

文章编号: 1001-1455(2003)06-0529-05

爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究*

汤铁钢, 谷 岩, 李庆忠, 华劲松, 孙学林

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用前照明的高速分幅照相对不同壁厚的 45 钢柱壳在爆轰加载下的膨胀破裂过程进行了研究, 实验成功拍摄到 45 钢柱壳前表面裂纹生成、扩展及产物泄漏的过程图像。研究表明: 膨胀应变率在 10^4s^{-1} 附近时, 随着应变率的增加, 45 钢柱壳的各特征应变均有所增加, 断裂模式由拉剪混合向单一剪切转变; 45 钢柱壳的膨胀破裂有一个过程, 从柱壳的外壁面可以观察到裂纹生成至产物开始泄漏经历时间历程的长短与柱壳壁厚相关, 柱壳壁越厚, 从外壁出现裂纹到产物开始泄漏的时间间隔越长; 由回收破片厚度测量推算出的膨胀断裂应变与动态实验过程中产物开始泄漏时的断裂应变基本一致。

关键词: 固体力学; 膨胀破裂; 分幅照相; 金属柱壳

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 130°1545

文献标志码: A

1 引 言

爆轰加载下金属柱壳的膨胀断裂一直是人们关注与研究的问题, R. W. Gurney^[1] 早就提出了用于预测内部爆轰加载下金属圆管破片速度的经验公式。接着, G. I. Taylor^[2] 利用拉伸断裂假定研究了金属柱壳的破碎问题, 并提出了 Taylor 断裂判据。其后, F. Olive 等^[3] 对金属柱壳的断裂判据进行了比较多的实验研究, 提出了半经验的断裂准则; A. Г. Иванзв^[4] 则从能量观点出发, 提出了球壳膨胀断裂判据。随后, 研究者(如 D. L. Wesenberg 等^[5]、D. E. Grady^[6]) 开始关注断裂的机制和断裂的过程, 并从微观和宏观两方面来解释金属壳体的膨胀断裂过程。近年来, R. L. Martineau 等^[7] 一直进行着内部炸药爆轰加载下圆柱壳体膨胀行为的 Bench Mark 实验研究, 实验中利用高速分幅照相和 Fabry-Perot 干涉测速, 取得了精度较高的实验数据。在国内, 陈大年等^[8]、王德生等^[9]、胡八一^[10] 进行过爆轰加载下金属柱壳的膨胀断裂研究。

本文中利用高速分幅照相技术, 拍摄了滑移爆轰加载下不同壁厚的 45 钢柱壳的动态膨胀破裂过程, 实验清楚地观察到柱壳外壁面上裂纹的产生、扩展及爆轰产物泄漏的全过程, 不同壁厚柱壳的回收破片表现出不同的断裂模式, 为深入研究金属柱壳的膨胀断裂过程和进行数值模拟研究提供了有价值的参考信息。

2 实验简介

实验装置如图 1 所示, 采用空心 T/R 炸药的近似滑移爆轰加载不同壁厚的 45 钢柱壳, 柱壳内径 60mm, 壁厚分别为 3、4、5mm。实验用 45 钢的静态力学性能参数分别为: 屈服强度 $\sigma_{0.2} = 350 \text{MPa}$, 断裂强度 $\sigma_b = 700 \text{MPa}$, 延伸率

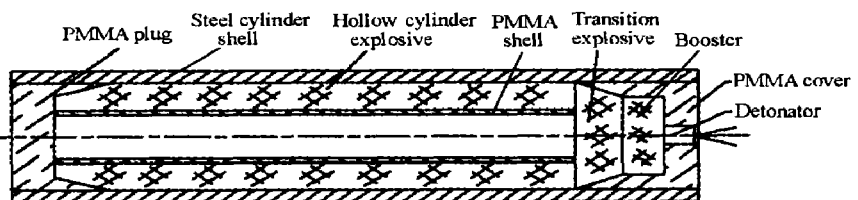


图 1 实验装置结构示意图

Fig. 1 The set up of experiment

* 收稿日期: 2003-01-23; 修回日期: 2003-03-27

作者简介: 汤铁钢(1974—), 男, 硕士, 助理研究员。

$\delta=17\%$, 面缩率 $\psi=40\%$ 。T/R 炸药内径 40mm, 壁厚 10mm。45 钢柱壳长 250mm, 空心炸药长 200mm, 利用圆台形过渡炸药引爆空心炸药, 使之形成近似滑移爆轰。

