

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0484

## 线起爆膨胀柱壳实验加载及诊断技术\*

李英雷, 刘明涛, 陈 艳, 张世文, 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:** 基于电爆炸丝引爆炸药、继而驱动尼龙对金属柱壳进行碰撞加载的方式, 在金属柱壳中部、半柱高范围内实现了一维柱面膨胀加载。同时, 基于沿轴向的加载(或径向速度)一致性和沿环向的加载(或径向速度)轴对称性, 提出了一维柱面加载的有效性判据。相比于滑移爆轰加载, 一维柱面加载方式具有应力状态相对简单、易简化为二维轴对称问题分析的优点。在柱壳断裂诊断方面, 建立了分布式表面速度诊断方法来监测柱壳圆周范围内的初始断裂。其原理为: 均匀承载壳体断裂引起的局部承载失效将导致均匀速度曲线簇出现分叉(或演化趋势变化)。与高速分幅照相诊断方法相比, 分布式表面速度诊断方法可准确获取柱壳圆周范围内的初始断裂信息(含断裂时刻和断裂位置)。利用建立的线起爆膨胀柱壳实验加载和诊断技术, 获得了 304 钢和 45 钢柱壳的一维柱面动态拉伸初始断裂性能数据(含断裂应变、平均应变率), 其中, 45 钢柱壳的断裂应变(或延展性)低于 304 钢柱壳的。

**关键词:** 膨胀断裂; 金属柱壳; 线起爆; 诊断技术

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## Technologies for loading and diagnosis of expanding cylinder experiments with linearly-initiated explosives

LI Yinglei, LIU Mingtao, CHEN Yan, ZHANG Shiwen, TANG Tiegang

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** One-dimensional cylindrical load was imposed on the middle part and half height of the metal cylinders which have the initial height of 160 mm, the wall thickness of 4 mm and the external diameter of 48 mm, by the way of an electric exploding wire initiating explosives, and then drove the nylon lining to expand the metal cylinder. At the same time, a validity criterion of the one-dimensional cylindrical load was proposed based on the load or radial velocity monitoring on the outside surface of the cylinder along its axis and circumference. Compared with the load of sliding detonation, the one-dimensional cylindrical load has the advantages of simple stress state and easy analysis as a problem on a simplified two-dimensional axial symmetrical structure, and can provide an explicit analysis on the stress components related to the fracture of the cylinder. Based on the radial velocities of the test points distributed at the outside surface of the cylinder, a method was proposed to diagnose the initial fracture over the periphery of the cylinder. The principle of the proposed diagnosis method is that the fracture of the cylinder under homogeneous load can result in the bifurcation (or change of the evolution trend) in the uniform velocity-curve cluster. And the initial fracture time and position will be the same as the bifurcating time of the velocity curves and the position of bifurcated velocity curve, respectively, when the bifurcation angle of the velocity curves exceeds the normal scope corresponding to structure strength of the tested cylinder. Compared with the high-speed framing photography which can obtain the exact fracture information over part of the periphery of the cylinder, the distributed velocity monitoring can obtain the exact initial fracture information over the whole periphery of the cylinder. The initial fracture parameters of the 304 steel

\* 收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(11932018)

第一作者: 李英雷(1974—), 男, 博士, 副研究员, [ylli@ustc.edu](mailto:ylli@ustc.edu)

通信作者: 张世文(1971—), 男, 博士, 副研究员, [zhangswxueshu@163.com](mailto:zhangswxueshu@163.com)

and 45 steel cylinders under one-dimensional dynamic expanding load were obtained by using the established loading and diagnosis technologies for expanding cylinder experiment with linear initiation explosives. These parameters include the fracture strain and the average strain rate. The fracture strain or ductility of the 45 steel cylinder is lower than that of the 304 steel cylinder.

