下的极限承载能力，分析此时钢筒的破裂特征具有重要意义。另外基于网格算法的数值计算来分析钢筒的破裂规律，在模拟破裂过程时一般是通过删除失效单元后形成破片，而失效单元被删除后，破片特征失真比较严重，用 SPH 算法模拟材料断裂损伤可以改进因删除单元而造成的破片形状失真。

2 确定数值模拟材料参数

数值模拟研究采用动力有限元软件 AUTODYN6.1，炸药和钢筒用 SPH 粒子表示。钢筒材料采用 Grüneisen 状态方程，本构方程用 Johnson-Cook 模型；模拟层裂采用 Grady 模型，材料断裂位置用 Mott 随机函数描述。

2.1 冲击状态方程

钢筒采用 Grüneisen 状态方程描述

* **收稿日期**：2009-05-10；**修回日期**：2009-09-20
基金项目：教育部博士点基金(20092304110003)
作者简介：王新征(1979—)，男，硕士研究生，工程师，主要从事爆炸冲击与结构防护研究. E-mail：wxzhmalan@163.com

$$p - p_{\mathrm{H}} = \frac{\Gamma}{V}(E - E_{\mathrm{H}}) \tag{1}$$

E_{H} 和 p_{H} 为 Hugoniot 曲线上的点的内能和压力，Γ 为 Grüneisen 系数。冲击波速度和粒子速度的关系用一次式表示

$$D = c_1 + S_1 u \tag{2}$$

式中：D 为冲击波速度，u 为粒子速度，c_1 为材料声速，S_1 为常数。

2.2 钢筒材料本构

材料本构方程用 Johnson-Cook 模型

$$\sigma = (A_1 + A_2\varepsilon^{m_1})(1 + A_3 \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m_2}) \tag{3}$$

式中：σ 为材料的等效抗拉强度；ε 为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为总塑性应变率，是无量纲参数，一般参考值为 $\dot{\varepsilon}_0 = 1$；$T^* = (T - T_{\mathrm{room}})/(T_{\mathrm{melt}} - T_{\mathrm{room}})$，其中 T_{melt} 和 T_{room} 分别表示材料的熔点和参考温度。A_1、A_2、A_3、m_1 和 m_2 为与材料有关的实验参数。

2.3 材料层裂准则[3]

模拟材料的层裂采用 Grady 准则

$$p_{\mathrm{s}} = \sqrt{2\rho c_1^2 A_1 \varepsilon_{\mathrm{c}}} \tag{4}$$

式中：ρ 为材料密度；ε_{c} 为临界孔洞因子，取 0.15。

2.4 材料随机失效准则[7]

在载荷和几何模型对称的情况下模拟材料破裂，需要描述由材料微观缺陷导致的非均匀性，这些缺陷点是初始裂纹的发展点。在 AUTODYN 中，材料的非均匀性用 Mott 分布模拟材料的失效应力或应变的不同来表示，这里计算采用应变失效模式。

Mott[2] 假设单位长度没有断裂的试样在应变从 ε 变为 $\varepsilon + \mathrm{d}\varepsilon$ 的过程中断裂的概率为 $C\mathrm{e}^{\gamma s}\,\mathrm{d}s$，$C$ 和 γ 为常数，与试样的横截面积和加载的应变率有关。对于应变增量 $\mathrm{d}\varepsilon$，ε 增加过程中断裂发生的概率呈指数递增。在应变为 ε 时，试件未断裂的概率为 $(1-P)$，因此，当应变从 ε 变为 $\varepsilon + \mathrm{d}\varepsilon$ 时，试件将要断裂的概率为

$$\mathrm{d}P = (1 - P)C\mathrm{e}^{\gamma s}\,\mathrm{d}s \tag{5}$$

求解(5)式得

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{C}{\gamma}\mathrm{e}^{\gamma s}\right) \tag{6}$$

Mott 认为断裂应变在一个平均值 ε_{f} 附近变化

$$\varepsilon_{\mathrm{f}} = \int_0^{\infty} \varepsilon \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\varepsilon}\mathrm{d}\varepsilon = \frac{1}{\gamma}\left(\ln\frac{\gamma}{C} + \varepsilon_{\mathrm{a}}\right) \tag{7}$$

