



内爆载荷作用下圆柱钢壳的动态破碎性能

陈 虎, 沈正祥, 王 杜, 陈定岳, 袁书强

引用本文:

陈虎, 沈正祥, 王杜, 等. 内爆载荷作用下圆柱钢壳的动态破碎性能 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 054202.

CHEN Hu, SHEN Zhengxiang, WANG Du, et al. Dynamical Fragmentation of Steel Cylinders Subjected to Internal Explosive Detonations [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 054202.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

[局部改性弹体低速贯穿金属靶板的破坏形式研究](#)

沈正祥, 李亚哲, 张宏亮, 杨辉, 王芳, 周克, 刘峰涛

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.02.014

[局部淬火金属柱壳破碎性的研究](#)

沈正祥, 袁书强, 陈炯, 刘峰涛, 周春华, 王芳, 杨辉

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.04.009

[空心球/铝合金复合材料动态压缩性能与损伤破碎特性](#)

王少恒, 杨震琦, 管公顺, 庞宝君, 陈海波

DOI: 10.11858/gywlxb.2013.03.019

[内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳动态响应仿真研究](#)

张国栋, 李翔宇, 梁民族, 卢芳云

DOI: 10.11858/gywlxb.20170596

[不同载荷下 TA2 钛合金柱壳爆炸碎裂的实验研究](#)

潘顺吉, 俞鑫炉, 董新龙

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.04.005

[铍青铜柱壳膨胀断裂研究](#)

金山, 汤铁钢, 李庆忠, 孙学林, 徐永波, 沙桂英

DOI: 10.11858/gywlxb.2006.04.016

内爆载荷作用下圆柱钢壳的动态破碎性能^{*}

陈 虎¹, 沈正祥^{1,2}, 王 杜¹, 陈定岳¹, 袁书强²

(1. 宁波市特种设备检验研究院, 浙江 宁波 315048;

2. 北方材料科学与技术研究院, 浙江 宁波 315103)

摘要: 针对高应变率条件下金属壳体破碎性问题, 通过内爆加载试验研究了不同装药条件对圆柱钢壳破碎性能的影响规律, 探索了一种新的适用于圆柱壳体的破碎性评估准则。实验结果表明: 对于不同的给定材料与炸药组合, 壳体的单位长度修正 Payman 破碎参数 C_u 和装药与壳体质量比值(C/M 值)之间均存在线性关系; 端部效应会使壳体破碎参数降低一固定值; 壳体壁厚和无装药部分长度等因素对 C_u 值影响较小, 且壳体无装药部分的破碎性较差, 只与壳体材料有关。

关键词: 柱壳; Payman 破碎参数; 装药与壳体质量比; 端部效应

中图分类号: O347; TJ412

文献标识码: A

金属柱壳在内部爆炸加载条件下的动态变形、破碎特性有着重要的理论意义和应用价值。在军事领域, 由于柱壳结构在战斗部中较为常见, 其在爆炸载荷下的力学响应及终点效应一直是关注的热点^[1-2]; 在公共安全领域, 为有效限制爆炸冲击波及爆轰产物的作用范围, 对人员和设备实现有效保护, 抗爆容器可用于紧急处理疑似爆炸物品^[3-4]; 在石油化工领域, 压力容器经常在高温和高压下运行, 在突发故障下内部易燃易爆介质可能发生爆炸, 产生碎片引发多米诺事故也是不可避免的^[5-6]。

