

文章编号: 1001-1455(2006)02-0129-05

45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应*

汤铁钢, 李庆忠, 孙学林, 孙占峰, 金山, 谷岩

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用前照明高速分幅照相技术拍摄到在爆轰加载下 45 钢柱壳表面裂纹生成、扩展及产物泄漏过程的清晰图像, 较准确地测量了膨胀断裂的时间与应变。45 钢柱壳在炸药爆轰加载下, 断裂应变随应变率的增加而增加, 当应变率达到一定值, 断裂应变随应变率的增加而降低, 出现了动态断裂中的塑性峰现象。

关键词: 固体力学; 应变率效应; 分幅照相; 45 钢; 膨胀断裂

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的问题, 1943 年, R. W. Gurney^[1] 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。1944 年, 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。许多研究表明, Taylor 判据仅适用于加载压力较低(应变率较低)时金属柱壳的断裂行为, 当加载压力较高时, 由于断裂模式发生变化, 呈现拉剪混合断裂或纯剪断裂, Taylor 判据不再适用。F. Olive 等^[3] 对金属柱壳的断裂判据进行了较多的实验研究, 提出了半经验的断裂准则, 其中涉及了断裂的应变率效应。R. L. Martineau 等^[4] 发现无氧铜柱壳以 10^4 s^{-1} 应变率膨胀时, 断裂应变超过 1.50。S. Manjit 等^[5] 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。

45 钢是一种常用的工程材料, 在交通运输、机械制造及国防工业中得到广泛的应用, 目前已对它的动态性能进行了许多研究^[6~7], 动态断裂的应变率效应是人们非常关注的问题。本文中利用前照明高速分幅照相技术, 对 45 钢柱壳在爆轰加载下的膨胀断裂进行研究。实验中采用两种炸药(RHT-901、JOB-9003)加载两种内径壁厚 3~6 mm 的 45 钢柱壳, 拍摄到柱壳前表面裂纹生成、扩展及产物泄漏的过程图像, 获取了较准确的膨胀断裂应变, 发现 45 钢柱壳的膨胀断裂与应变率相关, 为深入研究 45 钢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

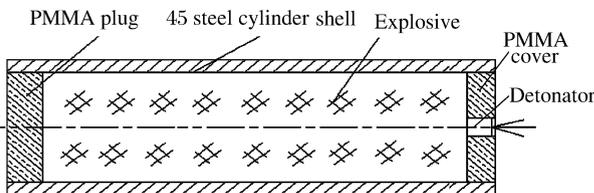


图 1 实验装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

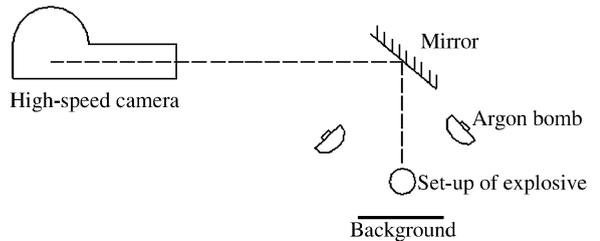


图 2 高速分幅照相实验布局

Fig. 2 Layout of high-speed photography

* 收稿日期: 2005-01-25; 修回日期: 2005-03-31

基金项目: 中国工程物理研究院基金项目(421010301)

作者简介: 汤铁钢(1974—), 男, 硕士, 助理研究员。

JOB-9003 炸药(爆压 $p_{CJ} = 35$ GPa)加载实验装置如图 1 所示, 45 钢柱壳内径 40 mm, 壁厚分别为 3、4、5、6 mm, 长 200 mm; JOB-9003 炸药外径 40 mm, 长 150 mm, 由雷管在一端中心点直接起爆。空心 RHT-901 炸药(爆压 $p_{CJ} = 29$ GPa)加载实验装置及 45 钢静态力学性能参数参见文献[8]。

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)作前照明光源, 在照相光路上的装置背后采用浅色背景, 以衬托出实验装置清晰的边界, 实验布局见图 2。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

