

空心炸药爆炸加载下 单双层金属柱壳的膨胀断裂行为*

张世文 陈艳 金山 但加坤 刘明涛 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: 采用 DPS (多普勒光纤探针测速技术, Doppler pins system) 阵列和高速摄影技术, 研究空心炸药爆轰加载下, 单、双层金属柱壳 (双层总厚度等于单层厚度) 的膨胀断裂行为, 获得了单双层柱壳外表面的速度曲线和高速摄影图像。测速曲线结果表明: 单层柱壳靠近外表面约 2/5 处产生层裂, 单层柱壳剩余残片经过约 1.89 μs 后迅速追上层裂柱壳并产生二次冲击加载, 双层柱壳的内外层柱壳之间由于无法承受拉应力而迅速分离, 外层柱壳自由径向膨胀, 内层柱壳继续在爆轰加载下经过 26.13 μs 的较长时间追上外层柱壳并进行二次加载, 单双层膨胀实验中二次加载时间差异显著。两者速度差异暗含了柱壳的膨胀断裂过程的不同: 双层柱壳的过早分离阻碍了裂纹从内至外的贯通过程, 延缓了柱壳整体的裂纹贯通直至完全断裂行为。与传统的单层柱壳断裂现象明显不同, 双层柱壳的外层膨胀断裂时呈现爆轰产物泄漏时间晚, 破片尺寸明显小于单层柱壳破裂尺寸, 溢出的爆轰产物分布较为分散和稀少, 外层柱壳整体裂纹清晰可见。采用 SPH 方法数值模拟分析表明, 在一定条件下, 单层柱壳的层裂强度越低, 二次加载时剩余残片追上层裂片时间越晚, 越不容易发生贯穿性断裂, 双层柱壳界面的间隙阻挡裂纹贯穿性发展效果显著。

关键词: 冲击动力学; DPS 阵列; 高速摄影; 断裂模式; 双层柱壳; SPH

中图分类号: O346.1 O383

国标学科代码: 13015

文献标识码: A

Expanding Fracture Behavior of Metal Cylindrical Shell with Single and Double Layer under Hollow Explosive

ZHANG Shiwen, CHEN Yan, JIN Shan,
DAN Jiakun, LIU Mingtao, Tang Tiegang

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.BOX 919-101, Mianyang, Sichuan, P.R.China, 621999)

Abstract: The detonation-driven expansion and fracture behavior of single-layer and double-layer metal cylindrical shells (with equal total thickness) were investigated via the DPS (Doppler pins system) array and high-speed photography. The velocity curves and high-speed photography images of the outer surface of the single and double-layer cylindrical shells were obtained. The results of velocity curves show that spallation occurs at positions about 2/5 of the thickness from the outer surface in the single-layer cylindrical shell. In addition, the spallation part was caught up after $\sim 1.89 \mu\text{s}$ by the remaining fragments of the single-layer cylindrical shell, leading to the secondary impact loading. In the case of double-layer cylindrical shell, the inner and outer shells of the double-layer cylindrical shell separated quickly since they cannot withstand the tensile stress. The outer cylindrical shell expands freely with high velocity at initial stage. It is then caught up by the inner cylindrical shell after 26.13 μs , leading to the secondary loading. The difference in secondary loading time is significant in the single-layer and double-layer expansion

*收稿日期: 2025-06-16; 修回日期: 2026-04-09;

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金自强项目(YZJJZQ2024001); 国家自然科学基金重点项目(No.11932018)

第一作者: 张世文 (1971-), 男, 博士, 副研. E-mail: zhangswxueshu@163.com;

通信作者 1: 陈艳 (1993-), 女, 硕士, 助理研究员. E-mail: 1028702777@qq.com;

通信作者 2: 但加坤 (1984-), 男, 博士, 副研. E-mail: eprbell@163.com

experiments. The premature separation of the double-layered cylindrical shell hinders the crack penetration from the inside to the outside, and delays the crack penetration until the complete fracture behavior of the whole cylindrical shell. In contrast to the widely investigated fracture behavior in single-layer cylindrical shell, the detonation product leakage time is late when the outer layer of the double-layer cylindrical shell expands. The fragment size of double-layer shell is obviously smaller than that of single-layer cylindrical shell. The overflowing detonation product distribution is relatively scattered and rare, and the overall crack of the outer cylindrical shell is clearly visible. The results SPH numerical simulations demonstrate that: under certain condition, the lower the spallation strength in single-layer cylindrical shells, the later the residual fragments catch up with the spalled layer during secondary loading, and the less likely penetration fracture is to occur. Meanwhile, the interfacial gaps in double-layer cylindrical shells significantly inhibit the penetration and propagation of cracks.

Keywords: Impact dynamics; DPS array; high-speed photography; Expansion fracture; double-layer shell; SPH

爆炸加载下金属柱壳的膨胀断裂现象得到大量研究, 其中对柱壳膨胀断裂模式(拉伸断裂、纯剪切断裂和拉剪混合型断裂等)^[1-5]、裂纹起始位置^[6-8]、扩展路径^[8-10]等方面研究相对较多, 不同的断裂模式发展进程不同, 进而影响到柱壳的破裂时间, 宏观上表现为爆轰产物从柱壳中泄漏的时间不同。根据柱壳沿壁厚方向的裂纹起始和发展过程, 徐皇兵研究了双层、三层柱壳在爆轰加载下的膨胀断裂过程, 通过人为设置分层界面阻断柱壳断裂进程, 达到延缓柱壳整体断裂过程, 实验表明在相同情况下, 双层管破裂时间晚于单层圆管, 但并非界面越多越好^[11]。也有研究不同装药模式对柱壳膨胀断裂的影响, 根据 gurney 理论, 炸药与柱壳质量比可以近似决定柱壳的终速度, 在炸药种类或柱壳内径确定的情况下, 为降低柱壳最终速度, 或者源于其它研究目的, 常采用空心炸药开展柱壳膨胀断裂实验。这类实验与实心炸药爆轰加载一起, 仍归属于传统爆轰加载下柱壳膨胀断裂研究范畴, 如汤铁钢^[12]、禹富有^[3]、潘顺吉^[13]开展的空心炸药爆轰加载实验。分析对柱壳膨胀断裂影响的指标主要为柱壳速度对应的应变率大小。然而, 空心炸药加载与实心炸药加载明显不同的是, 两者的爆轰加载波形(包括爆轰波幅值和脉宽)差异较大, 仅通过高速摄影获取柱壳外表面膨胀断裂分幅图像, 无法推断柱壳膨胀断裂的演化过程及机理, 也不利于从结构上设计延缓柱壳膨胀断裂的进程。众多实验结果表明, 空心炸药由于内壁为自由面反射, 压力更容易卸载到 0, 爆轰加载卸载率更大, 柱壳更容易产生层裂, 层裂和膨胀断裂的耦合增加了柱壳膨胀断裂过程的复杂性。

