

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0311

吸能包装模型结构的冲击响应*

谢若泽^{1,2}, 钟卫洲^{1,2}, 黄西成^{1,2}, 张方举^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 利用空气炮冲击实验对吸能包装结构的跌落过程进行模拟, 进行了缩比模型的正撞和 30°斜撞实验, 针对模型实验进行了数值分析, 获得了吸能包装结构模型在撞击过程中的应力分布和塑性变形, 并将计算情况与实验结果进行了分析。结果表明: 在撞击中吸能包装结构主要通过缓冲木材的塑性变形及外钢壳屈曲产生的塑性铰吸收能量, 塑性变形主要集中于撞击端, 而远离撞击端未见塑性变形; 计算中木材本构参数采用顺纹方向压缩应力应变曲线具有一定的有效性。

关键词: 吸能包装结构; 冲击; 模型实验; 斜撞

中图分类号: O347

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

各类产品, 尤其是武器装备, 从研制到使用通常会经历交通运输(空运、车载)和装卸过程, 在此过程中可能会遭遇意外事故、经历异常环境, 为此需采用包装结构对产品进行有效保护, 而包装结构对这些极端情况的耐受性, 将很大程度上决定产品的安全性和有效性^[1-4]。

包装结构及其内容物经历的异常环境通常包含跌落、火烧、水浸、穿击等, 这就要求抗事故包装结构具有承载、耐高温、防火、隔热、抗冲击等功能。国外针对军用抗事故包装结构的研究始于 20 世纪 60 年代, 并于 20 世纪 70 年代投入生产使用, 王宝乾^[5]对之进行了分析总结。国内针对抗事故包装结构也进行了相应的研究, 如李明海等^[6-7]对火灾环境下包装结构的热响应进行了研究, 建立了热模型以及相应的计算方法; 胡宇鹏等^[8]研究了具有内热源的包装结构在不同压力下的传热特性; 张鹏等^[9]采用 ANSYS 软件对空空导弹包装箱在储运过程中的力学环境进行了有限元分析; 李娜等^[10]探索了包装结构跌落碰撞过程中屈服靶体与非屈服靶体速度关系等效的数学方法。

包装结构的冲击吸能能力是抗事故包装箱研究中的一个重要方面, 学者们采用实验、数值模拟等手段进行了各种研究。Michael 等^[11]给出了 1/4、1/8 比例模型以及全尺寸包装箱的冲击实验结果并进行了有限元分析, 鲍平鑫等^[12]利用 CATIA 建立三维模型, 运用 ADAMS 对军用爆炸品包装箱铁路运输冲击进行了仿真研究, 葛任伟等^[13]基于能量转化的思想分析了抗事故包装箱跌落的典型情况, 给出了端面跌落和底面跌落时缓冲层厚度的计算公式。

一般来说, 对包装箱实物进行全尺寸实验是最可靠的方法, 但原型实验不仅实验周期长, 而且代价高昂, 甚至难以进行, 因此在吸能包装结构的设计过程中, 采用模型实验和数值模拟两种方法相互配合是很有必要的。分析吸能包装结构的跌落, 其本质即为包装结构与地面的碰撞过程, 而这种碰撞过程可以采用跌落以外的其他加载方式加以模拟。本文在 $\varnothing 120$ mm 空气炮上对包装结构跌落进行模型实验: 对包装结构进行简化和缩比, 确定模型试件, 将其作为空气炮的弹丸, 利用空气炮进行发射, 撞击钢靶产生冲击碰撞, 利用冲击响应过程模拟吸能包装结构跌落过程。在此基础上, 根据模型实验工况开展相应的数值模拟, 求解包装结构模型在撞击过程中的应力分布和塑性变形情况, 并与模型实验结果进行对比。

* 收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(11472257, 11572299)

第一作者: 谢若泽(1970—), 男, 硕士, 研究员, xierz@caep.cn;

通信作者: 钟卫洲(1978—), 男, 博士, 研究员, zhongwz@caep.cn。

1 实验模型

模型实验是一种周期短、成本低的实验方法,能抓住物理本质,为数值模拟提供验证用实验数据,提高数值模拟置信度。模型实验的基本方法是根据相似性原理,模拟结构的几何形状、材料的物理力学特征以及载荷的作用形式,通过室内实验来获得模型的力学规律,为预测原型的变形和破坏提供资料^[14-16]。针对抗事故包装箱的跌落冲击问题,周政等^[17]进行了详细的量纲分析,建立了相似准则,并通过数值模拟证明了抗事故包装箱原型和模型的应力水平一致性。