国内外早期的研究主要集中在柱壳膨胀后期裂纹形成的物理机制、断裂应变分析和破片统计分布规律。Gurnery^[7]根据能量平衡模型估算了柱壳外爆膨胀断裂后的破片速度。Taylor^[8]基于拉伸断裂假设及弹塑性理论, 提出柱壳内部的应力状态与断裂判据。Hoggatt 等^[9]观察到, 随着爆轰压力的增加, 柱壳的断裂模式由拉伸型向剪切型转变。Mott^[10]和 Grady^[11]分别从统计学方法和能量守恒观点出发, 系统地研究了柱壳破碎后形成大量破片的统计分布规律, 并给出相应的破片分布模型。近些年随着计算机技术的进步, 数值仿真成为广泛使用的一种研究方法。Hiroe 等^[12]基于实验与数值模拟结合的方法, 研究了不同材料、缺陷结构、爆炸能量及起爆位置对柱壳变形及破碎行为的影响规律。Tana-pornra-weekit 等^[13]通过数值仿真研究了柱壳自然破碎后其破片初速度、飞散角和质量分布特征, 并分析了不同材料性能对柱壳破碎性能的影响。Kong 等^[14]利用光滑粒子数值法计算了柱壳在内爆载荷下的动态断裂行为, 破片分布及飞散速度与实验结果基本一致。由以上可见, 系统研究不同条件下壳体破碎特性的报道并不多见^[15]。针对这类强动载柱壳结构, 国内外也未形成一种通用的破碎性评估准则。

本工作以圆柱钢壳为研究对象, 分析不同装药条件对壳体膨胀断裂行为的影响, 探讨破碎特性和装药与壳体质量比 C/M (C 为装药质量, M 为壳体质量) 的内在关系, 得出一种新的适用于圆柱壳体的破碎性评估准则。

^{*} 收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-03

基金项目: 浙江省质量技术基础建设项目(20180119)

作者简介: 陈 虎(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事压力容器安全技术研究. E-mail: chenhu@nbtjy.com

通信作者: 沈正祥(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事爆炸力学研究. E-mail: shenzx84@163.com

1 实 验

1.1 实验方法

试验材料为某典型高强合金钢,其主要化学成分包括 0.6% C、1.27% Si、1.15% Mn、0.018% S、0.027% P。装药为 B 炸药,密度为 1.67 g/cm³。所有圆柱钢壳在水井中爆破,且壳体周围预留足够空气区域供其膨胀断裂,按标准方法将破片回收,回收率均在 97% 以上。按质量分组并记录各组破片的质量和数量,其中质量小于 0.04 g 的破片只统计总质量。

1.2 破碎性表征

一般认为,壳体破片的质量分布符合修正 Payman 直线方程^[16]

$$\lg P = 2 - C_0 \frac{m}{M}$$
(1)

式中: m 为规定的破片分组质量范围的下限; M 为回收破片的总质量; P 为质量大于 m 的破片质量百分数($0 < P \leq 100$);直线的斜率 C_0 称为修正 Payman 破碎参数,可用来表征壳体的破碎性能。一般来说, C_0 值越大,壳体破片的质量分布越合理,破碎性越好。

研究还发现,修正 Payman 破碎参数 C_0 与壳体长度 L 成正比,即

$$C_u = C_0 / L$$
(2)

式中: C_u 即为单位长度修正 Payman 破碎参数,单位 cm⁻¹。 C_u 与壳体长度无关,只与壳体材料、装药类型及 C/M 比值有关。

2 结果分析与讨论

2.1 壳体破碎性能评估准则

为研究壳体的破碎特性与 C/M 比值的关系,设计了如图 1 所示的圆柱壳体,具体尺寸见表 1。为消除端部效应,药柱两端均突出壳体约 20 mm。共进行 5 组试验,每组 3 发壳体。

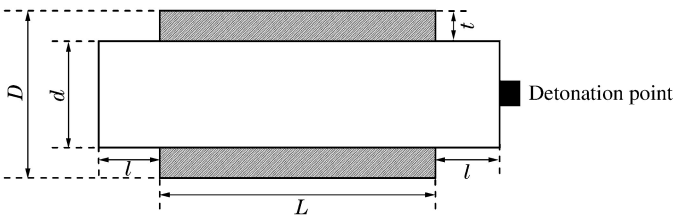


图 1 圆柱钢壳结构示意图
Fig. 1 Schematic of cylindrical steel shell

表 1 壳体尺寸及装药条件
Table 1 Dimensions of shell and charge

No.	D/mm	d/mm	L/mm	C/M
1	30.64	20.64	70	0.18
2	41.99	30.13	70	0.23
3	40.13	30.13	70	0.28
4	50.87	39.52	70	0.33
5	49.52	39.52	70	0.38