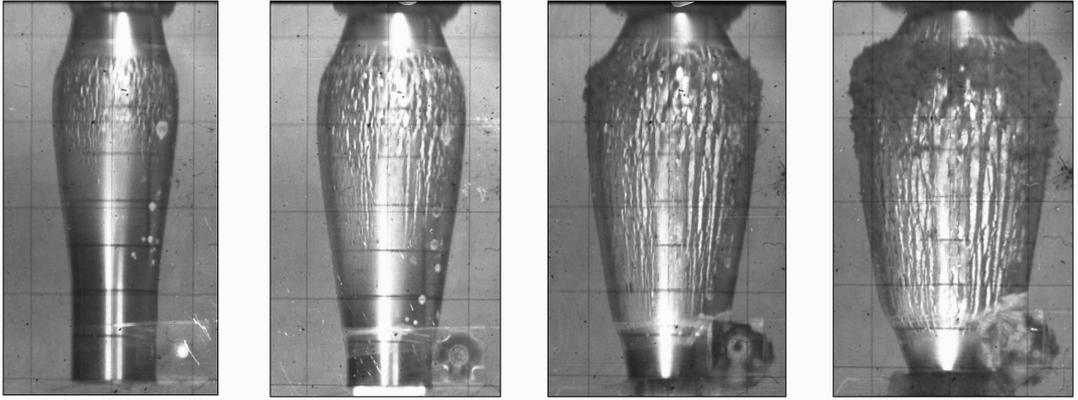


图 3 JOB-9003 炸药加载下 45 钢柱壳膨胀断裂过程的典型实验照片

Fig. 3 The high-speed photos of the expanding 45 steel cylinder shells loaded by JOB-9003 explosive

表 1 柱壳膨胀应变、应变率及断裂模式

Table 1 The strains and strain rates of 45 steel cylinder shells and fracture models

内径/mm	壁厚/mm	ϵ_c	$t_c/\mu s$	ϵ_f	$t_f/\mu s$	$10^{-4}\dot{\epsilon}/s^{-1}$	断裂模式
60	5	0.18	7.8	0.37	15.8	2.5	拉剪混合
60	4	0.24	8.8	0.43	15.4	2.9	拉剪混合
60	3	0.30	10.1	0.45	14.1	3.5	纯剪切
40	6	0.44	11.5	0.89	23.5	4.5	纯剪切
40	5	0.42	9.5	1.24	22.5	6.0	纯剪切
40	4	0.40	7.5	1.31	19.5	7.1	纯剪切
40	3	0.38	6.5	0.88	13.5	8.4	纯剪切

采用带背景的前照明高速分幅照相技术, 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。用 JOB-9003 炸药加载内径 40 mm 的 45 钢柱壳时, 高速相机转镜转速为 2.4×10^5 r/min, 照片幅间距约 $0.5 \mu s$, 柱壳膨胀断裂过程的典型实验照片如图 3 所示。空心 RHT-901 炸药加载内径 60 mm 的 45 钢柱壳时, 高速相机转镜转速为 1.8×10^5 r/min, 照片幅间距约 $0.67 \mu s$, 柱壳膨胀断裂过程的典型实验照片见文献[8]。

选取柱壳中部作为观察位置, 主要考虑中部受两端稀疏影响较小, 实验前在柱壳外壁上标记线, 以确定观察的准确位置, 便于计算该位置柱壳的加载时间, 并以爆轰波到达所测试截面为 $0 \mu s$ 。记柱

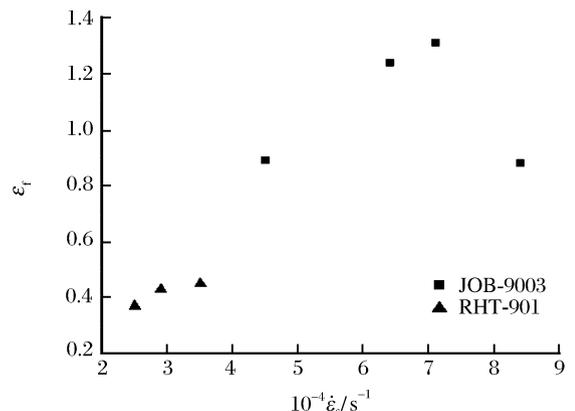


图 4 45 钢柱壳膨胀断裂应变与应变率的关系

Fig. 4 Fracture strains vs. strain rates of 45 steel cylinder shell

壳外壁开始出现裂纹时的径向应变为 ϵ_c , 对应的时间为 t_c ; 产物开始泄漏时的径向应变为 ϵ_l , 即通常所说的断裂应变, 对应时间为 t_l 。7 发实验的处理数据列于表 1, 膨胀断裂应变与应变率的关系见图 4。