模型实验时很难做到完全满足相似条件,实际应用中的模拟多是既使模拟能够进行,又不致引起较大偏差的近似模拟方法。本文的试件根据空气炮口径进行缩比,并保证结构的最小厚度,并未严格按照相似准则进行缩比;基于质量等效考虑,将被保护体采用一定质量的 45 钢圆柱替代;同时给予包装缓冲结构一定安全系数,以确保模型试验结果能为原型结构冲击安全评估提供支撑。

缩比后的模型弹如图 1 所示,包括外钢壳、云杉木材和被保护体。外钢壳尺寸为 $\varnothing 120 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$,厚度为 1 mm,材料为 20 钢;被保护体为 $\varnothing 72 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ 圆柱体,材料为 45 钢;外钢壳与被保护体之间填充云杉木材,木材的顺纹方向(生长方向)指向被保护体,即被保护体上面和下面木垫层的木材纹路平行于试件轴向,指向被保护体上下表面,被保护体周边的木材纹路则与试件直径方向相同,指向试件圆弧表面。木材与筒体之间、木材与被保护体之间采用环氧树脂胶粘接,钢盖与钢筒之间采用焊接。图 2 为模型弹实拍照片。

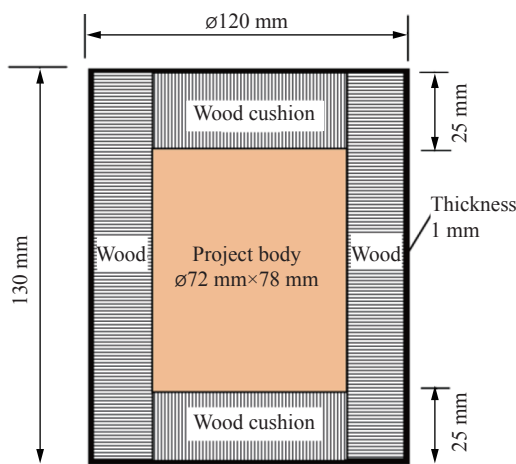


图 1 基于包装结构缩比模型的弹丸

Fig. 1 Projectile based on scaled model of container



图 2 试验弹照片

Fig. 2 Photo of experimental projectiles

2 实验设备及设计

模型实验在 120 mm 口径的空气炮上进行,测试仪器包括测速仪、高速摄影机、压力传感器等。弹丸速度由红外线测速仪测定,弹丸的撞击过程由高速摄影记录。对于撞击速度低于 50 m/s 的正撞实验,在靶架和靶板之间加装压力传感器,以获取撞击过程中弹丸的受力情况;对于撞击速度高于 50 m/s 的正撞,因为撞击力太大,超过压力传感器的量程,故取消传感器;斜撞实验极易造成传感器的破坏,因此也未测量其受力情况。

实验设计撞击工况为正撞和 30°斜撞两种,斜撞通过调整撞击靶板的法向与炮管轴向的夹角来加以实现。靶板材料为 Q235 钢。

图 3 为正撞实验靶板安装图。图 3(a) 为低速正撞实验,压力传感器安装在靶板与靶架之间,靶板为圆形靶板;网格板为高速摄影所用的背景,格线距离为 15 mm。图 3(b) 为高速正撞实验,靶板为方形钢