从国内外此领域的研究来看, 单点起爆实心炸药的滑移爆轰加载下柱壳的膨胀断裂过程获得了较多的高速摄影图像或激光测速曲线, 其中国内高速摄影以汤铁钢^[4,12]、金山^[7,14,15]拍摄图像较为清晰, 幅间距可低至 0.5 μs , 柱壳测速曲线以中物院流物所为主, 两者兼有近十年逐渐增多^[16-17], 在分析过程中, 测速曲线更多关注柱壳速度和位移大小, 与柱壳断裂过程关联相对较少。2016 年后, 由于 DPS 阵列的使用, 通过多点测速的速度分叉判断柱壳破裂时刻^[18], 张世文通过柱壳不同角度速度细微差异研究了装配垫片对柱壳膨胀断裂的影响并与高速摄影结果进行了对比分析^[19]。目前空心炸药加载下柱壳膨胀实验以高速摄影居多, 但速度曲线测试结果很少公开报道。空心与实心炸药加载下柱壳膨胀断裂的曲线差异到底如何, 通过对测速曲线差异的解读, 分析柱壳膨胀断裂的进程, 值得进一步研究。

通过不同直径光斑和不同角度间隔布置的 DPS 测速阵列、高速摄影获得空心装药爆轰加载对单双层柱壳膨胀断裂的影响速度曲线、高速摄影动态演化图像, 分析影响柱壳断裂的主要因素, 特别侧重分析单双层柱壳在空心炸药加载下的膨胀断裂影响因素。

1 实验装置和测试布局

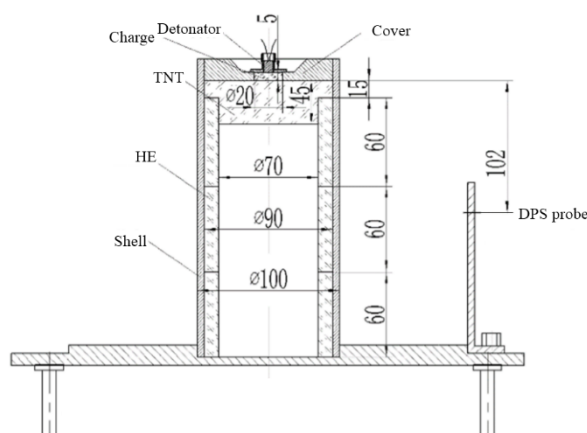


图 1 柱壳实验装置及测点布局

Fig.1 Experiment device and measuring point layout of cylindrical shell

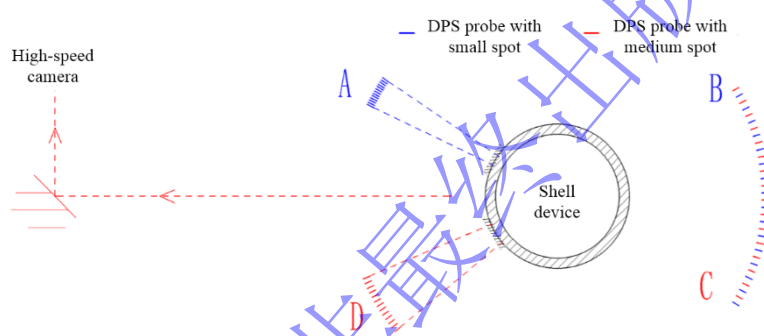


图 2 高速摄影及速度测量布局

Fig.2 Layout of high-speed photography and velocity measurement

实验装置如图1所示：单双层柱壳材料均为45钢，单层柱壳内径90 mm，外径100 mm，壁厚5 mm，高度210 mm，双层柱壳内层柱壳为 $\phi 90\sim\phi 97.5\text{mm}$ ，壁厚3.75mm，外层柱壳为 $\phi 97.5\sim\phi 100\text{mm}$ ，壁厚1.25 mm，主炸药为高能炸药PBX柱状空心炸药，内径70 mm，外径90 mm，传爆药直径20 mm，高5 mm。中心点起爆，通过厚度为45 mm的TNT过渡引爆空心炸药，高速摄影和速度测点角度分布如图2所示，其中A：13个小光斑测速探头，相邻测点间隔 0.7° ；B：16个小光斑测速探头，相邻测点间隔 4° ；C：16个中型光斑测速探头，相邻测点间隔 4° ，BC交替排布；D：13个中型光斑测速探头。文献[18]对于采用DPS阵列研究柱壳破裂时间的原理进行了详细阐述，认为柱壳表面形成不等长的破片会造成其速度的不一致性，DPS阵列布置于沿柱壳表面环向局域某个区域，保证光纤探头组能跨越多条宏观裂纹，测得表面形成裂纹后速度历史剖面的差异，获得与金属柱壳断裂有关的实时信息。高速摄影布局如图所示。采用氙灯照明系统发光作为前照明光源，白纱布作为背景屏增加对比度。转镜式分幅相机转速设定为 $1.2\times 10^5\text{ r/min}$ ，每幅图像的时间间隔为 $0.5\ \mu\text{s}$ ，可获得40幅图像，获取从表面裂纹萌生到产物严重泄漏的膨胀断裂全过程。

2 数值模拟

2.1 计算模型

略去传爆药和雷管细节，根据装置各部件尺寸采用轴对称模型进行建模，图3为空心炸药爆炸驱动柱壳计算模型，对称轴为X轴，包括TNT炸药、高能炸药、单层或双层金属柱壳，各部件均采用SPH方法，粒子尺寸为0.1mm，共计455050个粒子，TNT采用中心点起爆，当TNT中爆轰波传到高能

炸药界面时, 采用Lee-Tarver点火增长模型的压力引爆模式引爆高能炸药(采用相似的炸药相关参数, 仅为起爆阈值用), 做功能力方面仍采用高能炸药的JWL状态方程。45钢柱壳采用J-C本构模型和状态方程, 在建模时双层柱壳界面留有0.01cm的间隙, 双层柱壳尽管均为45钢, 但在编号时采用两种材料的编号, 两种材料的材料参数完全一样, 柱壳损伤模式为Grady模型的层裂损伤模式^[20], 临界失效应变取为0.15。45钢、TNT材料参数取自材料库, 高能炸药参数见文献^[21]。沿柱壳外表面布置G1-G40个gauge点, 其中G1为离柱壳上端2 mm, 间隔5 mm, G20为测速探头对应位置(102 mm)。在对单层柱壳进行数值模拟时, 将双层柱壳换为壁厚5 mm的单层柱壳, 其余材料和尺寸不变。

