空投水袋高空跌落冲击过程数值分析

王宏,赵西友,曾康斌

(空军空降兵学院, 桂林 541003)

摘要:目的 研究空投水袋 200 m 高空的跌落冲击过程,验证双层超弹性材料包装方案的可行性。方法 基于 Ansys/LS-DYNA 软件平台,以盛装 5 kg 饮用水的水袋为例,采用数值模拟的方法研究着陆冲击 过程中水袋主要力学参数的微观变化过程,包括形状变化、节点速度及应力的变化过程,并模拟出水 袋着陆冲击的破坏情况。结果 水袋四周的形状、节点速度及应力参数均在着陆瞬间发生急剧变化,直 至水袋破裂。结论 着陆瞬间液体向四周的急剧扩散是水袋破坏的主要原因,而且着陆时水袋侧面是最 容易破坏的部位。双层超弹性材料的包装方案还不能满足饮用水 200 m 高空的空投包装需求。 关键词: 空投;水袋;跌落冲击;数值模拟

中图分类号: TP302.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)11-0088-05

Numerical Analysis on High-altitude Air-drop Impact Process of Water Bag

WANG Hong, ZHAO Xi-you, ZENG Kang-bin

(Air Force Airborne Academy, Guilin 541003, China)

ABSTRACT: This work aimed to study the impact process of water bag that air-dropped from 200 m high-altitude, and test the feasibility of the packing project of double layers super elastic material. Based on the software platform of Ansys/LS-DYNA, a water bag filled with 5 kg drinking water was taken as an example, and the method of numerical simulation was used to study the microscopic changes of main mechanical parameters of the water bag in the process of landing and impacting, including the changing process of shape, the nodal speed and the stress. The water bag's landing and impacting damages were also simulated. Sharp changes in the shape around the water bag, the nodal speed and the stress parameters occurred at the landing moment till the water bag was broken. The main cause for the destruction of water bag was that the liquid spread rapidly and sharply at the landing moment, moreover, the side face of water bag was the most easily damaged part. The packaging scheme of double-layer superelastic material could not yet meet the packaging need of drinking water air-dropped from 200 m high-altitude. **KEY WORDS:** air drop; water bag; dropping impact; numerical simulation

随着硬件日新月异的发展和数值模拟理论与 软件平台的日趋完善,数值模拟已成为一种在诸多 领域不可或缺的研究分析手段^[1]。近年来,空降空 投方式因其方便快捷的特点得到了快速发展和广 泛应用^[2-4]。文中以饮用水在 200 m 高空的无伞空投 为研究对象,采用双层超弹性材料作为液体的包装 方案^[5-6],基于 Ansys/LS-DYNA 数值模拟与分析系 统,通过理论计算分析和计算机仿真对其高空跌 落冲击过程进行数值模拟分析,并对其着陆时受 到的冲击及着陆过程进行动态模拟^[7-8]。重点研究 着陆冲击时包装体的体积变化、形状变化、冲击 力的产生、应力变化、节点速度变化、对包装物 的破坏方式等方面,为饮用水空投的缓冲包装设 计提供依据^[9]。

1 实例及模拟条件

物资空投着陆是一个多条件约束、多目标输 出的过程,加之受到空投高度的限制,实验难度 非常大,目前还不具备在室内进行试验的条件。 由此,通过数值模拟的方法对整个空投着陆过程 进行仿真和分析,预测一些关键缓冲性能参数的 大致范围,不仅可以降低成本,缩短研制周期^[10], 而且对确定缓冲包装材料和包装方式设计是非常 有帮助的^[11]。

1.1 模拟对象

选定 5 kg 饮用水作为空投物资,考虑到利用包装材料的弹性变形来吸收能量^[12-13],采用双层超弹性材料作为模拟水袋材料,内外袋结构尺寸分别为 400 mm × 350 mm 和 410 mm × 360 mm。对其在装水的情况下,距离地面 200 m 高度进行空投的着陆冲击过程进行模拟。通过模拟计算,找出水袋冲击过程中的变形模态,计算得到材料应力^[14]、变形量等一系列参数的变化规律。