板, 靶厚 20 mm, 通过螺栓直接安装在靶架上。

图 4 为 30°斜撞实验靶板安装图。靶厚 30 mm, 通过筋板固定在靶架上, 靶板法向从水平线(炮管轴向)向下偏转 30°。

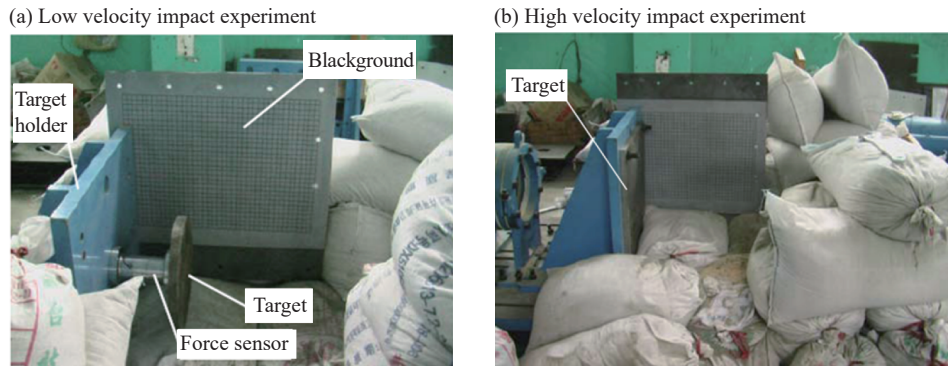


图 3 正撞实验靶板安装图

Fig. 3 Targets in normal impact experiments

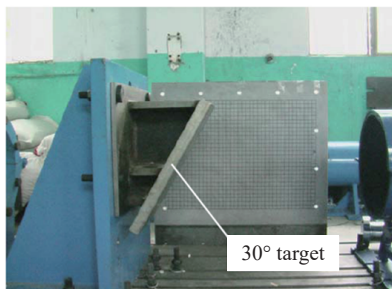


图 4 30°斜撞实验靶板安装图

Fig. 4 Target in oblique impact experiments

图 6 为实验后的试件形貌。可看到其变形的共同特点是撞击端发生局部屈曲, 其中 1 号试件的直径在距尾端(即图中的底端)120 mm 的范围内均未发生变化, 仅在撞击端略有鼓出, 其最大直径为 121.8 mm; 2 号试件的屈曲程度大于 1 号试件, 其直径在距尾端 116 mm 的范围内未发生变化, 在撞击端则鼓出形成皱折, 其最大直径为 125 mm; 3 号试件撞击速度进一步提高, 实验后撞击端端盖完全脱落飞出, 且后端盖整体向内凹, 其直径在距尾端 110 mm 的范围内未发生变化, 再往撞击端则略微鼓出, 在距尾端 115 mm 的地方则迅速膨出, 形成皱折, 其最大直径为 128 mm。也即, 随着撞击速度的提高, 局部屈曲的影响范围逐步提高, 表现在试件直径的变化范围沿轴向从 10 mm 逐步提高到 14 mm、20 mm。

3 实验结果

模型实验对正撞和斜撞分别进行了三种速度的实验, 其参数如表 1 所示。

3.1 正撞

正撞实验的撞击过程如图 5 所示, 可以看出弹体在飞行和碰靶姿态稳定, 能保证弹轴与靶面法线平行一致。图 5 中高速摄影的拍摄频率为 $5\,000\text{ s}^{-1}$, 为展示完整过程, 图中摘取的图像并非时间上等间隔的。

表 1 弹丸撞击速度

Table 1 Impact velocity of projectile

撞击方向	弹号	质量/g	气压/MPa	弹速/(m·s ⁻¹)
正撞	1 [#]	3 405	0.20	30.4
	2 [#]	3 415	0.30	44.5
	3 [#]	3 450	0.55	68.0*
30°斜撞	4 [#]	3 370	0.20	30.3
	5 [#]	3 410	0.30	44.1
	6 [#]	3 420	0.55	63.4

注: *测速系统未采到数据, 此为根据高速摄影估算。

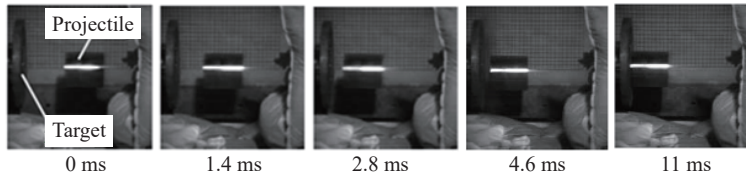


图 5 试件正撞过程高速摄影照片

Fig. 5 Process of normal impact

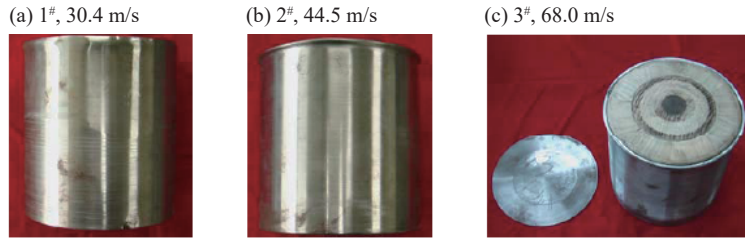


图 6 正撞实验后模型弹形貌

Fig. 6 Recovery projectiles after normal impact experiment

靶板后压力传感器所测得的载荷时间曲线 (2 号弹) 如图 7 所示, 撞击过程持续时间约为 0.7 ms, 其峰值载荷为 576 kN, 撞击过程平均载荷为 294 kN。

图 8 为试验后解剖的弹体内部结构变形与撞击端木垫层形貌图。图中显示, 撞击远端木垫层和周边保护层没有明显的变形, 而撞击端木垫层已可见贯穿性裂纹, 周边部分材料已与主体分离, 且中部材料已产生较大压缩, 周边形成压塞环。三个试件的压塞环高度分别为 2.0、4.2、8.7mm。而被保护体未产生变形。