式中：$\varepsilon_{\mathrm{a}} = \int_{-\infty}^{\infty} x\mathrm{e}^{x}\exp(-\mathrm{e}^{-x})\,\mathrm{d}x = 0.577$。数值计算中 γ 取 16。钢筒材料参数见表 1(表 1 中 τ 表示剪切强度，$\varepsilon_{\mathrm{critical}}$ 表示临界应变。

表 1 数值计算采用的钢筒材料参数

Table 1 Materials parameters of the steel cylinder used in the numerical simulation

ρ/(g/cm^3)	Γ	C_1/(m/s)	S_1	c_p/[J/(kg·K)]	τ/(GPa)	A_1/(GPa)	A_2/(GPa)
7.89	2.17	4 569	1.49	452	81.8	0.35	0.275
m_1	A_3	m_2	$\dot{\varepsilon}$/(s^{-1})	T_{melt}/(K)	T_{room}/(K)	$\varepsilon_{\mathrm{critical}}$	γ
0.36	0.022	1.0	1	1 811	298	0.21	16

2.5 炸药状态方程

炸药为 TNT，采用 JWL 状态方程描述，其压力形式表示为

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v_r}\right)e^{-R_1 v_r}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v_r}\right)e^{-R_2 v_r}+\frac{\omega e}{v_r} \tag{7}$$

式中:p 为压力,A、B 为直线系数,R_1、R_2 和 ω 为非直线系数,v_r 为相对比体积,e 为比内能。参数见表 2。

钢筒尺寸:内半径 22.7 mm,外半径 25.5 mm;柱型炸药 100 g,直径和高度相等。炸药中心点起爆,爆心与钢筒形心重合。计算模型分为开放状态和封闭状态,其中封闭状态是在钢筒两端加盖,数值计算模型为 1/8 模型。

表 2　数值计算采用的 TNT 炸药参数

Table 2　Materials parameters of TNT used in the numerical simulation

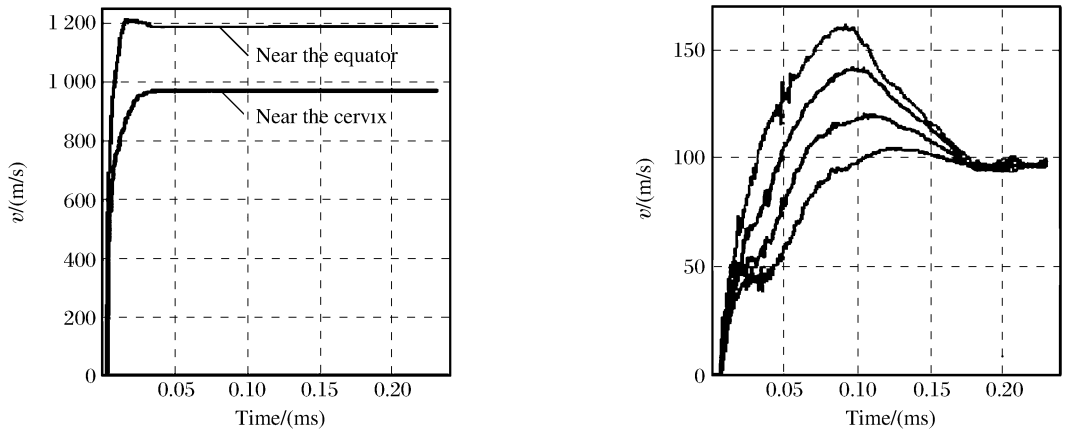
ρ/(g/cm^3)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	w	v_{CJ}/(km/s)	p_{CJ}/(kPa)	E_{CJ}/(GJ/m^3)
1.63	374	3.75	4.15	0.9	0.35	6.93	21	6