实验用 FJZ-250 转镜式高速相机进行前照明的分幅照相, 用两个氩气弹(激发炸药+氩气袋)作为前照明光源。实验布局的俯视图如图 2 所示。

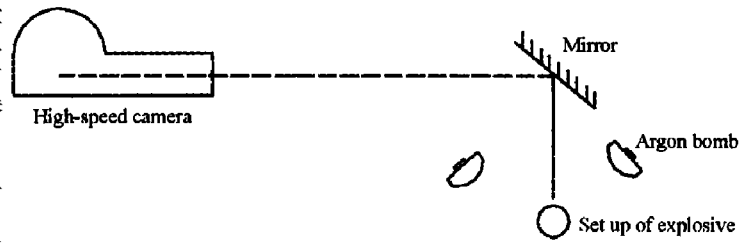


图 2 高速分幅照相实验布局

Fig.2 Layout of high-speed photography

3 实验结果与分析

采用前照明的高速分幅照相技术, 拍摄到金属柱壳前表面裂纹生成、扩展及产物泄漏的过程。高速相机转镜转速为 $1.8 \times 10^5 \text{ r/min}$, 照片幅间距约为 $0.67 \mu\text{s}$ 。壁厚 4mm 的 45 钢柱壳膨胀破裂过程的典型实验照片如图 3 所示。

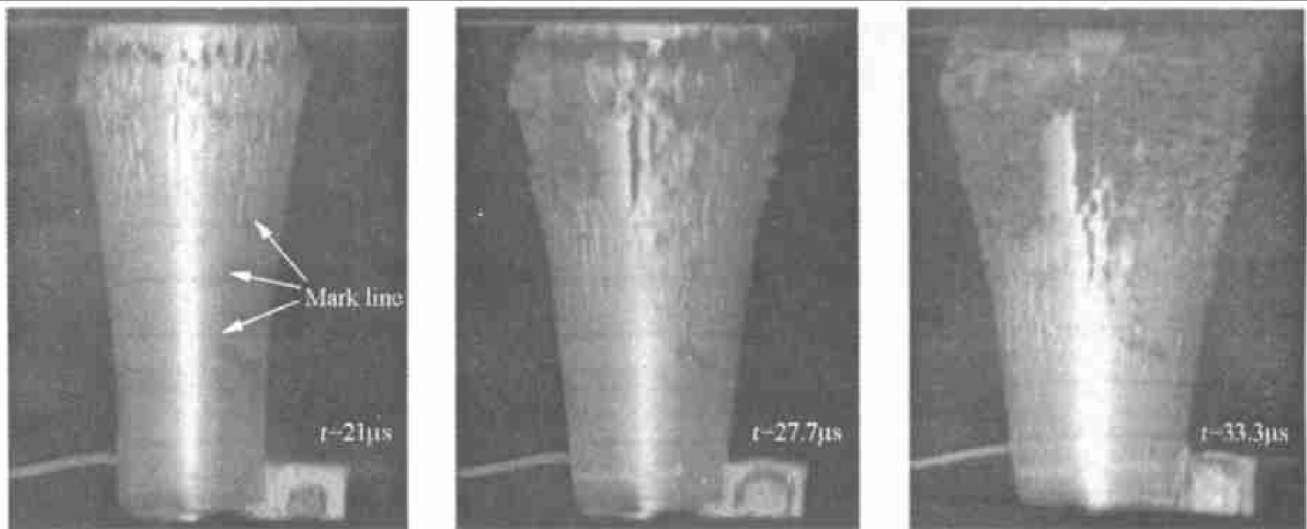


图 3 45 钢柱壳膨胀破裂过程的典型实验照片(以起爆为时间零点)