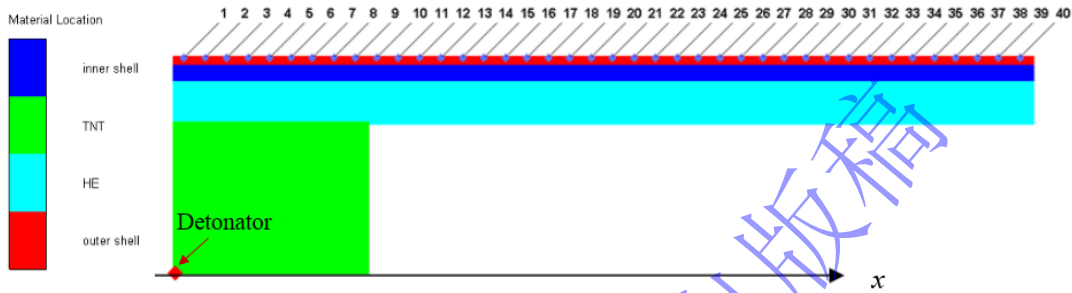


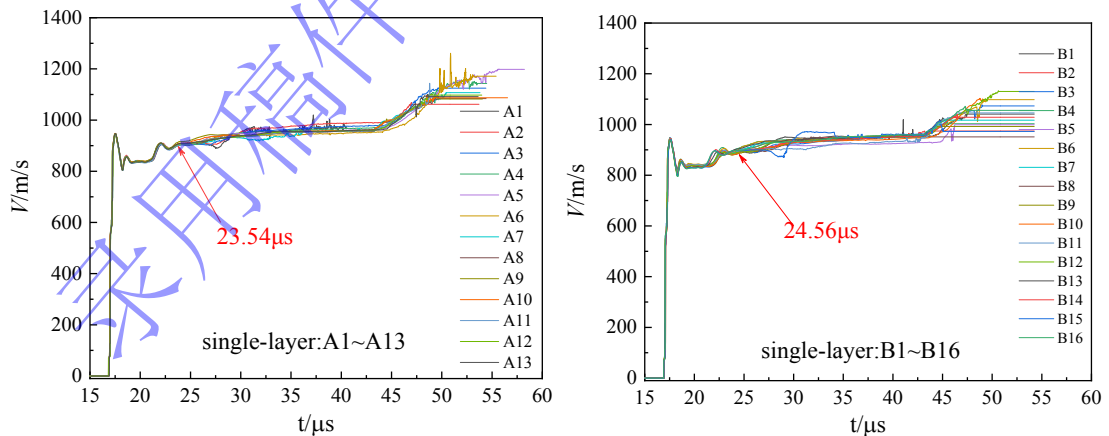
图3 空心炸药驱动柱壳计算模型

FIG.3 Calculation model of cylindrical shell driving by hollow explosive

3 实验结果和数值模拟对比分析

3.1 激光测速结果及分析

图4为A~D四种(不同直径光斑不同布局角度)测速探头在单双层柱壳膨胀断裂实验中测速曲线, 由图可知, 在同一高度上(离起爆点轴向距离102mm)的测速探头, 测速曲线基本重合, 同一类测速探头之间的分叉隐含了柱壳的膨胀断裂过程, 携带了柱壳破裂时刻及破片尺寸等信息^[22], 可以与高速摄影图像联合解读分析。从图可知, 对于A~D四种类型或布局的测试探头, 双层柱壳速度分叉时间较单层柱壳晚约2~3 μs , 表明双层柱壳破裂时间晚于单层柱壳。



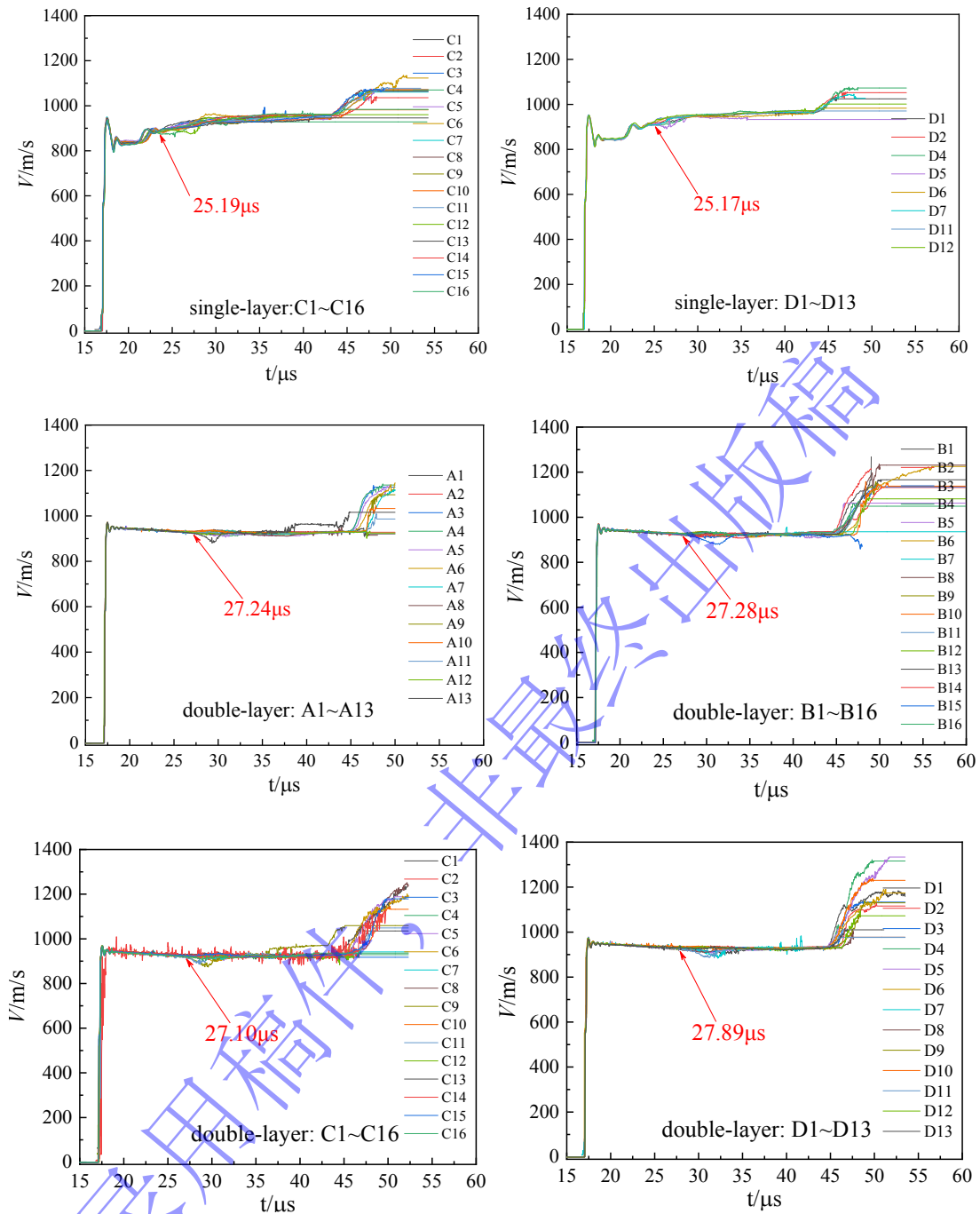


图 4 不同类型DPS阵列单双层柱壳测速结果

Fig. 4 Velocity measurement results of single and double-layer cylindrical shells with different type DPS array