破片回收后按质量分拣,并根据(1)式分析其质量分布规律,可得出修正 Payman 破碎参数 C_0 与 C/M 值的关系。如图 2 所示,随着 C/M 比值的增加, C_0 变大,壳体的破碎性能提高,该现象与壳体断裂及破片形成机制有关,与 Reid 等^[17]的实验结果相符。

对每组 C_0 取平均值并除以壳体长度,可得到单位长度修正 Payman 破碎参数 C_u 。如图 3 所示,对 C_u 与 C/M 比值进行线性拟合,拟合直线方程可表示为

$$C_u = 19.1 + 92.8C/M \quad (3)$$

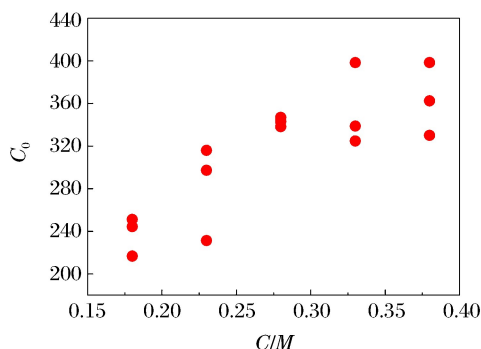


图 2 破碎参数 C_0 与 C/M 值的关系

Fig. 2 Variation of Payman fragmentation parameter C_0 with C/M ratio

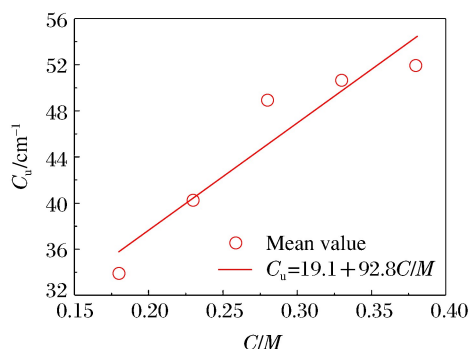


图 3 破碎参数 C_u 与 C/M 比值的关系

Fig. 3 Variation of normalized Payman fragmentation parameter C_u with C/M ratio

因此可认为,内爆炸加载条件下,任何圆柱钢壳与炸药组合一般都存在这类线性关系,即

$$C_u = a + bC/M \quad (4)$$

式中: a 和 b 被称为壳体材料与炸药组合的特征常数。对于给定的材料与炸药组合, a 和 b 为定值。根据壳体破碎的相似性原则,利用(4)式可以评估在相同壳体材料及炸药条件下任何尺寸圆柱壳体的破碎参数,具有广泛的用途。由图 3 还可以看出,当 C/M 比值为 0.33 和 0.38 时,破碎参数 C_u 值偏低。这是因为这两组壳体的直径较大,毛坯热锻后冷却特别慢,温度不均匀导致组织中铁素体含量增多,并呈块状形态,阻碍了裂纹扩展与贯通,最终造成壳体整体的破碎性降低。

2.2 端部效应对破碎性的影响

为研究端部效应对破碎性的影响,设计了如图 4 所示的圆柱钢壳,其特点是起爆端药柱与壳体齐平。所有壳体分为两组:一组壁厚 t 固定, C/M 比值变化,考察 C/M 比值对壳体破碎性的影响;另一组 C/M 比值保持不变,壁厚变化,考察壁厚对壳体破碎性的影响。壳体尺寸如表 2 所示,得到的破碎性结果如图 5 所示。可以看出,当存在端部效应时,壳体破碎性随 C/M 比值的增大而提高,单位长度修正 Payman 破碎参数 C_u 与 C/M 比值同样可拟合成直线关系,其方程可表示为

$$C_u = 4.7 + 93.1C/M \quad (5)$$

图 5 中虚线为(3)式拟合直线,表示壳体不存在端部效应时,其破碎参数 C_u 与 C/M 比值的变化关系。由此可以得出,无论 C/M 比值如何变化,端部效应将导致壳体破碎性能降低。这是因为该条件下装药起爆不能立刻达到最高压力,导致壳体起爆端不能及时断裂形成破片,整体破碎性能变小。需要注意的是,图 5 中两条直线的斜率分别为 92.8 和 93.1,近似相等,意味着不管 C/M 比值多大,由端部效应引起破碎参数 C_u 的降低量是个常数。