Fig.3 The high-speed photos of the expanding steel cylinder

由图 3 可以看出, 柱壳的膨胀破裂有一个过程, 从柱壳的外壁面可以观察到裂纹生成至产物开始泄漏经历了一定的时间历程, 时间历程的长短与柱壳壁厚相关。开始出现裂纹定义为在柱壳前表面测试截面上(选定标记线)观察到 1~2 条裂纹; 产物开始泄漏定义为前表面测试截面上观察到 1~2 条裂纹处出现产物; 产物严重泄漏定义为前表面测试截面上所有裂纹均出现产物。选取柱壳离起爆端炸药端面 106 mm 处为测试截面(选定标记线), 近似认为测试截面为准定常部位, 受两端边界影响较小。对 3 发实验的柱壳分别测量开始出现裂纹、产物开始泄漏及产物严重泄漏的时间和对应的径向应变, 实测数据见表 1, Δ 为钢柱壳壁厚, 所给出的时间以爆轰波到达所测试截面为起点。为了更好地说明柱壳膨胀破裂的过程, 针对柱壳外壁不同的特征定义三个特征应变: 开始出现裂纹时的径向应变 ϵ_c (crack strain)、产物开始泄漏时的径向应变 ϵ_f (“fracture” strain)、产物严重泄漏时的近似径向应变 ϵ_r (rupture strain)。认为其中产物开始泄漏时的应变与通常所说的断裂应变接近。需要说明的是, 由于每种尺寸柱壳的实验仅做一发, 没有统计数据, 但从柱壳准定常段各条标记线上测量的数据是一致的。

从时间上看, 随着柱壳壁厚的增加, 外壁开始出现裂纹的时间逐渐提早, 这主要是由于柱壳壁内的应力状态决定的。无论是拉伸裂纹, 还是剪切裂纹, 要在外壁上产生, 外壁的环向应力应处于拉伸状态, 并且达到一定值。壁厚较小时, 壁内的压应力状态维持较长时间, 抑制了外壁拉伸断裂的发生, 剪切失稳的始发点应该在处于高温高压的内壁区域(此处最大剪应力最大^[10]), 只有当剪切失稳扩展到外壁,

且外壁处于环向拉应力状态时, 断裂才沿剪切失稳带发生。壁厚较大时, 柱壳内壁面附近区域处于压应力状态, 剪切失稳仍然首先在此发生; 而外壁面附近很快就处于环向拉应力状态, 可能同时在外壁面形成拉伸裂纹, 于是内壁的剪切失稳带和外壁的拉伸裂纹在壁内相遇, 形成拉剪混合断裂。回收的破片证明了这一点, 壁厚 3mm 的 45 钢柱壳发生单一贯穿剪切断裂(见图 4); 壁厚 5mm 的 45 钢柱壳外壁面附近约有三分之一的厚度发生拉伸断裂, 靠近内壁约三分之二的厚度发生剪切断裂(见图 4(b)左侧); 壁厚 4mm 的 45 钢柱壳发生拉伸断裂的厚度更小。由于壁厚的影响, 柱壳起飞后的膨胀速度不同, 造成材料变形的应变率的差异, 这也会对断裂过程的发生产生影响。

表 1 柱壳膨胀各阶段的径向应变及平均应变率

Table 1 The strains of different expanding stages of cylinder and the average strain rate

Δ/mm	ϵ_c	$t_c/\mu\text{s}$	ϵ_f	$t_f/\mu\text{s}$	ϵ_r	$t_r/\mu\text{s}$	ϵ/s^{-1}
3	0.30	10.1	0.45	14.1	~ 0.54	16.8	3.5×10^4
4	0.24	8.8	0.43	15.4	~ 0.56	20.1	2.9×10^4
5	0.18	7.8	0.37	15.8	~ 0.49	21.1	2.5×10^4
3 ¹⁾	0.38	6.0	0.88	12.0	> 1.18	> 14.5	8.4×10^4