针对单双层柱壳膨胀速度曲线差异，随机以B3测速探头为例进行分析。图5为单双层柱壳曲线差异，由图可知，单双层柱壳的自由面速度曲线具有明显的速度回跳现象，其中实验测速和计算速度曲线的速度降 Δu 代表了典型的层裂特征。单层柱壳在靠近外表面约2/5处产生层裂，层裂过程持续时间为 $1.18 \mu\text{s}$ ($18.687-17.51$)。单层柱壳剩余主体经过 $1.89 \mu\text{s}$ 后 ($21.565-19.671$) 迅速追上外层层裂柱壳并产生二次冲击加载，双层柱壳的外层柱壳与内层柱壳之间由于无法承受拉应力而迅速分离，外层柱壳自由径向膨胀，内层柱壳继续在爆轰加载下经过 $26.13 \mu\text{s}$ ($44.994-18.862$) 的较长时间径向膨胀追上外层柱壳并进行二次加载，单双层膨胀实验现象中二次加载时间差异显著。

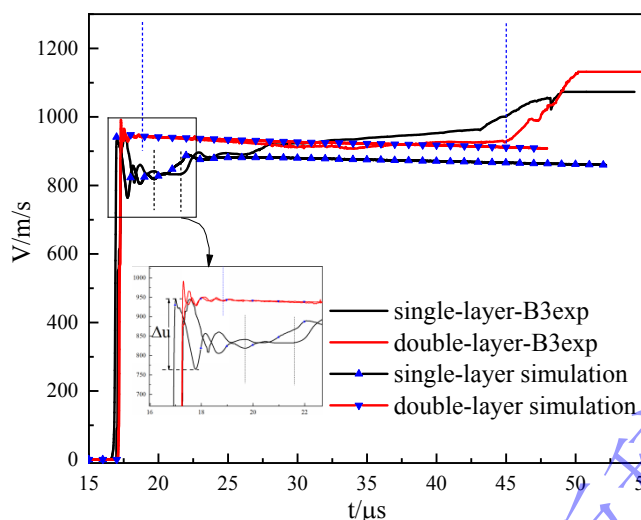


图5 单双层柱壳测速曲线实验和计算比较

Fig. 5 Comparison of experimental and calculated velocity curves of single and double cylindrical shells

图5同时列出了单双层柱壳G20（即离起爆端102mm处）外壳的速度计算，其中计算结果为在起爆15 μs到达G20点（考虑到雷管作用时间和传爆药传播时间，根据两者速度起跳差将计算结果向后平移了2.16μs），从计算和实验结果对比可知，对于单层柱壳，在17.0 μs至28 μs吻合较好，双层柱壳在17 μs至45 μs吻合较好。后期计算结果和实验测速的差异估计有三个原因，一是目前JWL炸药状态方程的CJ等熵线方程含有三项： $Ae^{-R_1\bar{v}}, Be^{-R_2\bar{v}}, C\bar{v}^{-(\omega+1)}$ ，它们依次在高、中、低的压力范围内起主要作用，但常用软件JWL状态方程中常常省略C项输入，这对于炸药驱动做功在中高压段具有足够的精度，但针对本实验，由于炸药为空心结构，引爆炸药TNT的爆轰产物做功在低压段经历足够长的加载历史，低压段对柱壳的驱动加速不可忽略，它将影响爆轰产物对柱壳后期缓慢的加载过程，补充炸药低压段能量，内层柱壳飞行速度将会提高，更容易追上外层柱壳，产生二次加载。若需要更好模拟，需对JWL状态方程进行修改嵌入商用程序或自编程序；第二，在建模时忽略了两个因素，一是起爆端压盖对该部位爆轰产物的弱约束，造成爆轰产物压力衰减过快，二是装置底座对爆轰产物的反射作用，爆轰产物在25 μs到达底座，在底座的弱约束下反射回来，将会增加驱动内层柱壳中间段的加载压力，提高内层柱壳速度，缩短内层柱壳追上外层柱壳时间。第三，由于柱壳底部嵌入装置底座大约1cm，外柱壳底端膨胀受到了限制，并进一步影响外壳其余部位运动受阻，从而导致内外柱壳首次冲击分离后内壳再次追上外壳，产生二次加载。尽管如此，从计算结果可以看出，数值模拟展示了单双层柱壳测速基本特征具有显著的差别，并不影响对实验结果的分析。