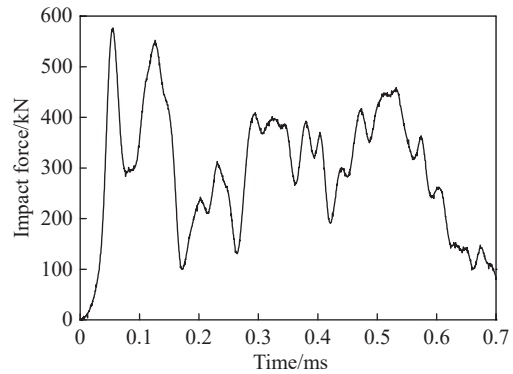


图 7 2#弹正撞实验撞击力历程

Fig. 7 Impact force history in normal impact experiment (projectile 2#)

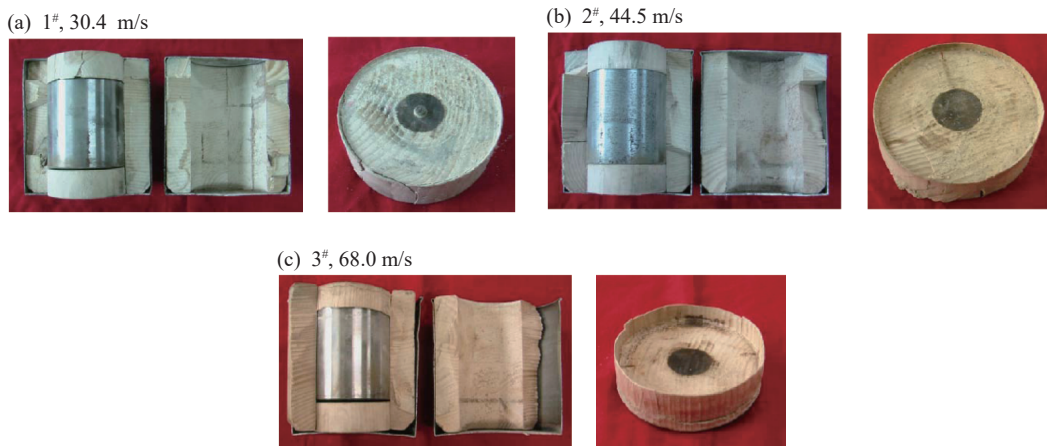


图 8 正撞实验后弹体内部结构

Fig. 8 Internal structure of recovery projectiles of normal impact experiment

3.2 30°斜撞

30°斜撞实验的撞击过程如图 9 所示, 弹体撞击端上部与靶体发生直接碰撞, 反弹回落于靶面下侧。图 9 中高速摄影的拍摄频率为 $5\,000\text{ s}^{-1}$, 为展示完整过程, 图中摘取的图像并非时间上等间隔的。

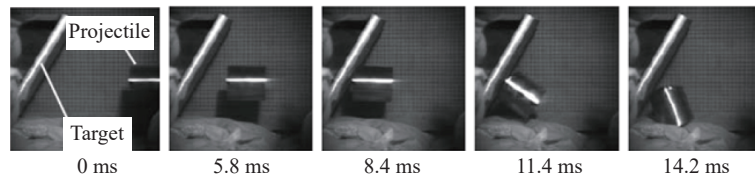


图 9 试件斜撞过程高速摄影照片

Fig. 9 Process of oblique impact

图 10 为实验后的试件形貌。可见: 撞击端形成撞击斜面, 产生压缩变形, 且斜面面积和压缩变形量随着撞击速度的增大而增大; 斜面的圆弧部分产生皱折, 试件总高度略有增加; 其他部分变形不明显。撞击速度达到 63.4 m/s 时, 斜面上出现一个向前突出的月牙面, 如图 10(d) 中箭头处所示, 月牙面的平台角度垂直于试件轴线, 应为内部被保护体向前冲击形成, 经检查, 靶面也形成了相应的凹坑; 撞击端向前凸出, 撞击端盖部分焊接边沿已经崩裂。三种撞击速度下, 弹体外径没有发生明显变化的轴向长度分别为 99 、 97 和 84 mm , 即距离撞击端超过 46 mm 的弹体外壳不会产生塑性变形。