**Keywords:** expansion fracture; metal cylinder; linear initiation; diagnosis technology

对爆炸加载壳体膨胀断裂的研究主要集中在膨胀断裂机理和破片尺寸及其速度分布 2 个方面。在破片尺寸及速度分布研究方面: Gurney<sup>[1]</sup> 提出了破片速度预估模型; Mott<sup>[2]</sup>、Grady 等<sup>[3]</sup>、Hopson 等<sup>[4]</sup>、Zhou 等<sup>[5]</sup> 和郑宇轩等<sup>[6]</sup> 基于一维理论提出了破片尺寸分布模型<sup>[2-6]</sup>; 对于二维和三维情况, 理论预测的破片尺寸与实际差异较大<sup>[7-8]</sup>。在壳体膨胀断裂机理方面, 研究主要涉及柱壳的环向拉伸和剪切 2 种断裂模式, 给出了断裂判据以及直观的裂纹扩展演化描述<sup>[9-11]</sup>。其基本依据是壳体内部的应力分布和材料断裂判据。从研究情况看, 壳体膨胀断裂的萌生位置分别有内表面、外表面、内表面附近等不同认识, 对应的扩展路径和方式也有不同认识<sup>[9-14]</sup>。这些认识差异的起源, 既有壳体内应力分布演化复杂, 也有诊断信息不足造成分析难以收敛的原因。

对于壳体内部的应力分布, 早期研究一般采用二维轴对称模型的解析解来简化分析滑移爆轰加载柱壳, 未考虑滑移爆轰带来的沿柱壳轴向的应力梯度<sup>[9-11]</sup>; 随着数值模拟技术的应用, 研究者发现滑移爆轰加载柱壳内的空间应力梯度分布具有显著、不可忽略的影响<sup>[15-17]</sup>。因此, 将二维轴对称简化模型用于滑移爆轰加载的膨胀柱壳断裂分析, 存在较大的认识偏差。对于数值模拟技术, 虽然可以提供裂纹萌生前的应力分布描述, 但是受材料模型参数获取难度的限制, 其应用相对比较困难。因此, 膨胀壳体断裂研究目前主要还是依赖实验诊断和简化应力分析开展。

近年来发展起来的爆炸丝起爆技术(简称线起爆技术)<sup>[18-19]</sup> 利用大电流通过金属丝并使其等离子体化, 然后沿丝的长度方向同步起爆柱壳内部装填的炸药, 从而能够在膨胀柱壳中实现一维轴对称应力的加载。在此状态下, 就可以使用一维轴对称应力分析模型对线起爆膨胀柱壳的断裂问题进行有效分析。

在壳体膨胀断裂诊断方面, 常用手段包括高速分幅照相<sup>[11, 16]</sup>、高速狭缝扫描照相<sup>[20]</sup>、X 射线透射照相<sup>[21]</sup>、DPS (Doppler detection system) 测速<sup>[16]</sup>。其中, 高速分幅照相是常用诊断手段之一, 可观测壳体表面发生的皱褶、冒烟(爆轰产物泄漏)以及外径尺寸等特征信息。以往研究一般采用冒烟特征作为壳体断裂诊断标准<sup>[11]</sup>, 也有一些研究者将皱褶特征作为壳体断裂的诊断标准<sup>[22]</sup>。按照胡八一等<sup>[11]</sup>的认识, 从壳体表面皱褶发展到冒烟需要几微秒到十几微秒。高速狭缝扫描照相可观测空间固定位置上的壳体轮廓投影的不连续变化(如冒烟、宏观断裂等)和外径尺寸信息。X 射线透射照相可获取壳体沿照相投影方向的密度分布, 进而通过密度梯度变化识别壳体的裂纹宽度及分布、外径尺寸等特征信息。X 射线透射照相的优点是不受撞击或者爆炸发光影响, 缺点是图像的对比度和清晰度较差, 定量分析精度低<sup>[23]</sup>。DPS 测速是近年来发展起来的常用诊断手段, 用于测量壳体表面的垂直运动速度。DPS 测速的优点是可以长时间精确测量。受柱壳弧度影响, 上述照相诊断手段一般只能准确监测柱壳圆周部分角度范围内的断裂状态, 因此诊断结果可能存在一定程度(或严重)的偏差。

对于均匀承载柱壳, 断裂将使局部壳体承载失效, 进而导致壳体的应力、应变和速度出现显著的非均匀分布。中低应变率下的传统断裂诊断方法是采用粘贴在裂纹附近的应变计监测应变扰动来判读断裂时刻<sup>[24-25]</sup>。由于爆轰加载强度较高, 不满足应变计的使用要求, 因此可以采用一定数量、沿空间分布的 DPS 探头来监测壳体表面速度分布的演化, 实现柱壳圆周范围内的断裂诊断。

## 1 实验

采用线起爆技术对装填粉末 PETN (pentaerythritol tetranitrate) 炸药的金属柱壳做一维柱面加载, 装置结构见图 1。线起爆金属丝安装在柱壳中轴位置。炸药与柱壳之间填充延展性较好的尼龙来约束粉末装药, 同时抑制尼龙层碎裂而破坏加载均匀性。装填炸药的密度控制在  $(1.0 \sim 1.1) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  范围内,

