DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0130-05

爆轰加载下柱壳断裂时刻微小差异测量方法*

金 山,刘 欣,袁 帅,华劲松,汤铁钢
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 对于断裂时刻差异较小的对比实验,提出一种判读方法:同时采用高速摄影和干涉测速,利用高速摄影判读壳体断裂时刻应变,利用干涉测速获取壳体位移及应变曲线,两者结合得出较为精确的壳体断裂时刻差异。利用该方法得出 45 钢柱壳在 JO-9159 和 JOB-9003 两种炸药加载下断裂时间相差 0.45 μs,钨合金柱壳在两种炸药加载下的断裂时间相差 0.39 μs。同时该方法可以推广应用于单发壳体膨胀断裂实验中,更精确测定壳体的断裂时刻。

关键词: 爆炸力学;断裂时刻;高速摄影;爆轰加载;干涉测速
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

爆轰加载下柱壳膨胀断裂研究已开展多年,壳体贯穿断裂时刻是壳体膨胀断裂研究的重点关注问题之一。对于壳体贯穿断裂时刻的判读,目前常用的测试方法有高速摄影、闪光照相等[1-2],判读精度取决于所用的测试方法。激光干涉测速具有较高的测量精度,常用于获取壳体表面的膨胀速度及位移历史[3-4],但无法直接获取壳体断裂相关的信息。

JO-9159 和 JOB-9003 是两种驱动能力相近的炸药,与 JO-9159 相比,JOB-9003 的各项性能参数均有不同程度的减小:密度变化不大、爆速降低 1.7%、爆压降低 4.3%、爆热降低 8.6%。利用数值模拟得到两种炸药驱动下金属柱壳膨胀的速度及位移曲线,预估柱壳在两种炸药加载下的断裂时刻差异较小,仅利用高速摄影测试方法有可能分辨不出两者差异,因此,考虑同时采用高速摄影及激光干涉测速两种测试方法,用于判读两种炸药加载下柱壳的微小断裂时刻差异。

1 数值模拟结果

采用欧拉方法建立二维轴对称模型,计算在 JO-9159 和 JOB-9003 炸药加载下金属柱壳膨胀断裂的速度及位移历史。使用 JWL 状态方程描述爆轰产物的力学行为,计算 45 钢和钨合金柱壳在两种炸药加载下的速度及位移历史,其中炸药直径 63 mm,柱壳厚 2.5 mm,以传爆药(PETN)的起爆时间为 0.0 μs 时刻,计算主炸药长度方向中心位置处柱壳外壁的速度及位移历史,结果如图 1~2 所示。

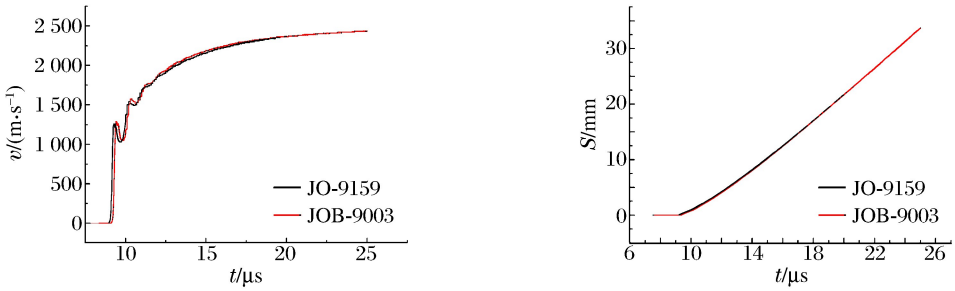

图 1 45 钢柱壳速度及位移计算结果

Fig. 1 Calculation results of velocity and displacement curves of the 45 steel cylinder shells

* **收稿日期**: 2013-05-21; **修回日期**: 2013-11-25
基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金项目(SFZ20120101)
第一作者: 金 山(1981—),男,助理研究员,jin9835@163.com。