3　数值计算结果分析

结构的不同位置分别定义为:起爆点称为爆心,过炸药爆心与钢筒轴垂直的断面称赤道面,炸药端部附近的钢筒部位称为颈部,没有断裂的大体积钢筒称为抛体。

3.1　开放状态下钢筒的破裂特征

从爆轰产物的流场分布可以看出,钢筒首先在颈部开裂,但是该部位破片的速度低于赤道面附近破片的速度。赤道面破片的速度为 1 200 m/s 左右,颈部破片的速度为 1 000 m/s,抛体速度远远低于破片速度,其速度为 100 m/s 量级,见图 1。



(a) Velocity-time histories of fragments near the equator and cervix　(b) Velocity-time histories of the big mass

图 1　不同部位的速度

Fig. 1　Velocity of objects at different places

从抛体不同部位观察点的速度变化可以看出,抛体首先受到颈部传递的压缩波,离颈部越近,效果越强,压缩波过后抛体在 190 μs 后做刚体运动。

破片特征:赤道面附近破片分布比较均匀,破片一般呈四边形,长宽比相差不大;在颈部形成的破片的长、宽相差比较大,形成长条形破片;在抛体端部明显开裂,基本上对称开裂为 8 瓣,见图 2。

在钢筒破裂的过程中,初期形成的破片体积较大,随着向外扩张,大破片继续解体,生成数量比较多的小破片,见图 3 和表 3,最终状态小于 10 mg 的破片占大部分。

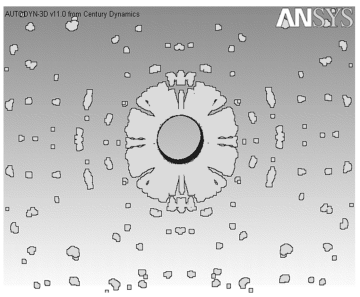


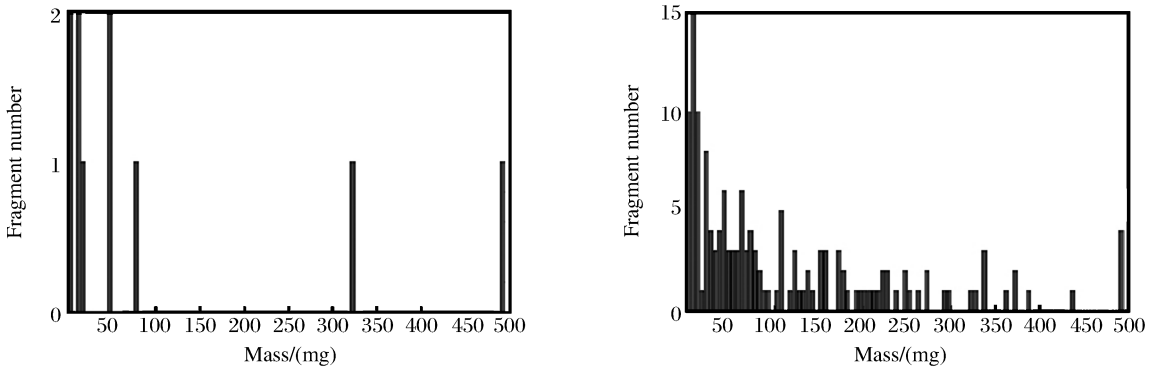
图 2　不同部位破片的特征

Fig. 2　Characteristics of fragments at different places

表 3 开放状态下形成的破片数量与时间的关系

Table 3 Fragment number-time relation under the exoteric condition

$t/(\mu s)$	Fragment number	$t/(\mu s)$	Fragment number	$t/(\mu s)$	Fragment number
33	13	105	153	230	160
71	143	185	160		



(a) Mass distribution of fragments at 33 μs (b) Mass distribution of fragments at 211 μs