直径为 15 mm。柱壳内径为 40 mm, 外径为 48 mm。装药、尼龙层和柱壳高度相同, 均为 160 mm。柱壳材料为 304 钢和 45 钢。每种柱壳材料各开展 1 次实验。

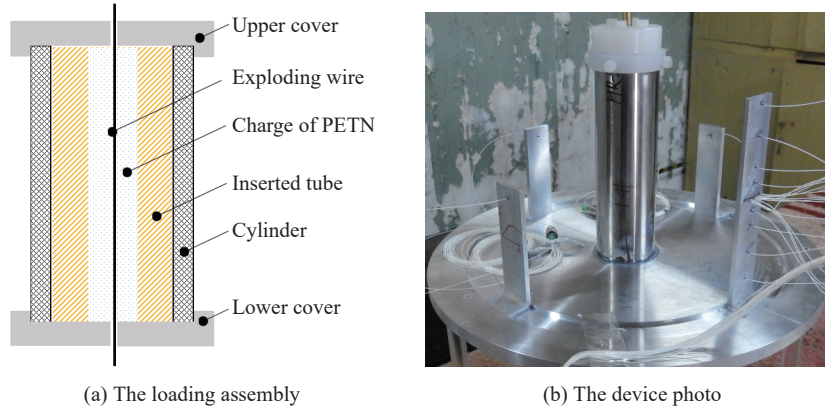


图 1 线起爆实验装置

Fig. 1 The experimental device with linear initiation

304 钢柱壳实验仅采用 DPS 探头测量柱壳外壁的径向速度, 以监测柱壳膨胀和断裂状态。在柱壳 80 mm 高度处, 沿环向 0°、90°、180°、270°方向各布置 1 个 DPS 探头, 监测径向速度的对称性; 基于柱壳沿高度方向的中心对称原则, 在沿环向 90°方向、80~140 mm 高度范围内, 按照 20 mm 等高度间隔布置了 4 个 DPS 探头, 监测径向速度的一致性。

45 钢柱壳实验除采用 DPS 探头测量柱壳外壁速度外, 还增加了高速分幅照相检测内容, 以直观观测柱壳膨胀和断裂的宏观形态。其中, 照相光路占据沿环向 0°方向, 因此该方向上的 DPS 探头取消。另外, 考虑柱壳端部边侧稀疏对径向速度的影响, 取消了沿环向 90°方向、140 mm 高度处的 DPS 探头。其余 DPS 探头布局与 304 钢柱壳实验的相同。此外, 在 45 钢柱壳外壁 20~140 mm 高度范围内, 按照 20 mm 等高度间隔分别画了蓝色环形高度标线。

在时序控制方面, 以金属丝通电起爆时刻为零时刻, 并通过系统设置保障 DPS 测速和高速分幅照相与金属丝起爆的时基相同。两相邻高速分幅照片的时间间隔约为 2 μs。