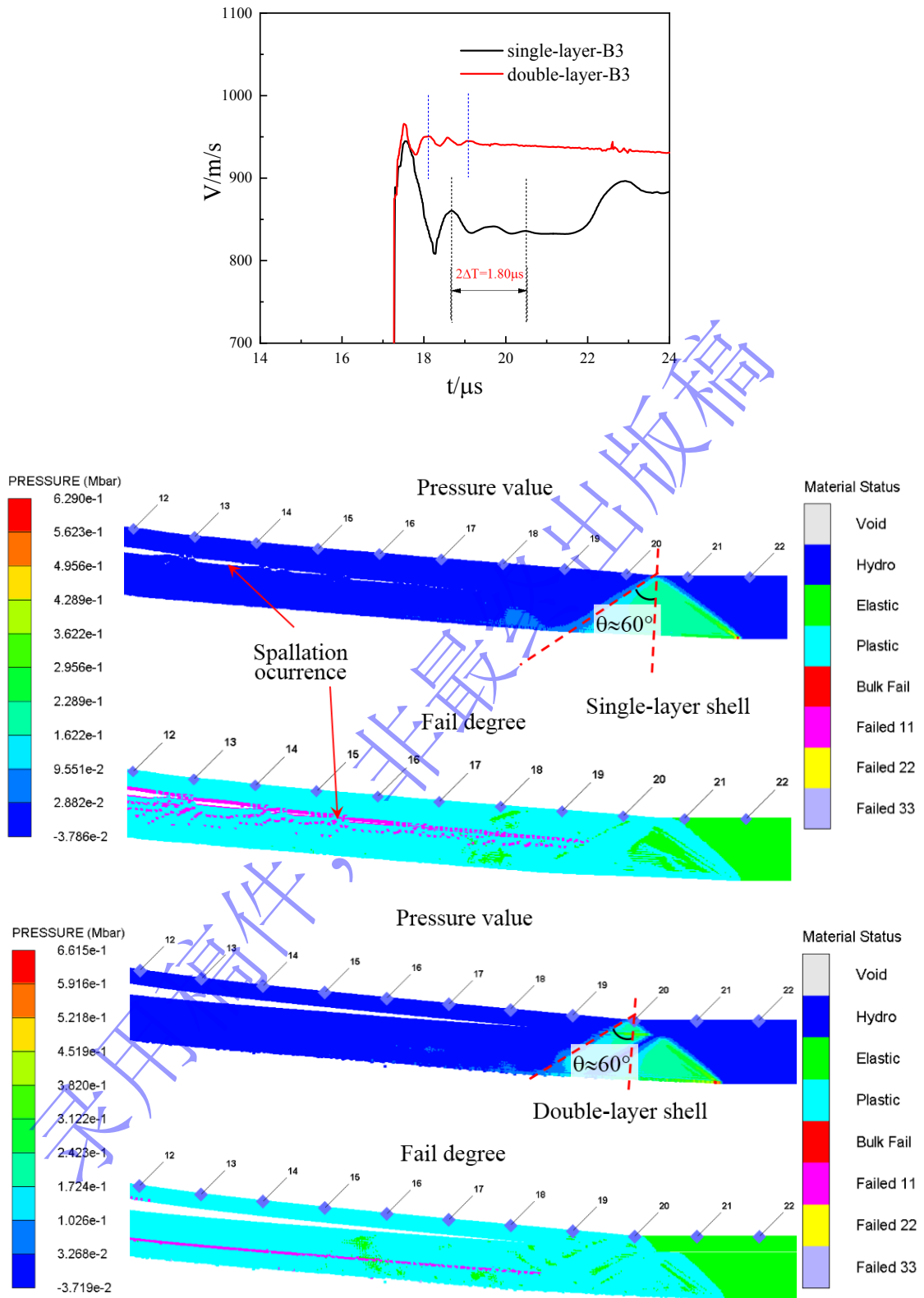


图6 单双层柱壳在起爆15 μs 时冲击波波阵面及层裂演化比较

Fig. 6 Comparison of shockwave front and spallation evolution of single or double cylindrical shells at 15 μs of detonation
为更详细阐述两者差异，结合数值模拟和测速结果进行对比分析。图6为单双层柱壳在起爆15 μs 时（考虑雷管起爆时间和传爆药传播时间，相当于实验的17.16 μs ）冲击波波阵面及层裂演化比较。由图可知，单层柱壳和双层柱壳在G20位置径向速度均有振荡信号，但不能直接根据振荡周期计算是

否发生层裂或者判断层裂片厚度。计算公式相当复杂，必须考虑冲击波波阵面与厚度方向的夹角。由计算可知，爆轰波进入柱壳后，其冲击波波阵面与厚度方向夹角 θ 约为 60° ，波阵面沿该方向经过的距离远大于单层柱壳层裂后的厚度和双层柱壳外壳的厚度。由实验和计算结果可知，对于单层柱壳，实验测得单层柱壳产生的层裂柱壳振荡周期为 $0.90\ \mu\text{s}$ ，计算振荡周期为 $1.03\ \mu\text{s}$ ，两者非常接近，由此确定的层裂柱壳厚度大约为原始柱壳厚度的 $2/5$ ，且沿着轴向不同位置，层裂柱壳厚度逐渐增加，损伤程度越来越轻。对于双层柱壳，实验测得的速度曲线振荡周期为 $0.49\ \mu\text{s}$ ，计算振荡周期为 $0.45\ \mu\text{s}$ ，由此计算的外壳厚度与双层柱壳外壳厚度相当，表明双层柱壳外壳没有发生层裂。由于爆轰产物压力衰减与实心炸药相比显著得多，柱壳测速曲线并不像实心炸药那样经过多次吸能再加速振荡过程，而是两三个周期后趋于平缓。由计算结果可知，双层柱壳内柱壳同样发生了损伤的萌芽，但受到外层柱壳的约束，损伤程度较单层柱壳弱得多，随后被再次压实。从数值模拟可以看出，在单层柱壳中间有一个损伤区间，也可能未完全层裂，对单层铜柱壳破片进行了回收，发现铜破片沿厚度方向中间有一个层裂发展不充分的损伤区，进一步证实了这个结论。

3.2 高速摄影结果及与测速曲线、数值模拟对比分析

图7为单双层柱壳在起爆 37 至 $39\ \mu\text{s}$ 时刻的膨胀图像，由图可知，双层柱壳破裂时爆轰产物零星从裂缝溢出，裂缝清晰可见。在同一时刻单层柱壳爆轰产物泄漏量明显比双层多，双层柱壳的外层膨胀断裂时破片尺寸明显小于单层柱壳破裂尺寸，通过对图中指定高度位置（该高度位置正是DPS阵列对应高度）的破片宽度进行统计，在 $37\ \mu\text{s}$ 时刻，单层柱壳破片数目为 24 个，双层柱壳破片数目为 32 个（包含即将形成的破片），双层柱壳形成的破片宽度相对小于单层柱壳。

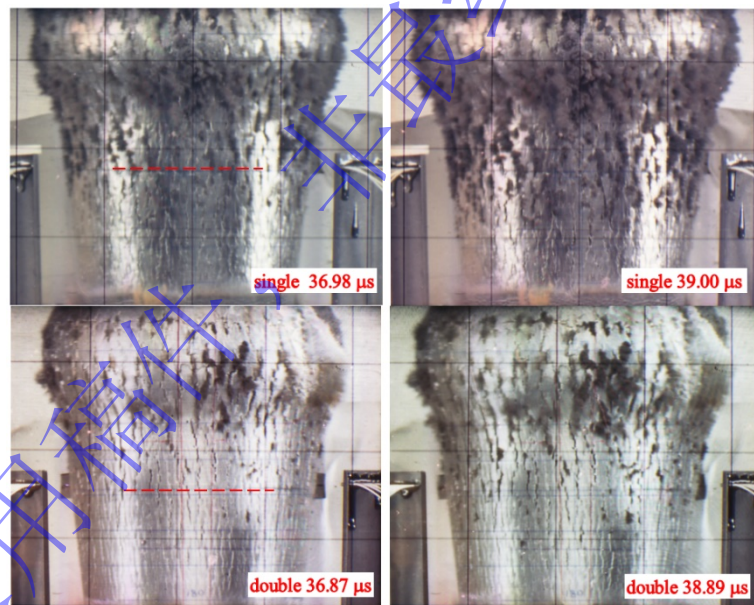
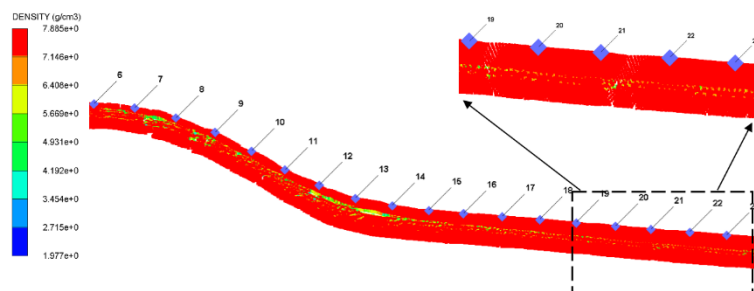
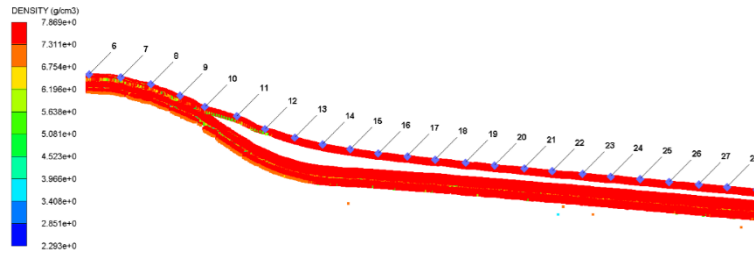