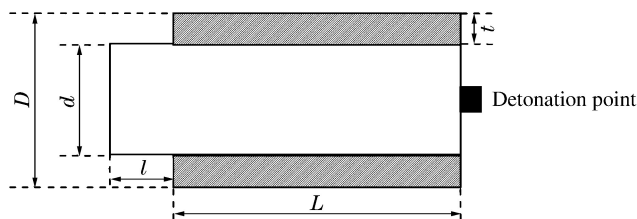


图 4 带端部效应的圆柱钢壳结构

Fig. 4 Schematic of steel shell with end effect

表 2 考虑端部效应的壳体尺寸及装药条件
Table 2 Dimensions of shell with end effect and charge

No.	D/mm	d/mm	L/mm	t/mm	C/M
1	30.64	20.64	60	5	0.18
2	40.13	30.13	60	5	0.28
3	49.52	39.52	60	5	0.38
4	58.84	48.84	60	5	0.48
5	32.11	24.11	60	4	0.28
6	48.16	36.16	60	6	0.28
7	56.19	42.19	60	7	0.28

如果忽略两条直线斜率的微小差别,将(3)式与(5)式相减,即可得到如下关系式

$$C_{u_end} = C_u - \frac{3}{4}a$$

(6)

式中: C_{u_end} 和 C_u 分别为相同 C/M 比值条件下存在端部效应和无端部效应的破碎参数, a 为材料与炸药组合的特性常数。

当 C/M 比值保持不变时,破碎参数 C_u 随壳体壁厚的变化趋势如图 6 所示。可以看出, C_u 与壁厚的关系基本为一条水平直线,具有很小的正斜率,表明端部效应与壁厚无关。

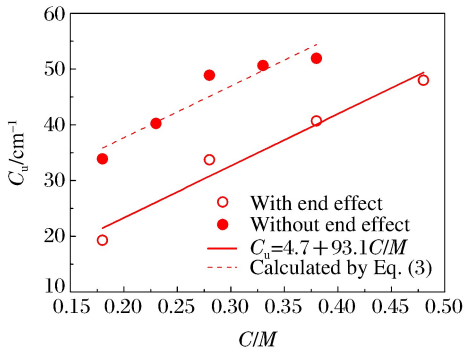


图 5 端部效应对壳体破碎参数 C_u 的影响
Fig. 5 Influence of end effect on the normalized Payman fragmentation parameter C_u

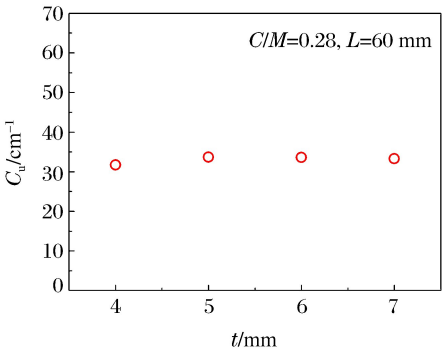


图 6 壁厚对壳体破碎参数 C_u 的影响
Fig. 6 Influence of wall thickness on the normalized Payman fragmentation parameter C_u

2.3 无装药部分对破碎性的影响

为考察无装药部分对壳体破碎性的影响,设计了如图 7 所示的圆柱钢壳。圆柱钢壳共分为 3 组:
(1) 壁厚 t 及无装药部分长度 L' 固定, C/M 比值变化;
(2) 壁厚及 C/M 比值固定,无装药部分长度变化;
(3) C/M 比值及无装药部分长度固定,壁厚变化。壳体尺寸及装药条件见表 3。