## 2 结果

304 钢柱壳的径向速度监测结果见图 2。受柱壳端部边侧稀疏卸载影响, 140 mm 高度处的速度明

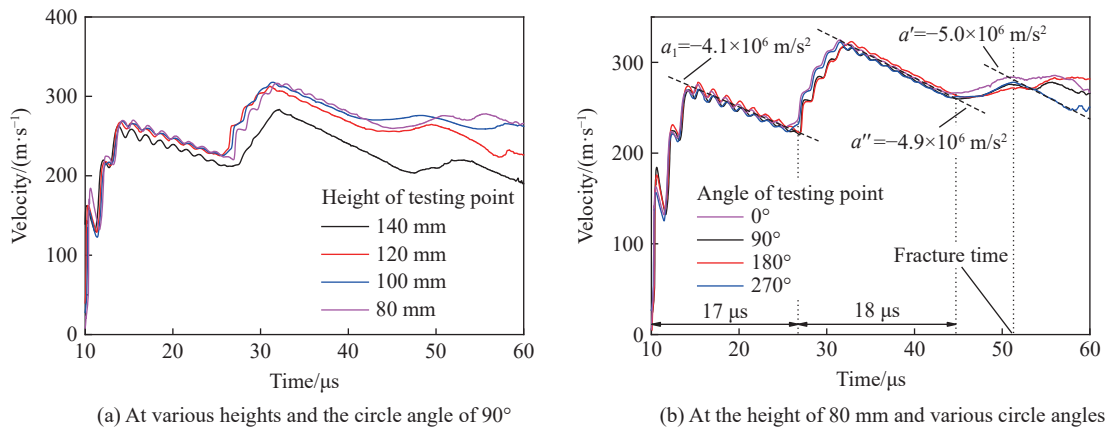
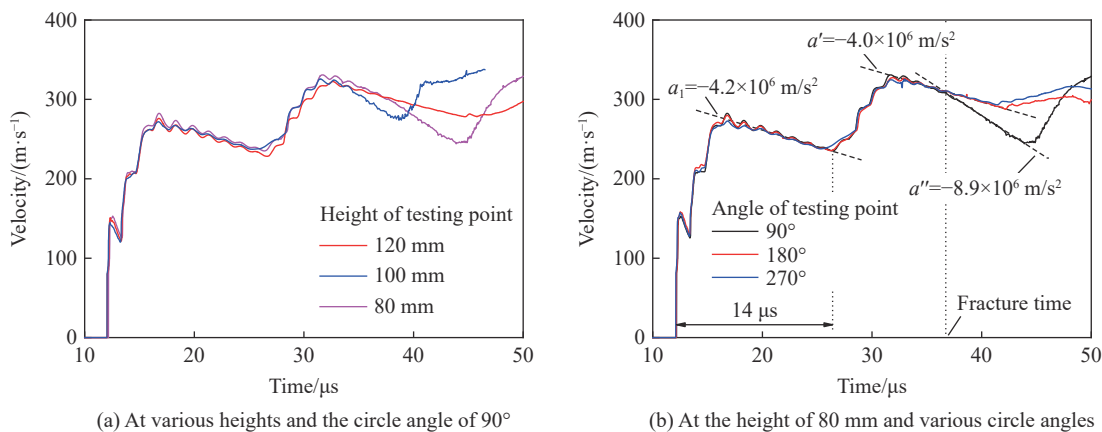


图 2 304 钢柱壳外壁的径向速度曲线

Fig. 2 The radial velocity curves of the outer surface of the 304 steel cylinder

显低于柱壳中部其他高度处的速度。45 钢柱壳的速度监测结果和高速分幅照相结果分别见图 3 和图 4。图 4(b) 中 5 条裂纹带的最早出现时刻依次为 39.2  $\mu\text{s}$  ( $45^\circ$ )、43.3  $\mu\text{s}$  ( $0^\circ$ )、47.4  $\mu\text{s}$  ( $270^\circ$ )、49.4  $\mu\text{s}$  ( $315^\circ$ ) 和 51.5  $\mu\text{s}$  ( $90^\circ$ )。各相邻裂纹带的间距估算约为 2 cm。受柱壳弧度影响, 其中  $270^\circ$  和  $90^\circ$  裂纹带的最早出现时刻判读明显滞后。