3.2 应变率效应分析

对于空心 RHT-901 炸药加载内径 60 mm 柱壳时, 随柱壳壁厚的增加, 外壁开始出现裂纹的时间逐渐提早, 这主要由柱壳壁内的应力状态决定, 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(此处剪应力最大^[8]), 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 3 mm 的 45 钢柱壳发生纯剪切断裂; 壁厚 5 mm 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; 壁厚 4 mm 的 45 钢柱壳发生拉伸断裂的厚度更小。无论是拉伸裂纹还是剪切裂纹, 断裂的贯穿则要求整个管壁内环向应力处于拉伸状态, 由于壁厚越大, 维持柱壳内爆轰产物压力的时间越长, 因此柱壳发生贯穿断裂的时间越迟。

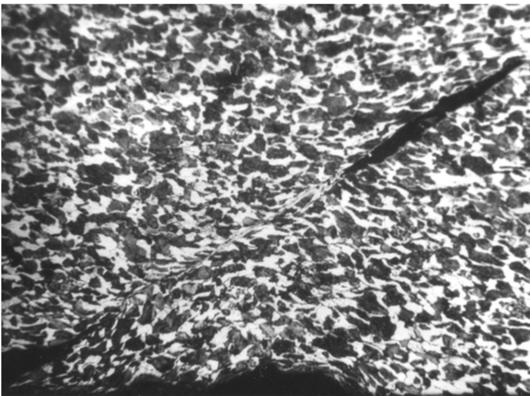
对于 JOB-9003 炸药加载内径 40 mm 柱壳时, 随着柱壳壁厚的增加, 外壁开始出现裂纹的时间逐渐推迟, 与上述分析是一致的。由于该加载条件下 45 钢柱壳全部为纯剪切断裂, 剪切失稳的起源在高温高压的内壁区域, 随壁厚增加, 剪切失稳扩展到外壁的时间增加, 因此在外壁观察到裂纹的时间逐渐推迟。贯穿断裂的时间随着壁厚的增加逐渐推迟, 与上述分析一致。

从柱壳的膨胀断裂应变看, 在空心 RHT-901 加载时, 随柱壳壁厚减小, 即膨胀应变率增加, 断裂应变也相应增加; 在 JOB-9003 加载时, 随柱壳壁厚减小, 断裂应变先增加后减小。45 钢柱壳在两种炸药加载下的膨胀断裂过程表现出了应变率效应, 而且出现了动态断裂中的塑性峰现象, 塑性峰出现位置的应变率约为 $7.1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。

3.3 断裂的微观分析

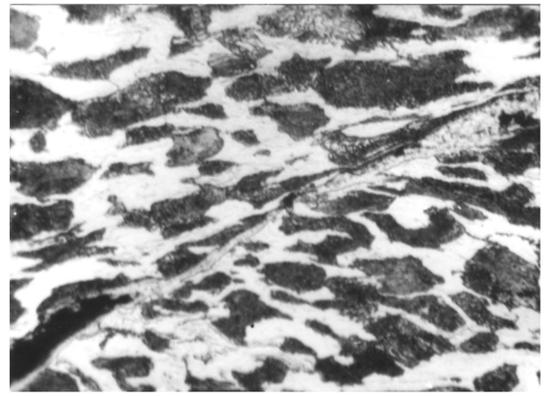
对不同加载状态下 45 钢柱壳断裂后形成的破片进行了回收, 并分别进行了解剖和金相分析, 典型金相照片见图 5、图 6。

(a) Shear band and crack



100×

(b) The tip of crack



400×

图 5 破片中的剪切带与裂纹(JOB-9003 炸药加载内径 40mm 壁厚 3mm 的 45 钢柱壳)

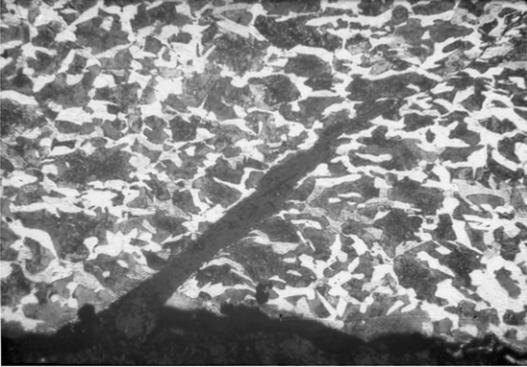
Fig. 5 Shear bands and cracks in recovered fragmentations

for JOB-9003 loading 45 steel cylinder shell of inside diameter 40 mm and shell thick 3 mm