图 7 单双层柱壳在起爆 37 至 $39\ \mu\text{s}$ 时刻的膨胀图像

Fig. 7 Expansion image of single and double cylindrical shell at 37 to $39\ \mu\text{s}$ of detonation



Single-layer shell



Double-layer shell

图8 单双层柱壳在起爆35 μs飞行姿态

Fig. 8 Flight attitude of single and double-layer cylindrical shells at 35 μs of detonation

图8为单双层柱壳在起爆35 μs飞行姿态，由图可知，单层柱壳尽管有层裂的发生，但在未完全层裂时剩余残片不到2 μs迅速追上层裂片，双层柱壳由于内外层柱壳无法承受拉应力，在爆轰加载下迅速分离，且两层之间的间隙远大于单层柱壳因未完全层裂产生的距离。两者状态的不同进一步影响到柱壳膨胀断裂进程。针对双层柱壳，外层柱壳与内层柱壳长时间分离，一是可以阻断裂纹沿着与厚度方向成0°（拉伸断裂）或45°（剪切断裂）扩展路径，二是当爆轰产物从内层柱壳溢出后，在内外层之间的空腔内逐渐弥散，产物喷射速度大幅度下降，对外层柱壳内界面的冲击下降，降低外层柱壳内界面裂纹的萌芽和起始时间，外层柱壳可在无内压或少量爆轰产物的冲击下自由膨胀，损伤成核点较为分散和均匀，可充分发挥材料延展性好的优势。针对单层柱壳，裂纹的扩展可以跨过内界面附近产生的损伤、界面加工缺陷产生的损伤，甚至还能穿越已经处于疏松状态的损伤区^[3]。特别地，当爆轰产物从内界面侵入单层柱壳基体后，裂纹两侧受到挤入爆轰产物向两边扩张的压力作用，进一步增加了裂尖应力集中程度，加快了裂纹扩展速度，使得单层柱壳更容易产生贯穿性断裂。图9为单双层柱壳裂纹扩展对破片尺寸影响示意图，由图可知，单层柱壳已经充分发展的裂纹抑制了旁侧裂纹的扩展，而双层柱壳外柱壳几乎自由径向膨胀，受内层壳裂纹扩展影响较少，破片宽度与应变率及柱壳膨胀量有关。单层柱壳中由内向外的裂纹仅有部分裂纹扩展至外层，另一部分裂纹发展被抑制，造成单层柱壳破片宽度比双层柱壳大，破片数目相对少的实验现象。

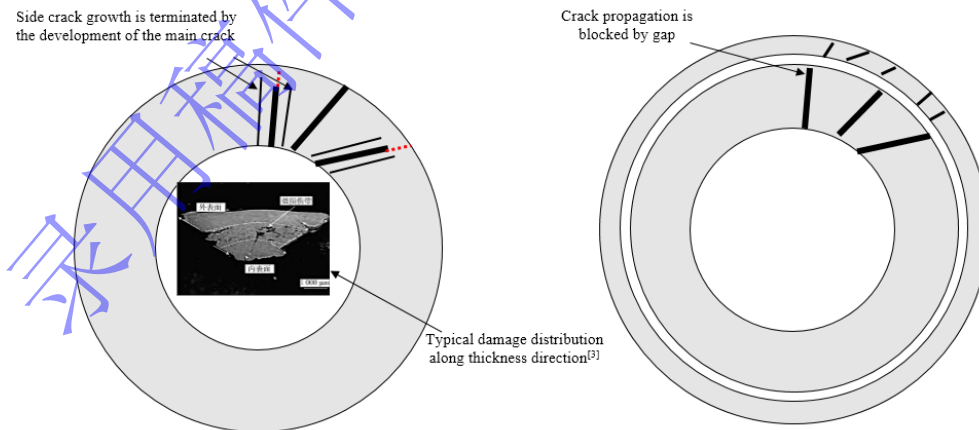


图9 单双层柱壳裂纹扩展对破片尺寸影响示意图

Fig.9 Schematic diagram of the effect of crack propagation on fragment size of single and double-layer cylindrical shells

4 影响单双层柱壳测速曲线和动态断裂过程因素讨论

4.1 单双层柱壳沿不同轴向位置的径向速度特征分析

为更详细分析单双层柱壳在空心炸药加载下不同轴线位置的动态断裂过程，本文通过对实际装置开展数值模拟，从工程设计和材料性能两方面进一步解读实验结果：一方面确认本实验装置沿轴线方向是否存在定常段，它对柱壳不同高度的动态断裂影响如何，另一方面分析这种工程结构是否会干扰和影响对单双层柱壳断裂过程差异研究。

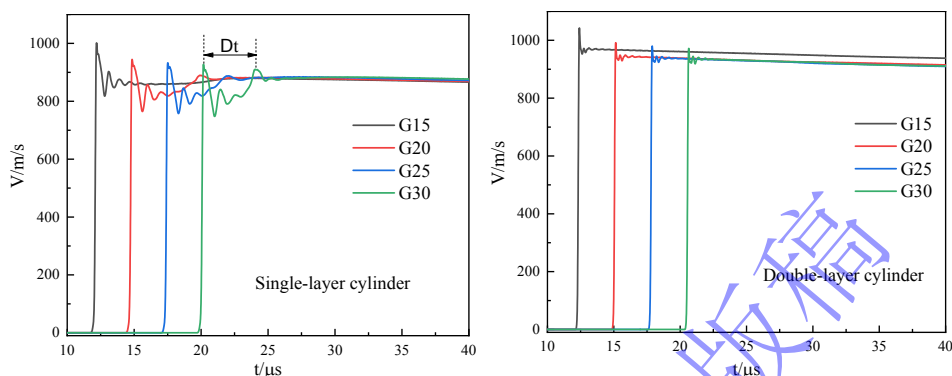


图10 单双层柱壳不同轴向位置的径向速度计算结果

Fig. 10 Calculation results of radial velocities of single and double cylindrical shells at different axial positions