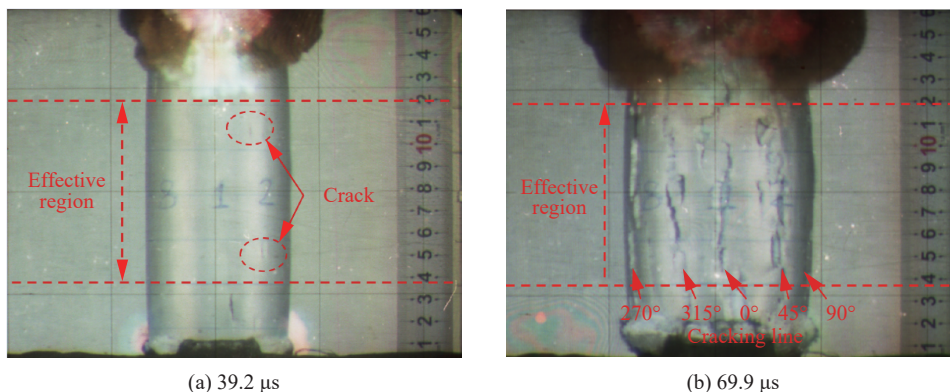


(a) At various heights and the circle angle of  $90^\circ$

(b) At the height of 80 mm and various circle angles

图 3 45 钢柱壳外壁的径向速度曲线

Fig. 3 The radial velocity curves of the outer surface of the 45 steel cylinder



(a) 39.2  $\mu\text{s}$

(b) 69.9  $\mu\text{s}$

图 4 45 钢柱壳的高速分幅照相结果

Fig. 4 The high-speed framing photography results of the 45 steel cylinder

在图 4(a) 的有效段内, 柱壳轮廓基本为直圆柱状。而在有效段外, 圆柱轮廓有轻微的直径收缩。这一形态与图 2 中速度曲线积分获得的膨胀柱壳轮廓一致, 即如图 5 中黑色曲线所示的中部平直凸出、两侧略滞后的鼓形轮廓。图 6 显示了图 2 中各速度曲线的对应位移状态。表 1 列出了柱壳有效段内各测点处的速度起跳时刻,  $t_{11} \sim t_{13}$  分别为沿环向  $90^\circ$  方向, 在 80、100 和 120 mm 高度处柱壳速度的起跳时刻;  $t_{21} \sim t_{24}$  分别为沿环向  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  方向, 在 80 mm 高度处柱壳各测点的速度起跳时刻。

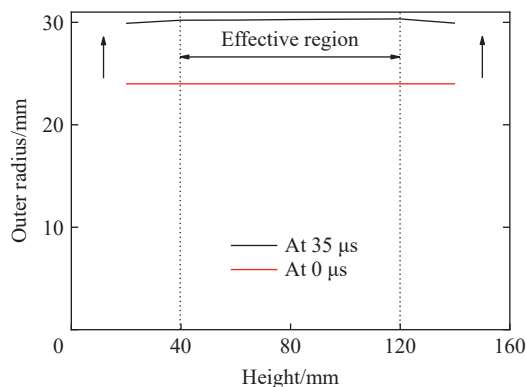


图 5 304 钢柱壳的初始轮廓与运动 35  $\mu\text{s}$  后的轮廓

Fig. 5 The contours of the outer-surface of the 304 steel cylinder at the initial state and the deformed state after 35  $\mu\text{s}$

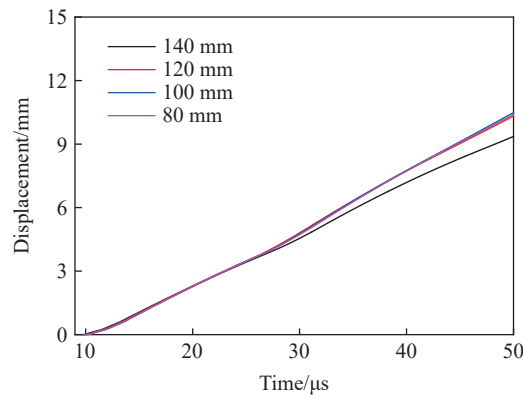


图 6 304 钢柱壳沿环向 90°方向、不同高度的外壁位移状态

Fig. 6 The displacement of the outer surface of the 45 steel cylinder at various heights and the circle angle of 90°

表 1 304 钢和 45 钢柱壳外壁各测点的速度曲线起跳时刻

Table 1 Jump-up times in velocity curves of the outside surfaces of the 304 steel and 45 steel cylinders

柱壳材料	$t_{11}/\mu\text{s}$	$t_{12}/\mu\text{s}$	$t_{13}/\mu\text{s}$	$t_{21}/\mu\text{s}$	$t_{22}/\mu\text{s}$	$t_{23}/\mu\text{s}$	$t_{24}/\mu\text{s}$
304 钢	10.27	10.17	10.09	10.27	10.27	10.14	10.25
45 钢	12.13	11.97	11.87		12.13	12.11	12.06

### 3 加载状态

加载状态分析用于确认加载满足一维柱面状态, 从而为承载结构的应力分析提供简单的状态基础。从图 2(a) 和 3(a) 来看, 80~120 mm 高度范围的各速度曲线在柱壳断裂前基本保持重合, 说明加载响应处于良好的柱面状态。而从图 2(b) 和图 3(b) 来看, 沿环向各角度的速度曲线也基本保持重合, 说明加载响应的轴对称性良好。因此, 可以定性判断 2 种钢柱壳均处于良好的一维柱面状态。

在定量判断方面, 考虑加载状态偏离一维柱面将造成波形前沿出现一定程度的空间离散。定义空间离散度为单位长度波形前沿的最大距离差。为了便于实验监测, 假定加载波在柱壳内稳定传播, 将波形前沿的最大距离差转化为最大时刻差, 得到空间离散度:

$$\psi = \frac{\Delta s}{\Delta L} = \frac{c\Delta t}{\Delta L} \quad (1)$$

式中:  $\psi$  为空间离散度,  $\Delta s$  为波形前沿最大距离差,  $\Delta L$  为  $\Delta s$  的统计长度,  $\Delta t$  为波形前沿最大时刻差(或速度起跳时刻晃动),  $c$  为应力波在柱壳中沿径向传播的速度。