壳体装药部位及无装药部分的单位长度修正 Payman 破碎参数 C_u 与 C/M 比值的 关系如图 8 所示。可以看出,无装药部分的破碎参数 C_u 较小且变化不大,而壳体装药部分的破碎参数 C_u 与 C/M 比值之间依然存在线性关系,并且可用下式表示

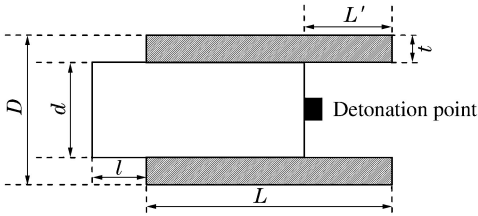


图 7 带无装药部分的圆柱钢壳结构
Fig. 7 Schematic of steel shell with charge vacancy

$$C_u = 4.8 + 91.7C/M$$

(7)

将(7)式与(5)式做对比发现,两者的截距及斜率几乎相等,因此可以近似认为壳体装药部分的破碎参数与 C/M 比值的关系和具有端部效应的壳体完全相同,即无装药部分的存在对装药部分的破碎性没有任何影响。对回收的破片仔细观察发现,壳体破碎时主要沿装药与无装药的连接处断裂,不产生既包括装药部分又包括无装药部分的破片,因此装药部分的破碎性与具有端部效应的壳体是等同的。

表 3 考虑无装药部分的壳体尺寸及装药条件

Table 3 Dimensions of shell with charge vacancy and charge

No.	D/mm	d/mm	L/mm	L'/mm	t/mm	C/M
1	30.64	20.64	60	30	5	0.18
	40.13	30.13	60	30	5	0.28
	49.52	39.52	60	30	5	0.38
	58.84	48.84	60	30	5	0.48
2	40.13	30.13	60	10	5	0.28
	40.13	30.13	60	20	5	0.28
	40.13	30.13	60	30	5	0.28
	40.13	30.13	60	40	5	0.28
3	32.11	24.11	60	30	4	0.28
	40.13	30.13	60	30	5	0.28
	48.16	36.16	60	30	6	0.28
	56.19	42.19	60	30	7	0.28

当装药部分的 C/M 比值和无装药部分长度 L' 保持不变时,壳体的破碎参数 C_u 随壁厚的变化关系如图 9 所示。随着壳体壁厚的增加,装药部分及无装药部分的破碎性几乎保持不变,表明壳体壁厚改变时无装药部分对装药部分的破碎性无影响。对于无装药部分长度不同的壳体,其破碎性参数变化如图 10 所示,可以看出,当无装药部分长度增加时,装药部分的破碎参数几乎不变。因此可得出,无装药部分长度不影响壳体装药部分的破碎性能。

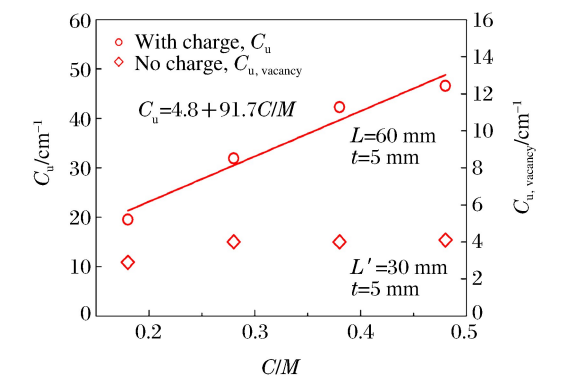


图 8 壳体破碎参数 C_u 与 C/M 比值的关系

Fig. 8 Variation of normalized Payman fragmentation parameter C_u with C/M ratio

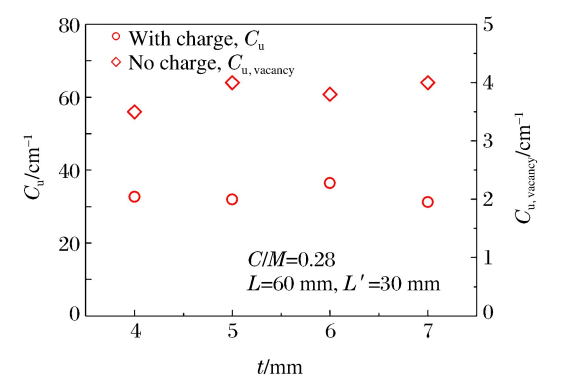


图 9 壳体破碎参数 C_u 与壁厚的关系

Fig. 9 Variation of normalized Payman fragmentation parameter C_u with wall thickness