针对确定的超弹性材料包装方案,包装材料采 用厚度为 0.5 mm 的聚醚(TPU)薄膜,拉伸强度纵向 为 45.8 MPa,横向为 43 MPa;伸长 率纵向为 706.6%, 横向为 624.4%;撕裂强度纵向为 82.8 kN/m,横向为 81.7 kN/m。该材料经检测符合饮用水的包装要求, 并在实际中应用多年。数值模拟分析过程中,包装 材料采用超弹性材料模型,水和空气采用流体模型, 状态方程采用 Gruneisen 方程,地面材料采用混凝土 动态弹塑性材料模型。

1.2 边界条件及求解控制条件

在计算前对模型施加的边界条件和求解控制条件如下:边界约束条件,地面为刚性,所有自由度均被约束;碰撞速度为 50 m/s;碰撞模拟时间为 1800 μs;计算方法为 ALE。

空投件自 200 m 高度空投时,其着陆时的碰撞 速度是一个随机事件,没有一个固定的准确值。根 据多年的空投经验,空投件在高度为 200 m 的着陆 速度一般在 50 m/s 左右,因此,选用 50m/s 作为碰 撞速度符合实际情况,仿真结果可以作为实际方案 设计的参考。由于实际碰撞时间很短,1800 μs 足以 模拟整个碰撞的完整过程,因此将碰撞模拟时间确 定为 1800 μs。

1.3 结构模型

根据水袋装水后的结构形状和体积大小,确定 了双层水袋空投着陆冲击计算模型,见图 1。双层水 袋由 2 个大小不同的独立水袋自然套在一起,其间 无任何连接或支撑。在下落过程中两袋之间的相对 位置存在很大的不确定性,袋体间的空气夹层厚度 也无法确定。为了验证 2 个独立袋体在着陆缓冲中 的效果,在建模时假定袋体四周的空气夹层厚度均 为1 mm,从着陆瞬间开始进入自然变化状态。并在 此基础上进行了有限元网格划分,见图 2^[15]。





图 2 双层水袋空投着陆冲击计算有限元网格划分 Fig.2 Calculating finite element grid division of air-drop landing impact of double-layer water bag

2 结果及分析

2.1 水袋着陆冲击过程中的变形

水袋着陆瞬间的状态见图 3,可以看出着陆时, 由于液体的冲击,内袋先发生膨胀变形,进而引起 外袋发生膨胀变形,2个袋体间会产生空气压力。从 着陆瞬间开始,内外袋之间的空气压力值一直处于 变化之中,没有一个稳定的时刻,具体压力值在模 拟过程中无法测量。因着陆瞬间袋内液体向四周产 生的冲击力还较小,中间空气压力和内部水压的差 别不大,因而内袋变形也不大。



图 3 着陆瞬间状态 Fig.3 State of the landing moment

从着陆后 10 μs 开始。2 层水袋在着陆处贴合, 袋中的水向下运动中断, 开始向四周流动, 流动的

水冲击水袋向四周膨胀,同时中间部分水袋向上弹 起,地面也产生凹陷变形。这里,假设地面为刚性 介质,用混凝土材料的本构模型进行计算,基本属 于弹性变形。地面在计算中设定为半无限介质,即 将计算模型中的地面设定为反射面,其他几个面为 不反射界面。此后,随着时间的推移,水流不断向 四周冲击,四周的变形越来越大。从着陆后47 µs 起, 液体冲击对袋体产生的局部拉伸超过材料的拉伸极 限。水袋从四周开始产生破坏,直至水袋四周完全 破裂,见图 4。