按照一般小量考虑, 可接受的空间离散度应不超过 5%。因此, 由式 (1) 可得速度起跳时刻晃动的要求如下:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta L}{c} \times 5\% \quad (2)$$

考虑柱壳在自由膨胀阶段的静水压相对较低, 加载波的传播速度可简单近似为材料声速(计为 5 km/s)。对于外壁半径为 24 mm、有效段长 80 mm 的柱壳段, 分别按照沿外壁环绕一周、沿轴向 80 mm 的长度统计柱壳有效段的波形前沿最大距离差, 则可以通过式 (2) 计算出满足一维柱面状态的径向速度起跳时刻晃动上限: 沿环向的时刻晃动  $\Delta t \leq 0.24 \mu\text{s}$ , 沿轴向的时刻晃动  $\Delta t \leq 0.80 \mu\text{s}$ 。从表 1 的数据来看, 2 种钢柱壳沿环向不同角度的速度起跳时刻晃动(0.13、0.07  $\mu\text{s}$ )和沿轴向不同高度处的速度起跳时刻晃动(0.18、0.26  $\mu\text{s}$ )均小于上述 2 个限值, 表明柱壳近似处于一维柱面加载状态。

### 4 加载过程及断裂诊断分析

图 2(b)、3(b) 显示, 柱壳外壁的速度曲线呈现多峰值加载特征。根据应力波分析, 在各峰值前的加

速阶段, 尼龙层对柱壳做碰撞加载; 在峰值后的减速阶段, 柱壳与尼龙层脱离、自由膨胀并在环向拉伸应力作用下近似线性减速。减速阶段的柱壳自由膨胀特征表现为速度峰值前后的起跳时刻间隔大于应力波在尼龙层内/外壁来回反射一次的时间(约  $11 \mu\text{s}$ )以及各减速阶段相近的加速度值( $-(4.0 \sim 5.0) \times 10^6 \text{ m/s}^2$ )。

在图 3(b) 的第 2 个峰值后的减速阶段, 45 钢柱壳在初始约  $5 \mu\text{s}$  时段内保持均匀速度分布, 并且环向承载水平与第 1 个减速阶段的近似相等( $a' \approx a_1$ )。从  $37 \mu\text{s}$  时刻开始, 沿环向  $90^\circ$  方向的速度曲线呈现出较长时间的迅速下降趋势。假设此时段的柱壳仍为完整承载体, 则该方向上的环向承载水平明显高于其余 2 个方向的( $a'' \approx 2a'$ ), 而其余 2 个方向的环向承载水平未发生变化。考虑到柱壳处于自由膨胀状态, 其环向承载水平仅由柱壳承载能力控制。因此, 由  $a'' \approx 2a'$  关系可进一步推断该方向的柱壳承载力出现大幅度的阶跃强化。该推断结果与柱壳材料流动应力连续演化和柱壳质量沿环向均匀分布或连续演化(对应颈缩状态)的认识相悖, 因此说明假设错误。柱壳在沿环向  $90^\circ$  方向附近发生了初始断裂并丧失环向承载能力, 导致该方向的柱壳径向速度不受环向拉伸应力控制, 而其余 2 个方向的柱壳则保持完整、环向承载水平未发生变化。

从图 2(b) 的第 3 个峰值时刻开始, 沿环向  $0^\circ$  方向的 304 钢速度曲线呈现出较长时间的水平演化趋势(加速度值为零), 而其他 3 个方向的速度曲线则呈现自由膨胀的减速趋势( $a' \approx a_1 \approx a_2$ )。同样假设 304 钢柱壳为完整承载体, 则沿环向  $0^\circ$  方向的环向承载水平衰减至零, 而其余 3 个方向的环向承载水平与之前各减速阶段的近似相等。由此推断, 柱壳在沿环向  $0^\circ$  方向附近发生断裂、丧失环向承载能力, 而其余各方向上的柱壳则保持完整; 如假设不成立, 同样可以得出上述结论, 因此说明该结论是唯一、真实的。