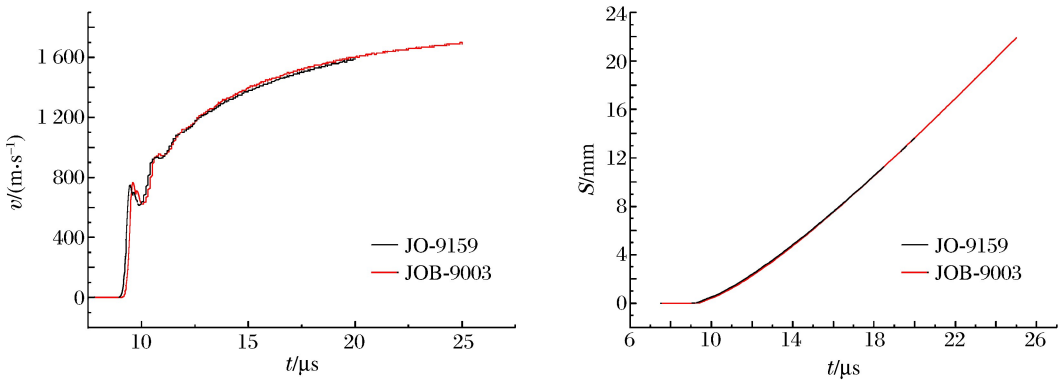

图 2　钨合金柱壳速度及位移计算结果

Fig. 2　Calculation results of velocity and displacement curves of the W alloy cylinder shells

从计算结果可以看出，由于 JO-9159 和 JOB-9003 两种炸药性能参数差异较小，两种炸药加载下壳体的速度差异很小，位移曲线几乎重合，直至计算后期，两种炸药加载下金属柱壳经历相同位移所花费的时间仍小于 1 μs，常用的光机式高速摄影的判读精度为微秒量级，因此，可以初步推断，仅利用高速摄影无法判读出两种炸药加载下壳体断裂时间差异。

2　实验结果

根据数值计算结果，设计开展了相应的柱壳膨胀断裂对比实验，同时采用高速摄影和激光干涉测速两种方法进行测试。高速摄影得到的典型图像如图 3 所示，4 幅图像分别为 45 钢和钨合金在两种炸药加载下的膨胀断裂图像。

对高速摄影图像进行测量计算，获取主炸药长度方向中心位置处柱壳外壁从开始膨胀到产物泄漏所经历的时间 t 及此时刻的柱壳应变 ε，结果见表 1。

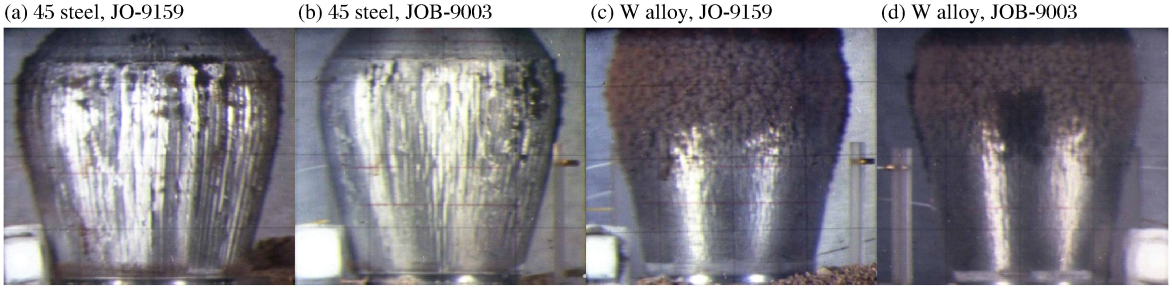

图 3　实验获得的高速摄影典型图像

Fig. 3　Experiment images by high-speed photography

从表 1 中可以看出，JO-9159 和 JOB-9003 两种炸药加载相同材料的金属柱壳时，利用高速摄影获取的从壳体开始膨胀到产物泄漏经历的时间 t 相同，产物泄漏时刻的壳体应变 ε 略有差异。这与数值模拟结果相对应，即所用的高速摄影技术无法分辨两种炸药加载下壳体的断裂时间。