图 4 着陆后 47.2 μs时的状态 Fig.4 State of 47.2 μs after landing

2.2 水袋周边节点速度变化情况

选取如图 5 所示的内外层水袋上部中间、下部 中间及侧面的单元节点进行分析。





2.2.1 水袋中间节点速度变化

水袋上部中间节点竖直方向的速度变化曲线见 图 6a。在着地瞬间,首先是外层水袋节点迅速向上 弹起,节点由向下运动转为向上运动,其向上运动 的速度峰值达到 330 m/s 以上,然后迅速下降。水袋 下部中间节点竖直方向的速度变化曲线见图 6b。在 着地瞬间,节点迅速向上弹起,节点由先下运动转 为向上运动,符合实际空投着陆时的状态,其向上 运动的速度峰值达到 100 m/s 以上,然后缓慢下降。 2.2.2 水袋侧面节点速度变化

水袋侧面单元节点沿水平向外的运动速度曲线

见图 7。在着陆过程开始 50 µs 内,节点为小幅伸缩 运动,52 µs 时由于受到水的强烈冲击,节点迅速向 外运动,峰值速度可达 5.5 km/s,形成对水袋材料的 高速拉伸。



图 6 节点 y(竖直)方向速度曲线 Fig.6 Speed curves at the node y (vertical) direction



图 7 节点 x(x 平) 方向速度曲线 Fig.7 Speed curves at the node x (horizontal) direction

显然,无论是上部节点还是下部节点,其运动 速度的峰值都远远小于侧面节点的速度峰值,且侧 面节点的运动速度是突然的剧烈变化。可见,着陆 时水袋周边是变形最剧烈的部位。

2.3 水袋周边应力变化情况

选取如图 8 所示的内外层水袋各单元节点进行分析。由图 9a 可知,内层水袋在着陆初期 52 µs 内各单元的应力变化很小,在 52 µs 时侧面单元应力突然 剧烈变化,峰值拉应力为 33.72 GPa,峰值压应力为 8.91 GPa。从图 9b 可以看出,在着陆初期 53 µs 内各 单元的应力变化很小,在 53 μs 时侧面单元拉伸应力 突然剧烈变化,峰值拉应力达到 30.83 GPa。







图 9 水袋各单元主应力曲线 Fig.9 Main stress curves of nodes of the water bag

从以上应力分析可以看出,无论是内袋还是外袋,均是侧面单元的拉伸应力突然发生剧烈变化, 且其峰值远大于其他部位的节点应力峰值。这就进 一步表明着陆时水袋周边是变形最剧烈的部位。

2.4 结果分析

根据以上对着陆冲击过程中水袋的变形、周边 节点速度及应力变化情况的模拟分析,从中可以看 出,着陆后液体在瞬间改变了运动方向,向四周扩 散形成对袋体周边的冲击,使得水袋产生外胀变形, 相当于给袋体施加了一个拉伸力(部位不同拉伸力 也不同)。水流对袋体周边的冲击力很快达到最大, 水袋变形加剧。从着陆 47 μs 开始,袋体周边的局部 变形超过了材料的拉伸极限,周边开始出现破裂。 到 52 μs 时,水袋侧面单元节点向外的运动速度和侧 面单元应力均发生急剧变化,迅速达到峰值,这些 都说明水流的冲击对水袋材料形成了高速拉伸,也 是水袋破裂的主要原因。此外,从水袋袋体的变形 以及水袋周边各节点的运动速度和应力变化情况也 可以看出,水袋四周边缘的变形最大,在瞬间位移 发生突然变化,侧面节点的速度和拉伸应力也是在 瞬间(2μs内)发生急剧变化,且其峰值远远大于其 他部位节点。由此可见,水袋周边是最容易被破坏 的部位。

3 结语

数值分析的结果表明,采用双层超弹性材料的 包装方案,还无法满足饮用水在 200 m 高空进行空 投的包装需求,内外层水袋均破裂。着陆后液体向 四周快速扩散形成的冲击是造成水袋破坏的主要原 因,而且着陆时水袋侧面是最容易发生破坏的部位。 以上因素将是包装方案设计时需重点考虑的问题。

参考文献:

 李良春,黄刚,李文生,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的 新型着陆缓冲气囊仿真分析[J].包装工程, 2012, 33(15):16—20.
 LI Liang-chun, HUANG Gang, LI Wen-sheng, et al. Si-

mulation Analysis of New Type Landing Cushion Airbag Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):16–20.