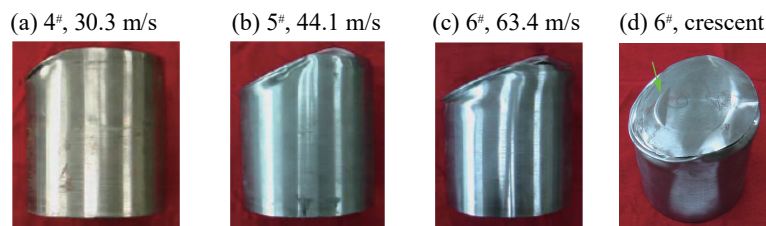


图 10 斜撞实验后弹体形貌

Fig. 10 Recovery projectiles after oblique impact experiment

解剖后观察弹内形貌如图 11 所示, 可以发现整个撞击端已经发生较大变形, 在撞击端木垫层处形成了空腔, 木垫层压缩成楔形, 楔尖部分已被压塌, 且楔体已产生部分崩裂。当撞击速度为 30.3 和 44.1 m/s 时, 被保护体未发生变形。当撞击速度达到 63.4 m/s 时, 楔尖厚度不到 5 mm , 不仅楔尖部分已被压塌, 而且环形保护层的前端也大部分被压塌。更严重的是, 被保护体撞击角也发生了明显变形, 形成撞击斜面, 前端直径变大, 最大直径达到 73.6 mm 。

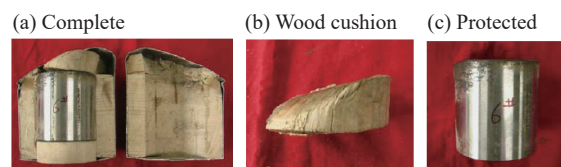


图 11 斜撞实验后弹体解剖照片 (63.4 m/s)

Fig. 11 Internal structure of recovery projectiles after oblique impact at the velocity of 63.4 m/s

4 数值模拟

采用 ABAQUS/Explicit 有限元分析软件对模型实验情况进行了数值模拟, 计算吸能包装结构模型在不同速度、姿态下撞击靶体的动态响应, 给出了吸能包装结构模型各部件等效塑性应变分布。计算中靶体模型为 $\varnothing 1\,000\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 钢板, 材料为 Q235。依据正撞击和 30° 斜撞击实验条件和相应的结构尺寸建立有限元模型, 两种角度撞击有限元模型见图 12 和图 13。

在有限元模型中木材与外钢壳、被保护体间考虑为接触, 将外钢壳作为整体建立模型, 忽略结构中的焊接影响。计算中采取的材料参数如表 2 所示, 其中: ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_s 为屈服强度, E_p 为塑性模量, 失效应变为等效塑性应变, 通过实验测试和数值计算对比修正获取, 主要描述塑性

大变形情况对相关材料单元失效行为, 45 钢在参考应变率(1 s^{-1})下屈服强度参数 A 取为 507 MPa、硬化模量 B 为 320 MPa、应变硬化指数 n 取为 0.32、应变率相关系数 C 为 0.064, 失效应变参数 D_1 取为 0.24、 D_2 取为 0.72、 D_3 取为 1.62。由于模型中云杉材料顺纹方向垂直于被保护体, 实验中木材主要受力方向也垂直于被保护体, 因此计算中云杉材料参数采用实验测试得到的顺纹方向压缩曲线^[18]。

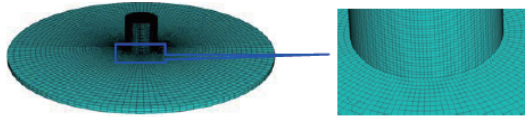


图 12 正撞整体模型网格图

Fig. 12 FEA meshes for normal impact

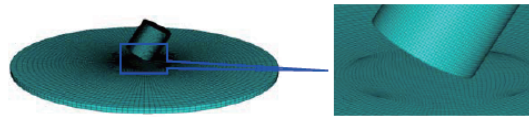


图 13 30°斜撞整体模型网格图

Fig. 13 FEA meshes for oblique impact

表 2 弹靶材料力学性能参数

Table 2 Material properties of projectiles and targets

材料名称	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_s/MPa	E_p/MPa	失效应变
45钢	7 810	212	0.3		Johnson-Cook模型	
云杉	413	11.33	0.1		采用实验测试顺纹方向压缩曲线	
Q235	7 800	210	0.3	235	2 100	0.8
20钢	7 850	211	0.286	245	2 110	0.4

数值模拟中, 为了校核数值模拟参数设置的有效性, 结合图 7 测试撞击力曲线, 针对相同工况进行数值模拟给出了相应的冲击力曲线, 见图 14 所示。可以看出由于撞击过程涉及包装结构材料大变形破坏, 导致冲击过程中撞击力曲线振荡略有差异, 但撞击力脉宽和峰值基本一致, 可以看出数值模拟结果具有较高可信度。