图 4～5 分别为实验中利用激光干涉测速方法测得的两种炸药加载下 45 钢和钨合金柱壳外壁速度及位移历史。

表 1　产物泄漏时间及应变

Table 1　Time and strain of resultant leakage

柱壳材料	主炸药	t/μs	ε/%
45 钢	JO-9159	13.3	83.1
45 钢	JOB-9003	13.3	81.3
钨合金	JO-9159	12.0	53.8
钨合金	JOB-9003	12.0	51.3

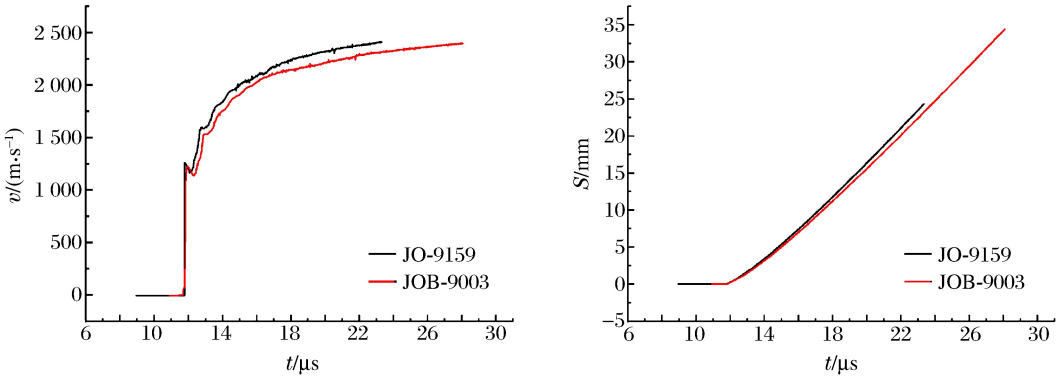

图 4 45 钢柱壳速度及位移测试结果

Fig. 4 Experiment results of velocity and displacement curves of the 45 steel cylinder shells

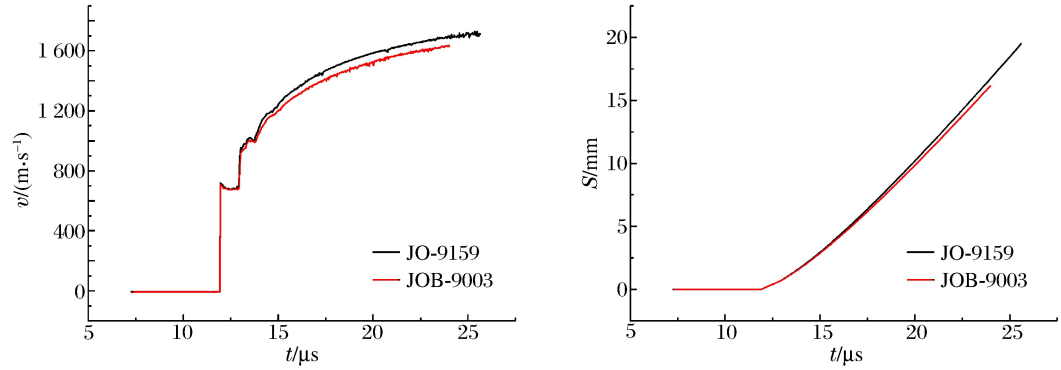

图 5 钨合金柱壳速度及位移测试结果

Fig. 5 Experiment results of velocity and displacement curves of the W alloy cylinder shells

从图 4～5 中读取速度曲线上第 1 个波峰点的起跳速度 v_1，进而计算出第 1 次加载时的应变率 $\dot{\varepsilon}_1$，得到的结果如表 2 所示。

表 2 起跳速度及应变率

Table 2 Leaping velocity and strain ratio

柱壳材料	主炸药	$v_1/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	$\dot{\varepsilon}_1/\mathrm{s^{-1}}$
45 钢	JO-9159	1 267.0	3.73×10^4
45 钢	JOB-9003	1 234.0	3.63×10^4
钨合金	JO-9159	723.6	2.13×10^4
钨合金	JOB-9003	718.4	2.11×10^4