- [2] 温金鹏,李斌,杨智春.缓冲气囊冲击减缓研究进展[J]. 宇航学报,2010,31(11):2438—2447.
 WEN Jin-peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Progress of Study on Impact Attenuation Capability of Airbag Cushion System[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2438—2447.
- [3] 于成果,李良春. 空投安全着陆的实现途径[J]. 包装工程, 2007, 28(10):135—137.
 YU Cheng-guo, LI Liang-chun. Ways of Air-drop Safety Landing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10):135—137.
- [4] 刘守君,齐明思,黄宏胜,等.新型自充气式着陆缓冲 气囊的理论分析与设计研究[J].包装工程,2015, 36(1):107—110.
 LIU Shou-jun, QI Ming-si, HUANG Hong-sheng, et al. Theoretical Analysis and Design of a New Self-inflating Landing Cushion Airbag[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1):107—110.
- [5] 王岳. 材料在产品设计中的创新应用研究[J]. 包装工程, 2015, 36(8):68—71.
 WANG Yue. The Innovative Application of Materials in Product Design[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(8):

68-71.

 [6] 白新理,杨开云,王文媛,等.不可压缩超弹性材料大 变形接触分析[J].四川大学学报(工程科学版),2001, 33(1):16—19.
 BAI Xin-li, YANG Kai-yun, WANG Wen-yuan, et al.

BAI Xin-II, YANG Kai-yun, WANG Wen-yuan, et al. Large Deformation Contact Analysis of Incompressible Hyperelastic Material[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition, 2001, 33(1):16—19.

- [7] 张改梅, 仵季红, 郭福宾. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的 易拉罐跌落研究[J]. 包装工程, 2011, 32(5):4—6. ZHANG Gai-mei, WU Ji-hong, GUO Fu-bin. Drop Analysis of Pop can Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5):4—6.
- [8] 齐明思, 刘守君, 赵奇, 等. 基于 Ansys/LS-DYNA 的 缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程, 2014, 35 (11):13—17.

QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research of the Cushioning Airbag during the Landing Process Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11):13—17.

- [9] 丁毅, 王嘉宁, 贾向丽. 重装备空投系统的缓冲包装设 计[J]. 包装工程, 2008, 29(3):96—97.
 DING Yi, WANG Jia-ning, JIA Xiang-li. Cushion Design of Air Drop System for Heavy Equipment[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3):96—97.
- [10] 谭军, 韩旭, 刘鑫. 某特种车空投着陆过程数值仿真分 析与改进[J]. 包装工程, 2010, 31(1):57—61.

TAN Jun, HAN Xu, LIU Xin. Numerical Analysis and Improvement of Airdrop Landing Process of Special Vehicles[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1):57–61.

- [11] 王俊丽,陈喜春.缓冲包装的跌落仿真[J].包装工程, 2007, 28(9):8—10.
 WANG Jun-li, CHEN Xi-chun. Drops Simulation of Cushion Packaging[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9):8 —10.
- [12] EWING, BRUCE L C. Precision Parachute Capabilities and Their Potential Employment in the Land Force[J]. Canadian Army Journal, 2005, 8(3):83—92.
- [13] WEN Jin-peng, LI Bin,YANG Zhi-chun. Study on Cushioning Characteristics of Soft Landing Airbag with Elastic Fabric[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3/4):1535–1545.
- [14] 齐明思,刘守君,赵奇,等.缓冲气囊着陆过程仿真研究[J].包装工程,2013,34(23):5-7.
 QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research on Landing Process of Cushioning Airbag[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23):5-7.
- [15] 卫剑征, 谭惠丰, 万志敏, 等. 缓冲气囊展开与缓冲着
 陆过程的仿真分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5):1
 -8.

WEI Jian-zheng, TAN Hui-feng, WAN Zhi-min, et al. Simulation for Airbag Deployment and Landing Process of Inflatable Landing Vehicles[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(5):1—8.