1) 实验用 45 钢柱壳的内径 40mm, 实心 JOB9003 炸药加载。

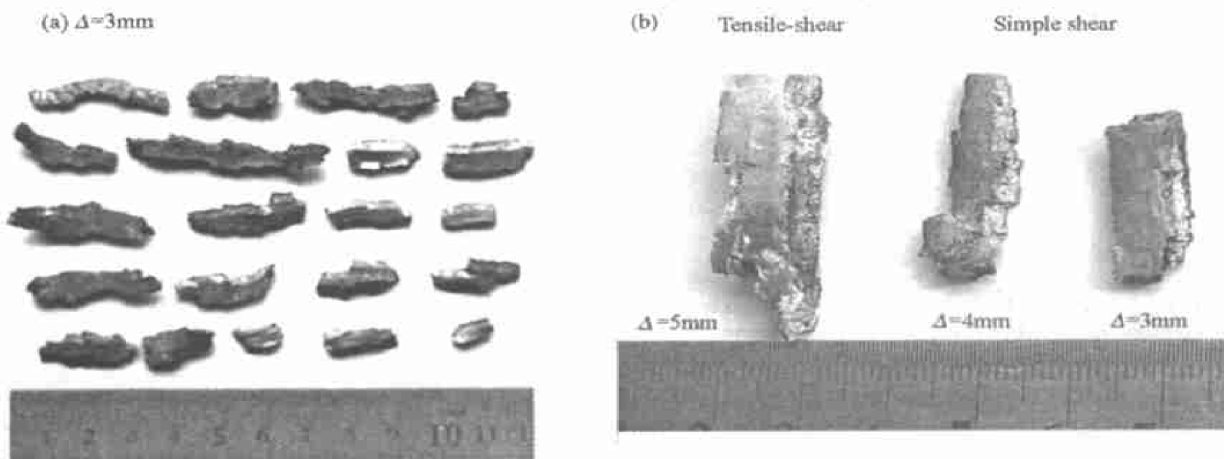


图 4 45 钢柱壳回收的部分破片

Fig. 4 The collected fragments of the steel cylinder shell

从柱壳的膨胀应变看, 随着柱壳壁厚的增加, 各特征时刻的径向应变逐渐减小, 即随着膨胀应变率的减小, 各特征应变也相应减小。这一现象说明, 45 钢柱壳在膨胀断裂过程中表现出了应变率效应。由于实验数量较少, 应变率范围较小, 还不能完全说明 45 钢柱壳的膨胀断裂的应变率效应特征, 需进行更多的实验进行研究。Manjit Singh 等^[11]最近研究表明, 爆轰加载下铝柱壳的膨胀断裂表现出了明显的应变率效应, 而且出现了动态断裂中所谓的“塑性峰”现象。

采用软回收方法对柱壳断裂后破片进行部分回收, 并对内外壁面完好的破片厚度进行测量, 由破片厚度推断柱壳发生断裂时的膨胀应变 ϵ' ($\epsilon' = (\delta_0 - \delta) / \delta_0 = (R - R_0) / R_0$), 测量结果见表 2。回收破片的厚度不均匀, 中部厚、边部薄, 由于边部不规则, 测量时选择破片中部进行, 得到的平均厚度可能比实际值略大, 由此推算出的应变 ϵ' 比由分幅照片观察到开始出现裂纹时测量的应变 ϵ_c 还要略小, 这与剪切断裂导致破片形成有关。在高应变率膨胀变形过程中, 柱壳壁内首先发生绝热剪切局域化, 在绝热剪切局域化区域发生剧烈的塑性变形, 出现类似拉伸试验中的颈缩现象(见图 5), 这种现象在延展性较好的材料(如纯铜)中更明显^[7]。绝热剪切局域化过程使得柱壳局部变薄, 成为剪切断裂发生的先导(见图 6)。

表2 回收破片测量厚度与推算应变

Table 2 The average thickness of recovery fragments and deduced strain

Δ_0/mm	测量破片数量	Δ_{av}/mm	ϵ'_{de}	ϵ_c
3	38	2.4	0.25	0.30
4	14	3.3	0.21	0.24
5	11	4.3	0.16	0.18

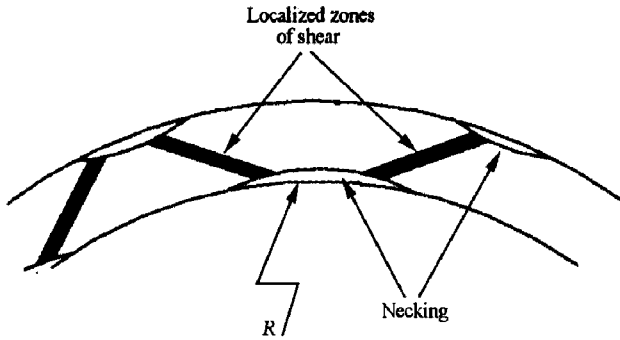


图5 柱壳壁内的绝热剪切局域化与颈缩现象

Fig.5 The adiabatic shear localization and necking of the expanding cylinder shell