为了直观展示分布式表面速度诊断方法的效果, 将高速分幅照相诊断的 45 钢柱壳断裂情况与速度诊断结果进行了对比。在空间关系上, 速度诊断的初始断裂位置与图 4(b) 中沿环向  $90^\circ$  方向的裂纹带位置重叠, 说明速度诊断的断裂位置是正确的; 在时间关系上, 速度诊断的初始断裂时刻( $37.0 \mu\text{s}$ )明显早于同方向上照相诊断的裂纹最早出现时刻(约  $51.5 \mu\text{s}$ ), 并稍早于照相诊断的初始断裂时刻( $39.2 \mu\text{s}$ ), 说明速度诊断方法可消除柱壳弧度影响, 速度诊断的初始断裂时刻为柱壳的初始断裂时刻。

表 2 是基于图 2(b) 和 3(b) 中的速度曲线诊断得到的 304 钢和 45 钢柱壳的初始断裂参数。其中, 断裂时刻根据速度曲线簇的分叉(或演化趋势变化)时刻判读; 断裂应变通过断裂时刻前的速度曲线积分获得的位移量计算; 平均应变率为柱壳外表速度起跳至断裂时刻的应变率平均值, 用来近似表征柱壳开始承载变形至断裂时刻的应变率水平。从表 2 的断裂参数看, 45 钢和 304 钢柱壳的一维柱面动态拉伸断裂性能存在明显差异。45 钢柱壳的断裂应变相对较小, 其延展性弱于 304 钢柱壳。

表 2 钢柱壳的初始断裂参数

Table 2 Initial fracture parameters of steel cylinders

材料	断裂时刻/ $\mu\text{s}$	断裂应变/%	平均应变率/ $\text{s}^{-1}$
304 钢	51	37	$0.9 \times 10^4$
45 钢	37	24	$1.0 \times 10^4$

## 5 结 论

采用电爆炸丝起爆 PETN 粉末炸药并驱动尼龙对金属柱壳加载的方式, 结合分布式表面速度监测和高速分幅照相监测, 开展了 2 种钢柱壳的膨胀断裂实验。通过实验研究, 实现了金属柱壳的一维柱面均匀加载, 建立了可监测柱壳圆周范围内初始断裂信息的分布式表面速度诊断方法, 并获得了 45 钢和 304 钢柱壳的初始断裂参数(含断裂应变、平均应变率), 具体结论如下。

(1) 基于线起爆粉末炸药并驱动尼龙加载的方式, 可在金属柱壳中部、半柱高范围内实现一维柱面均匀加载。柱壳外表速度起跳时刻的晃动满足加载状态判据要求。

(2) 基于均匀承载壳体断裂引起的局部承载失效将导致均匀分布的速度曲线簇出现分叉(或演化趋势变化)的原理, 分布式表面速度诊断方法可准确获取柱壳圆周范围内的初始断裂信息。标记沿柱壳环向分布的径向速度曲线簇出现分叉(或演化趋势变化)的时刻为断裂时刻, 标记与速度曲线簇分叉的曲线对应区域为断裂位置。