图10为单双层柱壳不同轴向位置的径向速度，由图可知，对于双层柱壳，外层柱壳在内层柱壳冲击加载下长时间与内层柱壳发生分离，外层柱壳速度第一幅值主要受冲击波波阵面的影响，离起爆端越近，冲击波波阵面越垂直于壁厚方向，冲击波沿壁厚方向分量越大^[19]，外层柱壳径向速度幅值越大，随着轴向距离的增加而逐渐减小，且内层柱壳长时间无法追上外层柱壳，外层柱壳速度平台时间较长，依靠自身径向膨胀塑性增加耗散能量，速度略微下降，与传统的柱壳膨胀速度曲线明显不同。对于单层柱壳，由不同轴线位置G15~G30对应的速度曲线可知，速度第一起跳和二次起跳时间间隔 Δt 分别为 $9.81 \mu s$ 、 $5.16 \mu s$ 、 $4.43 \mu s$ 和 $4.21 \mu s$ ，越远离起爆端，爆炸冲击波波阵面与柱壳厚度方向夹角越小，越不容易产生层裂，即使发生层裂，剩余残片更容易追上层裂柱壳，再加上引爆炸药TNT爆轰流场的分布，如图11所示，本实验几乎没有较为稳定的定常段存在，不利于研究空心炸药加载下单双层柱壳动态断裂过程。但是，对于同一个轴向位置，单双层柱壳断裂过程的差异是可以明确的。

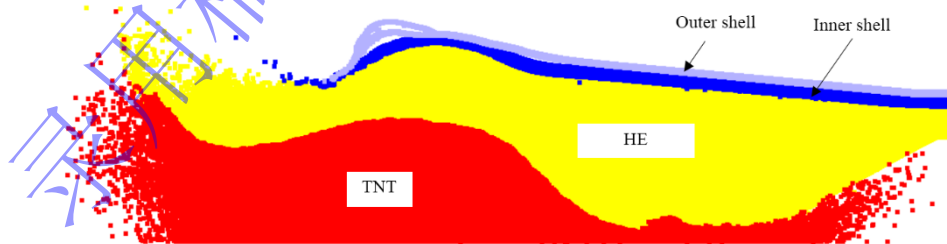


图11 起爆 $25 \mu s$ 不同物质空间分布情况

Figure 11 Spatial distribution of different substances in 25 s of detonation

4.2 层裂强度对单层柱壳动态断裂影响分析及与双层柱壳差异分析

图12为空心炸药爆轰加载下单层柱壳不同层裂强度对应的柱壳速度曲线，由Grady计算公式 ($p_s = (2\rho c_0^2 Y \cdot \epsilon_c)^{0.5}$ ，其中 ρ 、 c_0 、 Y 和 ϵ_c 分别为密度、声速、屈服强度和失效应变)可知，材料层裂强度 p_s 与失效应变 ϵ_c 的0.5次方成比例^[20]，当 p_s 增加10%和20%时，在保持 ρ 、 c_0 、 Y 参数不变情况下，失效应变分别增加至1.1²和1.2²。即三种工况下失效应变分别为0.15、0.1815和0.216。由计算曲线可知，当柱

壳材料层裂强度分别为 p_s 、 $1.1p_s$ 和 $1.2p_s$ 逐渐增加时,层裂损伤演化时间随之增加,层裂片到达速度最低值时间分别为 $15.56\ \mu\text{s}$ 、 $15.64\ \mu\text{s}$ 和 $15.71\ \mu\text{s}$,剩余残片追上层裂柱壳时间分别为 $19.88\ \mu\text{s}$ 、 $19.48\ \mu\text{s}$ 和 $18.54\ \mu\text{s}$,剩余残片追上层裂柱壳时间反而提前,层裂强度为 p_s 时,层裂柱壳从速度最低值到达二次碰撞时间差为 $4.32\ \mu\text{s}$,而层裂强度为 $1.2p_s$ 时对应的时间差为 $2.83\ \mu\text{s}$,时间缩短了 $1.49\ \mu\text{s}$ 。双层柱壳相当于在该位置层裂强度基本为0,内柱壳追上外柱壳的时间显著增加,在空心炸药加载下,柱壳膨胀断裂更容易受到层裂过程的影响,两者相互耦合增加了对柱壳膨胀断裂过程的影响机理研究。

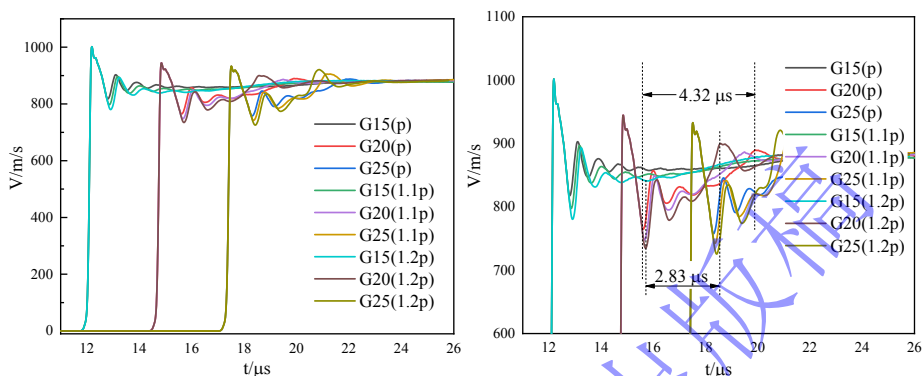


图12 单层柱壳不同层裂强度下不同位置径向速度计算曲线

Fig.12 Calculation curves of radial velocity of single-layer cylindrical shells at different positions under different spall strength