图 5 展示了 JOB-9003 炸药加载内径 40 mm、壁厚 3 mm 的 45 钢柱壳回收破片典型的金相分析照片。图 5(a)为破片中观察到的裂纹与剪切带沿与径向成 45° 夹角方向扩展形貌(照片的下方为柱壳的内壁, 与图 6 中方向一致), 裂纹在柱壳内壁及壁内产生, 裂纹前端为剪切带; 裂纹尖端及剪切带局部放

大见图 5(b), 剪切带附近的晶粒明显变形, 剪切带沿直线向前发展, 几乎没有受到晶界的影响, 完全由晶粒的塑性变形所致, 剪切带内的组织呈现流线状态; 说明经历了较高的温度历史, 即内壁高压持续了较长时间。图 6 展示了空心 RHT-901 炸药加载内径 60 mm、壁厚 3 mm 的 45 钢柱壳回收破片典型的金相分析照片。图 6(a) 为破片中的裂纹与剪切带, 剪切带发展不充分, 没有观察到明显的塑性变形, 说明柱壳内壁压力相对较低, 高压持续时间相对较短; 剪切带前方组织的放大见图 6(b), 观察到穿过铁素体和珠光体的微裂纹, 同时在铁素体中存在孪晶和滑移变形。

(a) Crack and shear band



100×

(b) Micro-cracks



400×

图 6 破片中的裂纹与剪切带(RHT-901 炸药加载内径 60 mm 壁厚 3 mm 的 45 钢柱壳)

Fig. 6 Cracks and shear bands in recovered fragmentations

for RHT-901 loading 45 steel cylinder shell of inside diameter 60 mm and shell thick 3 mm

4 结 论

对 45 钢柱壳在炸药加载下的膨胀断裂过程进行了实验研究, 并对回收的破片进行了金相分析, 得到以下结论:

(1) 空心 RHT-901 炸药加载内径 60 mm 的 45 钢柱壳时, 随柱壳壁厚减小, 柱壳外壁出现裂纹的时间逐渐推迟, 膨胀断裂应变逐渐增加, 断裂模式由拉剪混合向纯剪切转变; JOB-9003 加载内径 40 mm 的 45 钢柱壳时, 断裂模式为纯剪切, 随壁厚减小, 外壁出现裂纹的时间逐渐提前, 断裂应变出现先增加后降低的现象, 出现了动态断裂中的塑性峰现象, 塑性峰位置对应的应变率约 $7.1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。

(2) 回收破片的金相分析发现, 两种炸药加载下柱壳内壁均出现明显的剪切裂纹, 但断裂机理存在明显差异。

感谢王德生、韩长生研究员在实验工作中的指导及王慧、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[A]. 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 behavior of metals in explosive expansion[J]. Inst. Phys. Conf. Ser., 1979(47):242-252.
- [4] Martineau R L, Anderson C A. Expansion of cylinder shells subjected to internal explosive detonations[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(2):219-225.
- [5] Manjit S, 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.
- [6] 胡昌明, 贺宏亮, 胡时胜. 45 号钢的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2):188-192.
HU Chang-ming, HE Hong-liang, HU Shi-sheng. A study on dynamic mechanical behaviors of 45 steel [J]. Ex-

plosion and Shock Waves, 2003, 23(2):188—192.

- [7] 胡八一. 金属圆管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.
- [8] 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.
TANG Tie-gang, GU Yan, LI Qing-zhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6):529—533.

Strain-rate effects of expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation

TANG Tie-gang^{*}, LI Qing-zhong, SUN Xue-lin,
SUN Zhan-feng, JIN Shan, GU Yan

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The high-speed photography was applied to observe the expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation. The clear photos of expanding process of steel cylinder shells were obtained. The fracture strains of the expanding steel shells increase with the strain-rate, and decrease when the strain-rate arrived at a certain constant. The plasticity peak during dynamic fracture was experimentally observed. The strain-rate according to the peak of fracture strain is around $7.1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.

Key words: solid mechanics; strain-rate effect; high-speed photography; 45 steel; expanding fracture

* Corresponding author: TANG Tie-gang
E-mail address: ttg1974@163.com
Telephone: 0816-2493325