图 15 为对正撞击 (68.0 m/s) 过程进行数值模拟得到的试件变形与实验结果的对比图, 可以看出由于模型试验结构端盖焊接强度较弱, 导致端盖脱落, 但从总体变形情况两者符合较好, 从计算得到的等效塑性应变分布可以看出撞击端在高压作用产生环向膨胀, 造成撞击端面圆周产生较大应变, 在正撞击情况下属于结构的薄弱部位。实验后得到撞击端屈曲后的最大直径为 128 mm, 试件总高度为 125 mm, 计算结果撞击端屈曲后的最大直径为 132 mm, 试件总高度为 124 mm, 计算与实验结果吻合较好。

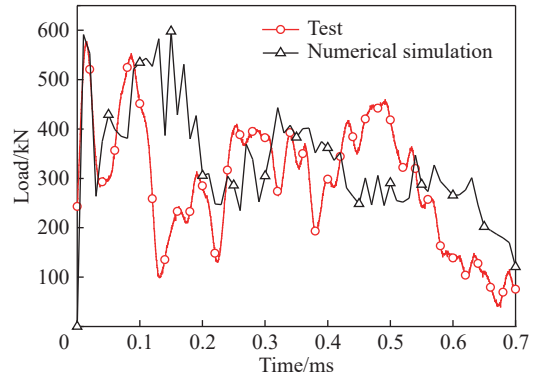
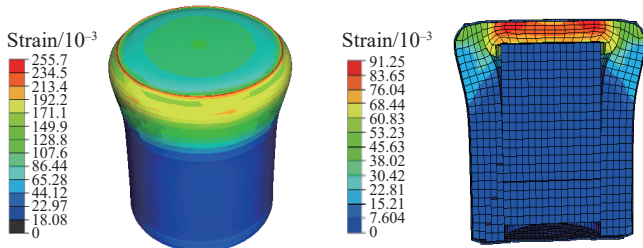


图 14 2#弹撞击力试验测试与数值模拟比较

Fig. 14 Impact force comparison between experiment and numerical simulation (projectile 2#)

(a) Numerical simulation



(b) Experiment

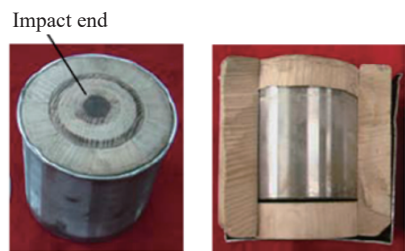


图 15 整体变形计算与实验结果对比图 (68.0 m/s, 正撞)

Fig. 15 Comparison of global deformation between simulation and experiment of projectile (68.0 m/s, normal impact)

对斜撞 (63.4 m/s) 过程进行模拟, 所得的试件变形情况与实验对比如图 16 (图中实验照片里的木垫层已取出示于图 17 中), 可以看出与实验破坏相对应位置产生的塑性变形较大。撞击端木垫层变形情况的对比见图 17, 木垫层在斜撞击作用下发生大变形, 变成楔形状, 实验后所得楔尖厚度不到 5 mm, 楔尾厚度为 24.6 mm, 计算结果楔尖厚度为 4.9 mm, 楔尾最厚处为 24.5 mm, 计算与实验结果吻合较好。

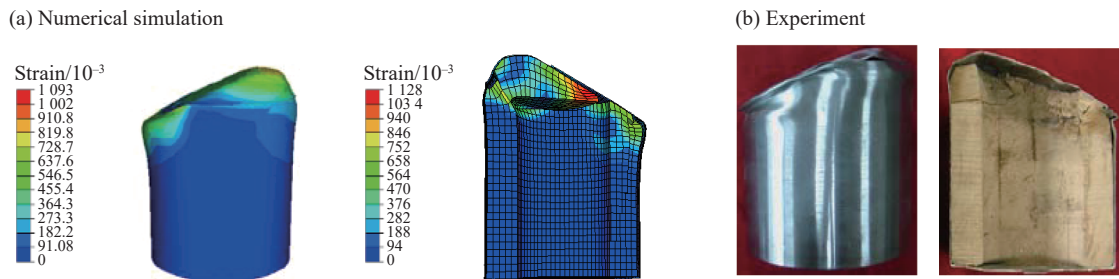


图 16 整体变形计算与实验结果对比图 (63.4 m/s 斜撞)