图 3 开放状态下破片的质量分布

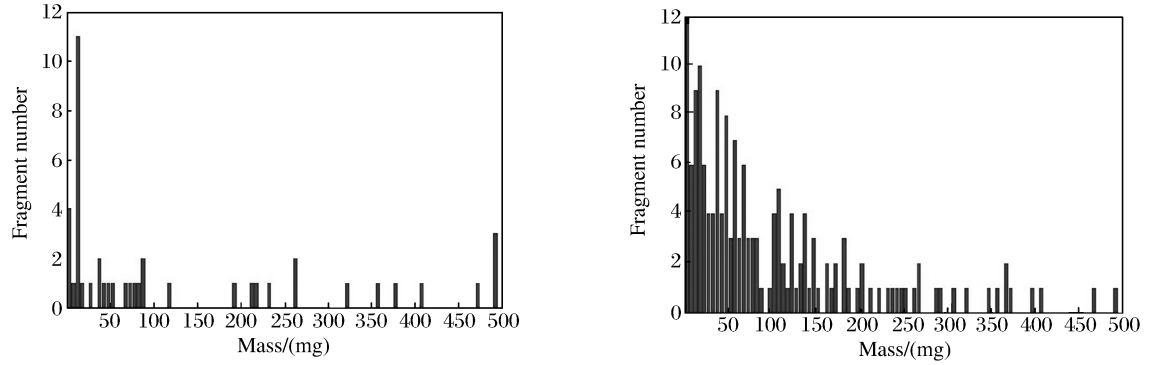
Fig. 3 Mass distribution of fragments in the open cylinder

3.2 封闭状态下钢筒的破裂特征

封闭状态的计算模型是在开放状态的钢筒端部加上盖,其它条件不变。这种情况下,炸药周围的钢筒破裂特征与开放状态相似,端部钢筒在后期也发生破裂。

赤道面附近破片的特征与开放状态下破片的特征基本相近,包括破片质量分布和破片速度,但是形成的破片数量比开放状态下形成的破片数量大,约为 180 个,说明封闭条件对钢筒破裂起到促进作用。钢筒端部是薄弱位置,也是破片形成的位置,稳定时破片的数量约 44 个,见表 4 和图 4。

炸药周围和端部破片的速度见图 5,赤道面附近破片的稳定速度为 1200 m/s,与开放状态形成的破片速度相近;端部破片的速度约为 315 m/s,端部破片速度远低于炸药周围破片的速度。



(a) Mass distribution of fragments near the head of cylinder (b) Mass distribution of fragments near the explosive

图 4 封闭状态下破片的质量分布

Fig. 4 Mass distribution of fragments in the closed cylinder

表 4　封闭状态下破片数量随时间的变化

Table 4　Fragment number-time relation under the closed condition

$t/(\mu s)$	Fragment number
37	27
73	155
105	168
185	222
230	224

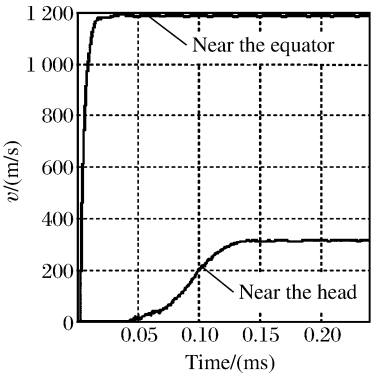


图 5　赤道面和端部破片速度

Fig. 5　Velocity-time histories near the head and the equator of the cylinder

4　结　论

采用 SPH 算法,通过数值模拟分析了开口和封闭状态下短药柱在钢筒内爆炸情况下的破裂特征,获得以下认识:

(1) 钢筒破裂形成两类破片:一是爆心附近的质量较小、速度高的破片;另一是质量较大、速度较低的抛体。

(2) 封闭钢筒的端部是薄弱位置,封闭结构加强了端部钢筒的破裂。

(3) 封闭状态下形成的破片,赤道面的速度最大,端部的速度较小。

References:

[1] Gurney R W. The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shell, Grenades [R]. Aberdeen, Maryland: Ballistic Research Laboratories, 1943.

[2] Mott N F. Fragmentations of Shell Cases [J]. Mathemat Phys Sci, 1947, 189(1018): 300-308.

[3] Grady D E. The Spall Strength of Condensed Matter [J]. J Mech Phys Solids, 1988, 36(3): 353-384.

[4] Grady D E. Local Inertial Effects in Dynamic Fragmentation [J]. J Appl Phys, 1982, 53(1): 322-325.

[5] Grady D E, Kipp M E. Experimental Measurement of Dynamic Failure and Fragmentation Properties of Metals [R]. DE-AC04-76DP00789, 1994.