3 微小断裂时刻差异判读方法

实验所用高速摄影幅间距为 0.67 μs，测量误差为±0.67 μs，在分辨小于自身测量误差的时间量时将引入极大误差或根本无法分辨。实验中高速摄影测得的从壳体开始膨胀到产物泄漏经历的时间相同，未能分辨两种炸药加载下壳体的断裂时刻差异。从激光干涉测速结果可以看出，JO-9159 和 JOB-9003 两种炸药加载下柱壳的速度及位移存在差异，但无法判读壳体断裂时刻。因此，考虑将高速摄影和干涉测速的测试结果综合计算，用于得出较为精确的断裂时刻差异。

3.1 判读前提及假定

从表 2 中可以看出，两种炸药加载下壳体加载应变率均在 $10^4\ \mathrm{s^{-1}}$ 以上，其中 45 钢柱壳在两种炸药

加载下应变率相差 2.7%，钨合金柱壳在两种炸药加载下应变率相差 0.9%，相同材料、相同结构的柱壳在加载应变率差异很小的情况下，应变率效应对壳体断裂应变的影响可以忽略[5]，即可近似认为两种炸药加载下同种壳体的断裂应变相同。

利用高速摄影获取的壳体断裂应变与真实断裂应变之间存在差异，在断裂应变相同的前提下，从高速摄影获取的两发实验的壳体断裂应变的平均值理论上更接近真实断裂应变。

3.2　判读思路

针对同种材料柱壳实验，首先利用高速摄影图像判读两种炸药加载下壳体产物泄漏时刻的应变，取两个应变的平均值作为壳体的断裂应变；根据激光干涉测速结果得出壳体的速度及位移随时间变化曲线，进而得到壳体的应变随时间变化曲线，在曲线上读出两种炸药加载时壳体达到断裂应变所经历的时间，最终得到两种炸药加载下壳体的断裂时刻差异。

根据上面的计算思路，如图 6 所示，利用高速摄影测试结果得出平均断裂应变 $\bar{\varepsilon}$，结合激光干涉测速测得的位移曲线，读出两种炸药加载下壳体从开始膨胀到断裂所经历的时间 t'，得到两种炸药加载下壳体断裂时刻差异 Δt，结果见表 3。

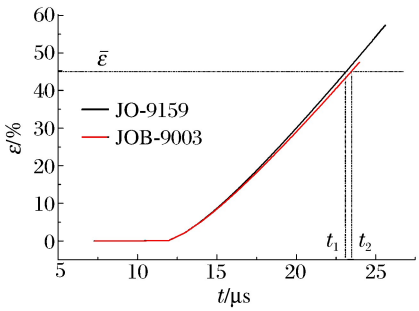

图 6　断裂时刻差异判读示意图

Fig. 6　Sketch of judging difference of fracture time

从表 3 可以看出，在 JO-9159 和 JOB-9003 两种炸药加载下，45 号钢柱壳的断裂时间相差 0.45 μs，钨合金柱壳的断裂时间相差 0.39 μs。

表 3　断裂时刻差异

Table 3　Difference of fracture time

柱壳材料	主炸药	$\bar{\varepsilon}$/%	t'/μs	Δt/μs
45 钢	JO-9159	82.2	13.17	0.45
45 钢	JOB-9003	82.2	13.62	
钨合金	JO-9159	52.6	12.73	0.39
钨合金	JOB-9003	52.6	13.12	

3.3　优点

由于干涉测速的时间、位移分辨精度远高于高速摄影，壳体膨胀断裂时刻的判读误差主要来源于高速摄影，假如直接利用高速摄影判读断裂时刻，需要两次判读，一次判读壳体开始膨胀时刻（或零时雷管起爆时刻），一次判读壳体破裂时刻，每次判读均会引入误差，其误差大小与高速摄影的时间分辨精度有关，对于本次实验，每次判读引入的误差约 5%（0.67 μs/13.3 μs=5%）。