Fig. 16 Comparison of global deformation between simulation and experiment of projectile (63.4 m/s, oblique impact)

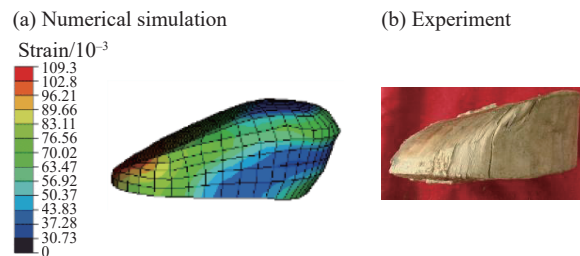


图 17 撞击端木垫层变形图 (63.4 m/s 斜撞)

Fig. 17 Deformation of cushion at the collided end (63.4 m/s, oblique impact)

5 结论与讨论

本文利用空气炮对吸能包装结构的跌落过程进行模拟, 进行了缩比模型的正撞和 30°斜撞实验, 获得了对模型碰撞的直观认识, 针对模型实验进行了数值分析, 获得了吸能包装结构模型在撞击过程中的应力分布和塑性变形, 并将计算情况与实验结果进行了分析, 结果表明:

(1) 在撞击中吸能包装结构主要通过缓冲木材的塑性变形及外钢壳屈曲产生的塑性铰吸收能量, 其塑性变形主要集中于撞击端, 发生塑性变形的最大轴向范围在正撞时为 20 mm, 斜撞时为 46 mm, 而远离撞击端未见塑性变形; 正撞时, 撞击端发生局部屈曲, 撞击端木垫层形成压塞环, 但被保护体在三种速度下均未发生变形; 斜撞时, 撞击端形成撞击斜面, 撞击端木垫层压缩成楔形, 结构变形及破坏程度随撞击速度提高而增大, 当撞击速度为 30.3 和 44.1 m/s 时, 被保护体未发生变形, 当撞击速度达到 63.4 m/s 时, 被保护体也形成了明显撞击斜面;

(2) 数值模拟中, 木材本构参数采用实验测试获得的顺纹方向压缩应力应变曲线, 模拟结果与实验结果吻合较好, 说明当木材放置方式为顺纹方向垂直于被保护体面时, 木材本构参数采用顺纹方向压缩应力应变曲线具有一定的有效性。

在本文中, 木材顺纹方向垂直于被保护体面, 而木材具有正交各向异性, 将之作为缓冲材料使用时, 需针对被保护体所能承受的应力、应变峰值要求, 研究不同的木材放置方向对吸能性能的影响, 以达到更好的缓冲保护效果。

参考文献:

- [1] JOSEPH C, MALONEY Jr. The History and Significance of Military Packaging: TECHNICAL REPORT 1-96 [R]. Fort