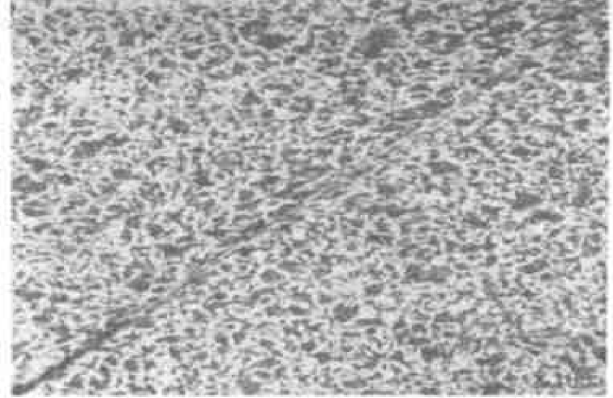


图6 回收破片中的绝热剪切带

Fig.6 The adiabatic shear band in the steel

4 结论

通过初步实验研究,对滑移爆轰加载下45钢柱壳的膨胀破裂过程有了一定的认识,得到以下几点结论:

(1) 膨胀应变率在 10^4s^{-1} 附近时,随着应变率的增加,45钢柱壳的各特征应变有所增加,断裂模式由拉剪混合向单一剪切转变;

(2) 45钢柱壳的膨胀破裂有一个过程,从柱壳的外壁面可以观察到裂纹生成至产物开始泄漏经历了一定的时间历程,时间历程的长短与柱壳壁厚相关:柱壳壁越厚,从外壁出现裂纹到产物开始泄漏的时间间隔越长;

(3) 由回收破片厚度测量推算出的柱壳断裂应变与动态实验过程中产物开始泄漏时的断裂应变基本一致;

(4) 45钢在动载下的膨胀断裂应变均大于其静态延伸率。

此外,实验采用的前照明高速分幅照相既可获得柱壳膨胀过程中外壁面变化特征,也能保证柱壳的边界比较清晰,可用于爆轰加载下壳体动态断裂的过程研究。

感谢王德生、韩长生研究员在实验工作中的指导及金山、王慧、冯姬等在实验中的协助。

参考文献:

- [1] Gurney R W. The initial velocity of fragments from bombs, shells and grenades[R]. BRL Report 405, 1943.
- [2] Taylor G I. Fragmentation of tubular bombs, science papers of Sir G I Taylor[M]. London: Cambridge University Press, 1963: 387-390.
- [3] Olive F, Nicaud A, Marilleau J, et al. Rupture behaviour of metals in explosive expansion[J]. Inst Phys Conf Ser, 1979, 47: 242-252.
- [4] Иванзв АГ. Динамическое разрушение объектов в области глубоких пластических деформаций[J]. ПМТФ, 1984, 144(3): 125-130.
- [5] Wesenberg D L, Sagartz M J. Dynamic fracture of 6061-T6 aluminum cylinders[J]. J Appl Mechanics, Trans ASME,

1977, 44: 643—646.

- [6] Grady D E. Properties of an adiabatic shear-band process zone[J] . J Mech Phys Solids, 1992, 40(6): 1197—1215.
- [7] Martineau R L, Anderson C A. Expansion of cylinder shells subjected to internal explosive detonations[J] . Experimental Mechanics, 2000, 40(2): 219—225.
- [8] 陈大年, 尹志华. 对膨胀壳体材料失稳的一种简化处理[J] . 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 193—198.
CHEN Da-nian, YIN Zhi-hua. A simplified approach to material instability of expanding shells[J] . Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 193—198.
- [9] 王德生, 李延年, 马松合, 等. 管内爆轰产物压力测量[J] . 爆炸与冲击, 1984, 4(3): 74—78.
WANG De-sheng, LI Yan-nian, MA Song-he, et al. Measurement of the pressure of detonation products in a tube[J] . Explosion and Shock Waves, 1984, 4(3): 74—78.
- [10] 胡八一. 金属圆筒在内部爆轰加载下的膨胀断裂机理研究[D] . 绵阳: 中国工程物理研究院研究生部, 1992.
- [11] Manjit Singh, Suneja H R. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J] . International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 939—954.

Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving

TANG Tie-gang^{*}, GU Yan, LI Qing-zhong, HUA Jin-song, SUN Xue-lin
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The high-speed photography has been applied to observe the expanding fracture of the steel cylinder shells, drive which by detonation. The clear photos of expanding process of steel cylinder shells have been obtained. The fracture strain of the expanding steel shell becomes larger when the strain rate increase to around 10^4 s^{-1} ; and the fracture model becomes to simple shear from tensile-shear. The time between cracks initiating on the out surface of the steel shell and the detonation product getting out gets longer when the thickness is increase. The deduced strain from the average thickness of the recovered fragments agrees with that obtained from dynamic photos.

Key words: solid mechanics; expanding fracture; high-speed photography; steel cylinder shell

* Corresponding author: TANG Tie-gang