[6] Kipp M E, Grady D E. Dynamic Fracture Growth and Interaction in One Dimension [J]. J Mech Phys Solids, 1985, 33(4): 399-415.

[7] Grady D E. Fragmentation of Rings and Shells [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

[8] Garg S K, Siekmann J. On Fracture of a Thin Spherical Shell under Blast Loading [J]. Exp Mech, 1966, 6(1): 39-44.

[9] Martineau R L, Anderson C A, Smith F W. Expansion of Cylindrical Shells Subjected to Internal Explosive Detonations [J]. Exp Mech, 2000, 40(2): 219-225.

[10] Wilson L T, Reedal D R, Kipp M E. Comparison of Calculated and Experimental Results of Fragmentations Cylinder Experiments [R]. DE-AC04-94AL85000, 2000.

[11] Ivanov A L, Syrunin M A, Fedorenko A G, et al. Fragmentation of Spherical Shells under Internal Blasting Loading [J]. Strength Mater, 2001, 33(2): 150-156.

[12] Elek P, Jaramaz S. Modeling of Fragmentation of Rapidly Expanding Cylinders [J]. Theoret Appl Mech, 2005, 32(2): 113-130.

[13] Zhang T, Yu J, Zhao L J, et al. Spontaneous Fracture of Steel Cylinder under Internal Explosion Load [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(s1): 159-160. (in Chinese)
张　陶,於　津, 赵利军,等. 内部爆炸载荷作用下金属柱壳的自然破碎过程研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(s1): 159-160.

[14] Li Y C, Zhang W, Huang C Y, et al. Thermo Plastic Constitutive Relation of Damaged Materials and Its Applications to Cylinder Fractures [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1999, 29(3): 260-268. (in Chinese)
李永池, 张 伟, 黄承义, 等. 损伤材料的热塑性本构关系及对柱壳破裂问题的应用 [J]. 中国科学技术大学学报, 1999, 29(3): 260-268.

[15] Li Y C, Li D H, Wei Z G, et al. Research on the Deformation, Damage and Fracture Rules of Circular Tubes under Inside-Explosive Loading [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(4): 442-449. (in Chinese)
李永池, 李大红, 魏志刚, 等. 内爆炸载荷下圆管变形、损伤和破坏规律的研究 [J]. 力学学报, 1999, 31(4): 442-449.

[16] Li Y C, Wang H W, Jiang S Q, et al. Research on the Thermal-Viscoplastic Constitutive Relation of Damaged Materials and Numerical Simulation of Circular Tubes Fracture [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 105-110. (in Chinese)
李永池, 王红五, 江松青, 等. 含损伤材料的热粘塑性本构关系和柱壳破裂研究 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 105-110.

[17] Tang T G, Gu Y, Li Q Z, et al. Expanding Fracture of Steel Cylinder Shell by Detonation Driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 529-533. (in Chinese)
汤铁钢, 谷 岩, 李庆忠, 等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 529-533.

[18] Hu B Y, Dong Q D, Han C S, et al. Studies of Explosion and Fracture of Explosive-Filled Steel Cylinders [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1): 49-54. (in Chinese)
胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. 内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 49-54.

Numerical Analysis on Fragmentation Properties of the Steel Cylinder Subjected to Detonation of Internal Short Cylinderical Explosive Charge

WANG Xin-Zheng[1,3], ZHANG Song-Lin[1,2], ZOU Guang-Ping[3]

(1. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
3. *College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: The characteristics of fragments, which are numerical studied with Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) algorithms, come from the steel cylinder subjected to the detonation of internal short cylinderical explosive charge. Grady spall model is employed to describe the spall failure of the steel cylinder. Stochastic failure is used to define the failure models, in which Mott distribution is used to depict the failure strain. Mass distribution and velocity of fragments are mainly discussed. The results show that the part near the head of explosive begins to fracture after the steel cylinder expands to a certain extent, and then the part around the explosive disaggregates to fragments. For the closed cylinder, the ends are the other weakness position. The fragments around the explosion centre are smaller with high velocity, while the fragments around cylinder ends are larger with low velocity. The fragments near the explosion centre are relatively concentrated in the space.

Key words: steel cylinder; Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH); explosion; fracture; numerical simulation