- Belvoir: Defense Systems Management College Press, 1996.
- [2] 肖冰, 黄晓霞, 彭天秀. 国外弹药包装的现状与发展趋势研究 [J]. *包装工程*, 2005, 26(5): 220–227. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3563.2005.05.088.
- [3] 周定如, 蔡建, 赵耀辉, 等. 美国军用包装技术发展的经验和启示 [J]. *包装工程*, 2010, 31(7): 80–83.
ZHOU Dingru, CAI Jian, ZHAO Yaohui, et al. Enlightenment from the experience in development of U.S. military packaging technique [J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(7): 80–83.
- [4] 苏远. 缓冲包装理论基础与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1–15.
- [5] 王保乾. 有效载荷抗事故包装箱的环境与环境试验 [J]. *环境技术*, 1995(4): 7–12.
WANG Baoqian. Environments and environmental test of accident-resistant containers for payload [J]. *Environmental Technology*, 1995(4): 7–12.
- [6] 李明海, 翟贵立, 宋耀祖, 等. 抗事故包装箱热防护结构的设计及其性能分析 [J]. *包装工程*, 2000, 21(2): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3563.2000.02.002.
LI Minghai, ZHAI Guili, SONG Yaozu, et al. Design and performance analyses of thermal protection structure of accident-resistant packaging container [J]. *Packaging Engineering*, 2000, 21(2): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3563.2000.02.002.
- [7] 李明海, 任建勋, 罗群生, 等. 钢-木组合结构在火灾中的热响应数值模拟 [J]. *清华大学学报*, 2001, 41(2): 68–71. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2001.02.018.
LI Minghai, REN Jianxun, LUO Qunsheng, et al. Numerical simulation of the thermal response of steel- wood composite structure on fire [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2001, 41(2): 68–71. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2001.02.018.
- [8] 胡宇鹏, 罗群生, 李友荣, 等. 不同压力下具有内热源的包装箱内传热特性 [J]. *包装工程*, 2016, 37(11): 1–5.
HU Yupeng, LUO Qunsheng, LI Yourong, et al. Heat transfer characteristics of a product with an inner heat source in a packaging container under different pressures [J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(11): 1–5.
- [9] 张鹏, 王文博, 王宏伟. ANSYS 软件在导弹包装箱设计中的应用研究 [J]. *航空科学技术*, 2015, 26(4): 53–57. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5453.2015.04.011.
ZHANG Peng, WANG Wenbo, WANG Hongwei. The application of ansys software on missile packing design [J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2015, 26(4): 53–57. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5453.2015.04.011.
- [10] 李娜, 刘剑钊, 张思才, 等. 抗事故包装箱碰撞过程靶体等效方法研究 [J]. *包装工程*, 2016, 37(11): 25–38.
LI Na, LIU Jianzhao, ZHANG Sicai, et al. Equivalent method for the targets in impact process of accident-resistant packaging container [J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(11): 25–38.
- [11] MICHAEL H, GENE H L, LAVERNE E R, et al. Analysis, scale modeling, and full-scale tests of low-level nuclear-waste-drum response to accident environments: SAND80-2517 [R]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 1983: 43–63.
- [12] 鲍平鑫, 宁伟宇, 张卫春. 基于 CATIA 与 ADAMS 军用爆炸品包装箱铁路运输冲击仿真实验研究 [J]. *军事交通学院学报*, 2012(3): 20–25. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2192.2012.03.005.
BAO Pingxin, NING Weiyu, ZHANG Weichun. Research on impact simulation experiment of military explosives packing through railway transportation based on CATIA and ADAMS [J]. *Journal of Military Transportation University*, 2012(3): 20–25. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2192.2012.03.005.
- [13] 葛任伟, 欧阳勇, 张怀宇, 等. 抗事故包装箱缓冲结构厚度计算方法研究 [J]. *机械设计与制造*, 2011(12): 38–40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2011.12.015.
GE Renwei, OUYANG Yong, ZHANG Huaiyu, et al. Research of computing methods for thickness of buffering structure of accident resistant packing cases [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2011(12): 38–40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2011.12.015.
- [14] 屠兴. 模型实验的基本理论与方法 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989: 1–10.
- [15] 谈庆明. 量纲分析 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005: 1–19.
- [16] 罗文泉, 叶霜. 模型实验的相似方法 [J]. *工业加热*, 1999, 1(1): 17–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1639.1999.01.005.
LUO Wenquan, YE Shuang. Similarity method of model experiment [J]. *Industrial Heating*, 1999, 1(1): 17–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1639.1999.01.005.
- [17] 周政, 葛任伟, 卢永刚, 等. 抗事故包装箱抗冲击性能的相似准则 [J]. *包装工程*, 2018, 39(7): 31–38.
ZHOU Zheng, GE Renwei, LU Yonggang, et al. Similarity criteria for impact resistance of accident resistant containers [J].

Packaging Engineering, 2018, 39(7): 31–38.

- [18] 钟卫洲, 宋顺成, 黄西成, 等. 三种加载方向下云杉静动态力学性能研究 [J]. *力学学报*, 2011, 43(6): 1141–1150. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-6-lxxb2010-450.

ZHONG Weizhou, SONG Shuncheng, HUANG Xicheng, et al. Research on static and dynamic mechanical properties of spruce wood by three loading directions [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(6): 1141–1150. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-6-lxxb2010-450.

Impact response of scaled models of an energy-absorbing container

XIE Ruoze^{1,2}, ZHONG Weizhou^{1,2}, HUANG Xicheng^{1,2}, ZHANG Fangju^{1,2}

(1. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;*

2. *Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: The drop process of an energy-absorbing container was simulated by air gun impact test, and the forward and 30° oblique impact experiments of the scale model were carried out. The numerical analysis for the model experiments was conducted to obtain the stress distribution and plastic deformation of the energy-absorbing container model in the impact process. And then the calculation and experimental results were compared. The results show that the energy-absorbing container absorbs energy mainly by the plastic deformation of cushion wood and the plastic hinges produced by the buckling of outer steel shell during impact, and its plastic deformation mainly concentrates at the impact end, while no plastic deformation is found far away from the impact end. In simulations, the compressive stress-strain curve of the wood in texture direction can be used to simulate the drop impact process of energy-absorbing container.

Keywords: energy-absorbing container; impact; model experiment; oblique impact

(责任编辑 王小飞)