本方法仅利用高速摄影判读壳体断裂应变，与高速摄影的时间精度无关，判读精度由高速摄影的空间分辨精度决定，对于本次实验，由高速摄影空间分辨率引入的判读误差约 0.09%（0.06 mm/68 mm=0.09%），可以看出，高速摄影的空间分辨精度引入的误差远小于时间分辨精度引入的误差。

3.4　推广应用

本方法可以推广应用于单发柱壳实验中壳体断裂时刻的精确测量。理想情况下柱壳定常爆轰段内不同位置处的断裂应变为一定值，同样采取干涉测速和高速摄影的联合测试，利用高速摄影读取柱壳定常爆轰段内多个位置处的断裂应变，取其平均值作为柱壳的断裂应变，即可在干涉测速获得的柱壳应变-时间曲线上读出相对应的断裂时刻，这样可以降低判读误差，提高分辨精度，同时减小柱壳缺陷对判读的影响。

4　总　结

高速摄影技术的时间测量精度为微秒量级，适于定性或半定量观测壳体膨胀断裂过程，确认壳体断

裂时刻的二维图像;激光干涉测速技术能更精确获取壳体自由面的速度及位移,但无法判读壳体断裂时刻。对于断裂时刻差异较小的对比实验,提出一种测量微小断裂时刻的方法,即利用高速摄影及干涉测速联合测试,进行互补判定。

上述方法汲取了两种测试技术的优点:高速摄影技术的二维分辨率及激光干涉测速技术对时间、位移测量的高分辨率,可以较精确的反映驱动能力相近的炸药加载下壳体的断裂时刻差异,同时可以推广应用于柱壳断裂时刻的精确测量。

参考文献:

[1] 张崇玉,谷岩,李庆忠,等.爆轰波对碰驱动下加环紫铜圆管对碰区变形特性研究[J].爆炸与冲击,2007,27(2):97-102.
Zhang Chong-yu, Gu Yan, Li Qing-zhong, et al. Study on deformation characteristics of collision region of copper tube with guard ring driven by two head-on colliding detonation waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(2):97-102.

[2] 金山,汤铁钢,孙学林,等.不同热处理条件下 45 钢柱壳的动态性能[J].爆炸与冲击,2006,26(5):423-428.
Jin Shan, Tang Tie-gang, Sun Xue-lin, et al. Dynamic characteristics of 45 steel cylinder shell by different heat treatment conditions[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(5):423-428.

[3] 华劲松,经福谦,谭华.动载荷下材料的屈服强度变化[J].固体力学学报,2001,22(4):421-426.
Hua Jin-song, Jing Fu-qian, Tan Hua. The variation of yield strength under dynamic loading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001,22(4):421-426.

[4] 金山,陈永涛,汤铁钢,等.多点激光干涉测速系统和电探针技术在飞片速度测量中的应用对比[J].高压物理学报,2012,26(5):571-576.
Jin Shan, Chen Yong-tao, Tang Tie-gang, et al. Comparison of multi-channel VISAR and electric probe technology in measuring free-surface velocity of metal flyer[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(5):571-576.

[5] 汤铁钢,李庆忠,孙学林,等.45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应[J].爆炸与冲击,2006,26(2):129-133.
Tang Tie-gang, Li Qing-zhong, Sun Xue-lin, et al. Strain-rate effects of expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(2):129-133.

Method for calculating small difference of fracture time of cylinder shell unloaded by detonation

Jin Shan, Liu Xin, Yuan Shuai, Hua Jin-song, Tang Tie-gang
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: One method is offered for calculating small difference of fracture time of cylinder shell in contrast experiments. The fracture strain of cylinder shell was measured by high-speed photography, and simultaneously the velocity-time curve and displacement-time curve were measured by Velocity Interferometer System. The difference of fracture time is calculated by two kinds of measurement results. The difference of fracture time of 45 steel cylinder shell unloaded by JO-9159 and JOB-9003 explosive is 0.45 μs, and the difference of fracture time of W alloy is 0.39 μs. The method can be used to measure more accurately the fracture time of cylinder shell unloaded by detonation.

Key words: mechanics of explosion; fracture time; high-speed photography; detonation loading; velocity interferometer system

(责任编辑 曾月蓉)