(3) 在相同的一维柱面动态膨胀加载条件下, 45 钢柱壳的断裂应变(或延展性)低于 304 钢柱壳的。

感谢金山、但加坤、郭昭亮、陈浩玉、罗振雄、张振涛、莫俊杰、李军、赵延安、谢明强、王远在实验设计、实施及结果分析方面给予的帮助。

## 参考文献:

- [1] GURNEY R W. The initial velocity of fragments from bombs: shells and grenades: Report No. 405 [R]. Aberdeen, UK: Army Ballistic Research Laboratory, 1943.
- [2] MOTT N F. Fragmentation of shell cases [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1947, 189(1018): 300–308. DOI: 10.1098/rspa.1947.0042.
- [3] GRADY D E, OLSEN M L. A statistics and energy based theory of dynamic fragmentation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29(1): 293–306. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.026.
- [4] HOPSON M V, SCOTT C M, PATEL R. Computational comparisons of homogeneous and statistical descriptions of AerMet100 steel subjected to high strain rate loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(6): 451–455. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.016.
- [5] ZHOU F, MOLINARI J F, RAMESH K T. An elastic-visco-plastic analysis of ductile expanding ring [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 880–891. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.070.
- [6] 郑宇轩, 陈磊, 胡时胜, 等. 韧性材料冲击拉伸碎裂中的碎片尺寸分布规律 [J]. *力学学报*, 2013, 45(4): 580–587. DOI: 10.6052/0459-1879-12-338.  
ZHENG Y X, CHEN L, HU S S, et al. Characteristics of fragment size distribution of ductile materials fragmented under high strainrate tension [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(4): 580–587. DOI: 10.6052/0459-1879-12-338.
- [7] ZHANG H, RAVI-CHANDAR K. On the dynamics of localization and fragmentation: IV. expansion of Al 6061-O tubes [J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163(1/2): 41–65. DOI: 10.1007/s10704-009-9441-5.
- [8] LOVINGER Z, RITTEL D, ROSENBERG Z. An experimental study on spontaneous adiabatic shear band formation in electro-magnetically collapsing cylinders [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2015, 79: 134–156. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.04.007.
- [9] TAYLOR G I. The scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor: Volume III: aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosions [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1963: 387–393.
- [10] HOGGATT C R, RECHT R F. Fracture behavior of tubular bombs [J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(3): 1856–1862. DOI: 10.1063/1.1656442.
- [11] 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.  
HU B Y, DONG Q D, HAN C S, et al. Studies of expansion and fracture of explosive-filled steel cylinders [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(1): 49–54.
- [12] BEETLE J C, RINNOVATORE J V, CORRIE J D. Fracture morphology of explosively loaded steel cylinders [C]// MARSZALEK D S. Proceedings of the Fourth Annual Scanning Electron Microscope Symposium and Workshop on Forensic Applications of the Scanning Electron Microscope. Chicago, Illinois, USA, 1971: 137–144.
- [13] 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. DOI: 10.6052/0459-1879-1999-4-1995-052.  
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. DOI: 10.6052/0459-1879-1999-4-1995-052.
- [14] 张世文, 刘仓理, 于锦泉. 微缺陷对圆管膨胀断裂的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(4): 316–323. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)04-0316-08.  
ZHANG S W, LIU C L, YU J Q. Influences of microdefects on expanding fracture of a metal cylinder [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(4): 316–323. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)04-0316-08.
- [15] GOTO D M, BECKER R, ORZECOWSKI T J, et al. Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1547–1556. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.081.

- [16] 任国武, 郭昭亮, 张世文, 等. 金属柱壳膨胀断裂的实验与数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 895–900. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0895-06.  
REN G W, GUO Z L, ZHANG S W, et al. Experiment and numerical simulation on expansion deformation and fracture of cylindrical shell [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 895–900. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0895-06.
- [17] LIU M T, REN G W, FAN C, et al. Experimental and numerical studies on the expanding fracture behavior of an explosively driven 1045 steel cylinder [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109(1): 240–252. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.07.008.
- [18] HIROE T, FUJIWARA K, HATA H, et al. Deformation and fragmentation behaviour of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1578–1586. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.002.
- [19] 张振涛, 郭昭亮, 蒲国红, 等. 爆炸丝线起爆装置研制及应用 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 035004. DOI: 10.3788/HPLPB201426.035004.  
ZHANG Z T, GUO Z L, PU G H, et al. Development and application of exploding wire initiation system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 035004. DOI: 10.3788/HPLPB201426.035004.
- [20] SINGH M, SUNEJA H R, BOLA M S, et al. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(9): 939–954. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00002-7.
- [21] FROST D L, LOISEAU J, GOROSHIN S, et al. Fracture of explosively compacted aluminum particles in a cylinder [J]. *Bulletin of the American Physical Society*, 2017, 1793(1): 120019. DOI: 10.1063/1.4971701.
- [22] 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)05-0423-06.  
JIN S, TANG T G, SUN X L, et al. Dynamic characteristics of 45 steel cylinder shell by different heat treatment conditions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(5): 423–428. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)05-0423-06.
- [23] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 172–173.
- [24] 李英雷, 胡时胜, 李英华. A95 陶瓷材料的动态压缩测试研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(3): 233–239.  
LI Y L, HU S S, LI Y H. Research on dynamic behaviors of A95 ceramics under compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(3): 233–239.
- [25] 刘宏月, 梁大开, 韩晓林, 等. 基于模量/应变波耦合特性的 FBG 碳纤维增强塑料复合材料拉伸断裂监测 [J]. *复合材料学报*, 2014, 31(1): 26–32. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3851.2014.01.004.  
LIU H Y, LIANG D K, HAN X L, et al. FBG fracture monitoring for CFRP based on coupling characteristic of modulus/strain wave [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(1): 26–32. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3851.2014.01.004.

(责任编辑 张凌云)