综合图 8、图 9 和图 10 还可以得出,无装药部分壳体的破碎参数事实上很小。当装药部分壳体向外膨胀时,无装药部分受影响而被“撕裂”成破片。由于两部分壳体向外膨胀的加速度相差悬殊,所以沿两部分的连接处断裂。因此可近似认为,装药部分壳体等效于存在端部效应的壳体。无装药部分的破碎性则主要取决于壳体材料本身性质, C/M 比值即使有影响也不会很明显,而长度和壁厚的变化虽然

会影响壳体质量和破片大小,但总破碎参数 C_0 近似相等,因为 C_0 是经过壳体质量(回收破片总质量)修正过的参数。

3 结 论

针对内爆炸载荷作用下金属壳体的动态碎裂问题,通过圆柱钢壳内爆加载试验研究了不同装药条件对破片质量分布的影响规律,得到如下主要结论。

(1) 对于不同的给定材料与炸药组合,壳体的单位长度修正 Payman 破碎参数 C_u 与 C/M 比值均存在线性关系,即 $C_u = a + bC/M$,其中 a 、 b 为与壳体材料和炸药组合有关的特征常数;

(2) 无论壁厚和 C/M 比值如何变化,端部效应使壳体的破碎参数 C_u 降低至一个定值 $3a/4$;

(3) 无装药部分对壳体的破碎性影响很小,当无装药部分长度或壁厚发生变化时,壳体的破碎参数 C_u 近似不变,且 C_u 与 C/M 比值的线性关系同样成立。

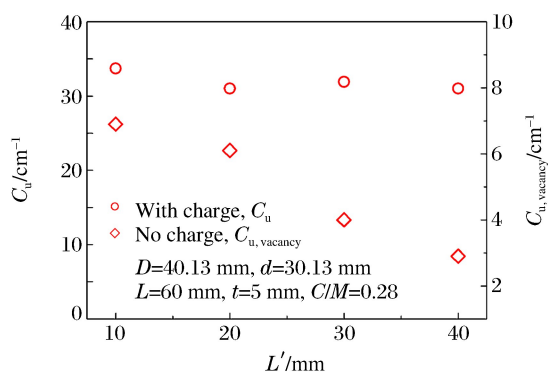


图10 壳体破碎参数 C_u 与无装药部分长度的关系

Fig. 10 Variation of normalized Payman fragmentation parameter C_u with length of charge vacancy

参考文献:

- [1] ARNOLD W, ROTTENKOLBER E. Fragment mass distribution of metal cased explosive charges [J]. International Journal of Impacting Engineering, 2008, 35(12): 1393-1398.
- [2] 沈正祥, 李亚哲, 张宏亮, 等. 局部改性弹体低速贯穿金属靶板的破坏形式研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 202-207.
SHEN Z X, LI Y Z, ZHANG H L, et al. Experimental studies on failure mode of low speed projectiles by local modification on steel plates [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(2): 202-207.
- [3] 王志荣, 蒋军成, 徐进. 气体爆炸载荷作用下抗爆容器的动力学响应 [J]. 石油化工高等学校学报, 2006, 19(3): 76-80.
WANG Z R, JIANG J C, XU J. Dynamic response of pressure-shock-resistant vessel subjected to gas explosion load [J]. Journal of Petrochemical University, 2006, 19(3): 76-80.
- [4] 辛健, 马利, 胡洋, 等. 内爆载荷作用下不锈钢圆柱壳的断裂失效分析 [J]. 压力容器, 2013, 30(2): 66-72.
XIN J, MA L, HU Y, et al. Fracture analysis of stainless steel tube under internal blasting loading [J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(2): 66-72.
- [5] 路胜卓, 王伟, 张博一. 大型浮顶式储油罐的爆炸破坏机理实验 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 158-164.
LU S Z, WANG W, ZHANG B Y. Experimental research on destruction mechanism of large-scale floating-roof oil tank under blast loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 158-164.
- [6] 陈福真, 张明广, 王妍, 等. 油气储罐区多米诺事故耦合效应风险分析 [J]. 中国安全科学学报, 2017(10): 111-116.
CHEN F Z, ZHANG M G, WANG Y, et al. Risk analysis of coupling domino effect in petroliferous tank farm [J]. China Safety Science Journal, 2017(10): 111-116.
- [7] GURNERY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shells and grenades; BRL 405 [R]. Maryland: Army Ballistic Research Laboratory, 1943.
- [8] TAYLOR G I. Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end [M]//Batchelor G K. The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor (III). Cambridge: Cambridge University Press, 1963: 277-286.
- [9] HOGGATT R H, RECHT R F. Fracture behavior of tubular bombs [J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(3): 1856-1862.

- [10] MOTT N F. Fragmentation of shell cases [J]. Mathematical and Physical Sciences, 1947, 189(1018): 300-308.
- [11] GRADY D E. Fragmentation of rings and shells [M]. New York: Springer Verlag, 2006.
- [12] HIROE T, FUJIWARA K, HATA H, et al. Deformation and fragmentation behavior of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations [J]. International Journal and Impact Engineering, 2008, 35: 1578-1586.
- [13] TANAPORNRAWEKIT G, KULSIRIKASEM W. FEM simulation of HE blast-fragmentation warhead and the calculation of lethal range [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, 6(6): 411-415.
- [14] KONG X S, WU W G, LI J, et al. A numerical investigation on explosive fragmentation of metal casing using smoothed particle hydrodynamic method [J]. Material and Design, 2013, 51: 729-741.
- [15] 沈正祥, 袁书强, 陈炯, 等. 局部淬火金属柱壳破碎性的研究 [J]. 高压物理学报, 2015, 29(4): 293-298.
SHEN Z X, YUAN S Q, CHEN J, et al. Fragmentation of metal cylindrical shell treated by local quenching [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015, 29(4): 293-298.
- [16] GRADY D E, HIGHTOWER M M. Fracture of a 4140 steel cylinder under high explosive loading, Sand-90-0882C [R]. Sandia National Laboratories, 1990.
- [17] REID W D, WALSH B E. Dynamic fracture properties of a tungsten, 3.5%Ni, 1.5%Fe alloy under explosive loading conditions [J]. Journal de Physique, 1991, 1(C3): 597-604.

Dynamical Fragmentation of Steel Cylinders Subjected to Internal Explosive Detonations

CHEN Hu¹, SHEN Zhengxiang^{1,2}, WANG Du¹,
CHEN Dingyue¹, YUAN Shuqiang²

(1. Ningbo Special Equipment Inspection & Research Institute, Ningbo 315048, China;
2. Ningbo Branch of Institute of Metal Materials, Ningbo 315103, China)

Abstract: Explosively driven fragmentation of material is a highly complex phenomenon. In this study, we evaluated the influence of explosive on the intrinsic fragmentation characteristics using hollow cylindrical steel shells, and investigated a new universal assessment criteria for the fragmentation of cylindrical shells. The results show that there is a linear relationship between the normalized Payman fragmentation parameter C_u of the shell and the charge/mass ratio C/M , for various combinations of shell material and explosive. The fragmentation parameter C_u of columnar part decreases by a constant value for the presence of end effect, while other factors including the shell thickness and the length of charge vacancy, have little effect on the fragmentation parameter C_u . The fragmentation performance of shell with no charge is relatively low and is only determined by shell material properties.

Keywords: cylinder; Payman fragmentation parameter; charge/mass ratio; end effect