5 结论

本文开展了空心炸药爆轰加载下单双层柱壳膨胀断裂实验。根据DPS阵列测速曲线和高速摄影图片,结合数值模拟获得了如下结论:

a. 与实心炸药爆轰加载相比,空心炸药爆轰加载下,单层柱壳靠近外表面部分更容易产生层裂。在爆轰加载持续驱动下,单层柱壳剩余残片经过较短时间就能迅速追上层裂柱壳并产生二次冲击加载。双层柱壳的外层柱壳在一次加载后由于内外层界面无法承受拉伸应力,与内层柱壳分离,开始自由径向膨胀,内层柱壳继续在爆轰加载下经过较长时间才能追上外层柱壳,甚至有可能在监测时间段无法追上外层柱壳,单双层膨胀实验现象中二次加载时间差异显著;

b. 单双层柱壳速度差异暗含了柱壳的膨胀断裂过程的不同:双层柱壳的过早分离阻碍了裂纹从内至外的贯通过程,延缓了柱壳整体的裂纹贯通直至完全断裂行为。双层柱壳的外层膨胀断裂时呈现爆轰产物泄漏时间晚,破片尺寸明显小于单层柱壳破裂尺寸;

c.数值模拟分析表明,单层柱壳的层裂强度高,二次加载时剩余残片追上层裂片时间越短,由内向外的裂纹扩展路径不容易被阻碍,越容易发生贯穿性断裂,反之亦然,在合适位置出现的无法承受拉应力的双层柱壳界面阻挡裂纹贯穿性发展效果越显著。

参考文献:

- [1] T Hiroe, K Fujiwara, H Hata, et al. Explosively Driven Expansion and Fragmentation Behavior for Cylinders, Spheres and Rings of 304 Stainless Steel [J]. Materials Science Forum Vols, 2010, 638-642.
- [2] T Hiroe, K Fujiwara, H Hata, 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: 1578-1586.

- [3] 禹富有, 董新龙, 俞鑫炉, 等. 不同填塞装药下金属柱壳断裂特性的实验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1418-1424. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093. 2019. 07. 011
YU F Y, DONG X L, YU X L, et al. Fracture characteristics of metal cylinder shells with different charges [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(7): 1418-1424. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093. 2019. 07. 011
- [4] 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 T G, LI Q Z, SUN X L, 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.
- [5] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. TC4 钛合金自然破片的引燃机理[J]. 爆炸与冲击, 1995, 12(3): 254-258.
HU B Y, DONG Q D, HAN C S, et al. Analysis of the firing mechanics for ti-6al-4v natural fragments [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 12(3): 254-258.
- [6] 张世文, 金山, 刘仓理. 含缺陷厚壁圆管爆轰膨胀断裂的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2010, 27(3): 622 - 625
ZHANG S W, JIN S, LIU C L. Simulation of the dynamic expanding process of thick-walled cylinder with defects [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(3): 622-625.
- [7] 金山, 张世文, 龙建华. 缺陷对圆管膨胀断裂影响的实验研究[J]. 高压物理学报, 2011, 25(2): 188 - 192. DOI: 10.11858/gywlyxb.2011.02.017.
JIN S, ZHANG S W, LONG J H. Experimental study on the influences of defects on expanding fracture of a metal cylinder [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(2): 188-192. DOI: 10.11858/gywlyxb.2011.02.017
- [8] 吴思思, 董新龙, 俞鑫炉. 45 钢柱壳爆炸膨胀断裂的 SPH 模拟分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 103101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0172
WU S S, DONG X L, YU X L. An investigating on explosive expanding fracture of 45 steel cylinders by SPH method[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10): 103101. DOI:10.11883/bzycj-2021-0172
- [9] 李树奎, 杨卓越, 王福趾, 等. 爆破圆管管壁内分界面形成规律初探[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(4): 28-32.
LI S K, YANG Z Y, WANG F C, et al. Study on formation of interfaces in wall of exploded cylinder[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002, 25(4): 28-32.
- [10] Yin Z Y, CHEN X W. Typical fracture modes of metal cylindrical shells under internal explosive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024 (183) 104803.
- [11] 徐皇兵. 外爆加载下分层金属管膨胀破裂过程研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004: 12-19.
XU H B. Research of the Dynamic Fracture of the Layered Metal Cylinders Under Inside-Explosive Loading[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2004: 12-19.
- [12] 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 T G, GU Y, LI Q Z, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 529-533.
- [13] 潘顺吉, 俞鑫炉, 董新龙. 不同载荷下 TA2 钛合金柱壳爆炸碎裂的实验研究[J]. 高压物理学报, 2017, 31(4): 382-388. DOI:10.11858/gywlyxb.2017.04.005.
PAN S J, YU X L, DONG X L. Experimental Study of Fragmentation Behavior of Exploded TA2 Alloy Cylinders with Varied Charge[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(4): 382-388. DOI:10.11858/gywlyxb.2017.04.005.
- [14] 金山, 汤铁钢, 李庆忠, 等. 铍青铜柱壳膨胀断裂研究[J]. 高压物理学报, 2006, 20(4): 434-438
JIN S, TANG T G, LI Q Z, et al. Expanding Fracture of Beryllium Bronze Cylinder Shell[J]. Chinese Journal Of High Pressure Physics, 2006, 20(4): 434-438
- [15] 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 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.

- [16] 金山, 刘欣, 袁帅, 等. 爆轰加载下柱壳断裂时刻微小差异测量方法[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 130-134. DOI:10.11883/1001-1455(2015)01-0130-05.
JIN S, LIU X, YUAN S, et al. Method for calculating small difference of fracture time of cylinder shell unloaded by detonation [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 130-134. DOI:10.11883/1001-1455(2015)01-0130-05.
- [17] 王新颖, 王树山, 卢熹. 非标准圆筒装药爆轰驱动的试验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 897-903. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.001.
WANG X Y, WANG S S, LU X. Experimental Study of the Expansion of Non-standard Metal Cylinders by Detonation[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(5): 897-903. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.001.
- [18] 任国武, 郭昭亮, 汤铁钢, 等. 高应变率加载下金属柱壳断裂的实验研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 77-82. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.01.012.
REN G W, GUO Z L, TANG T G, et al. Experimental Research on Fracture of Metal Case under Loading at High Strain Rate[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(1): 77-82. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.01.012.
- [19] 张世文, 金山, 陈艳, 等. 爆炸加载下装配垫片对金属柱壳膨胀断裂影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(8): 083102. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0456.
ZHANG S W, JIN S, CHEN Y, et al. Influence of a cushion on dynamic expansion and fracture of an explosively-driven metallic cylinder[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(8): 083102. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0456.
- [20] 贺年丰, 任国武, 陈永涛, 等. 爆轰加载下金属锡层裂破碎数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(4): 042101. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0354.
HE N F, REN G W, CHEN Y T, et al. Numerical simulation on spallation and fragmentation of tin under explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(4): 042101. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0354
- [21] 张世文, 华劲松, 刘仓理, 等. 金属圆管内爆轰波相互作用效应的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 219-225.
ZHANG S W, HUA J S, LIU C L, et al. A numerical simulation of the metallic tube expansion induced by inside head-on hitting two detonation waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 219-225.
- [22] REN G W, GUO Z L, FAN C, et al. Dynamic shear fracture of an explosively-driven metal cylindrical shell[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016(95): 35-39