

基于 ANSYS/LS-DYNA 的新型着陆缓冲气囊仿真分析

李良春¹, 黄刚^{2,3}, 李文生², 王治霜⁴

(1. 军械技术研究所, 石家庄 050000; 2. 军械工程学院, 石家庄 050003; 3. 75234 部队, 东莞 523638; 4. 62199 部队, 涟源 417111)

摘要: 采用 ANSYS/LS-DYNA 对一种新型着陆缓冲气囊进行了仿真分析。采用 C-V 的气囊控制算法, 分别从气囊的材料定义、模型构建和仿真结果分析等方面对整个着陆缓冲过程进行了全面的仿真, 通过对结果的分析, 验证了该气囊设计的冲击最大加速度为 8.6 g, 小于所设计通用弹药许用脆值, 完全满足设计要求。

关键词: 气囊; 着陆缓冲; ANSYS/LS-DYNA 仿真

中图分类号: TB487; TB485.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)15-0016-05

Simulation Analysis of New Type Landing Cushion Airbag Based on ANSYS/LS-DYNA

LI Liang-chun¹, HUANG Gang^{2,3}, LI Wen-sheng², WANG Zhi-shuang⁴

(1. Ordnance Technical Research Institute, Shijiazhuang 050000, China; 2. Ordnance Engineering Colleague, Shijiazhuang 050003, China; 3. Unit 75234 of PLA, Dongguan 523638, China; 4. Unit 62199 of PLA, Lianyuan 417111, China)

Abstract: ANSYS/LS-DYNA was used to carry out simulation of a new type landing cushion airbag. The whole landing cushion process was simulated from airbag material definition, model construction, and simulation result analysis using C-V airbag control arithmetic. The simulation result showed that the design maximal impact acceleration of the airbag is 8.6 g, which is lower than the allowing fragility of common ammunition, and which means the design requirement is satisfied.

Key words: airbag; landing cushion; ANSYS/LS-DYNA; simulation

气囊缓冲技术已经广泛应用于乘员安全保障、航天器登陆与回收以及货物空投等领域。随着计算机技术的发展, 仿真技术在气囊缓冲的设计研究等方面的应用越来越广泛, 应用仿真技术可以减少试验次数、降低试验成本, 能够对气囊的优化设计进行更加全面直观地分析和了解。

强大的有限元分析和优化设计功能, 使得 ANSYS 软件非常适合对包装工程中相关产品、材料和结构进行有限元分析、优化设计、可靠性设计、运动仿真、模块化设计。LS-DYNA 是国际上最著名的显式动力分析程序, 该程序的显式算法特别适合于分析各类高度非线性复杂力学过程, 如爆炸与冲击、结构碰撞等问题, 也可以求解热力学、流体动力学以及流固

耦合等问题。

所研究的新型着陆缓冲气囊的设计目的和思路是通过在结构上的优化以及对排气的控制, 实现智能缓冲的效果, 即缓冲过程更加平稳、最大冲击加速度更小。该气囊是以我军通用弹药精确空投为背景进行设计的, 以我军通用弹药脆值 15 g 为设计目标和依据。该气囊结构是将单气室的气囊划分为多气室结构的气囊——中间自充气的主气室和两侧自带气源充气的侧气室组成, 且每个气室前后均有一个排气口。通过 3 个气室的划分, 实现 2 次缓冲, 从而达到设计目的。笔者利用 ANSYS/LS-DYNA 对该新型着陆缓冲气囊的设计进行仿真分析, 进而验证其缓冲效果。

收稿日期: 2012-05-19

作者简介: 李良春(1967—), 男, 四川人, 军械技术研究所高级工程师, 主要研究方向为装备保障。

1 气囊仿真算法

目前,对于气囊的仿真主要应用在汽车安全气囊方面,而对于空投着陆缓冲气囊国内的研究很少,因此借鉴汽车安全气囊仿真的算法对气囊的变化进行控制。目前用于气囊仿真计算的方法主要是运用显式积分的有限元方法,而在显式有限元软件 LS-DYNA 中有 3 种方法来模拟气囊的展开压缩^[1]:控制体积法 CV 算法(又称均匀压力模型)、任意拉格朗日欧拉法 ALE 算法、粒子法 C 算法。CV 控制体积方法基于热力学理论,它的优点是对于气囊展开计算速度较快,能够比较准确地模拟气囊展开后期的作用,但是对气囊展开初始阶段气囊与物体作用的模拟不够真实;任意拉格朗日欧拉方法的优点是对于气囊展开初始阶段以及气囊和物体作用的模拟比较准确,但是这种方法的计算时间和计算效率不如控制体积法;粒子法是最近才提出的一种方法,主要是针对控制体积法和任意拉格朗日法的不足提出的,研究证明,这种方法对于气囊展开的初始阶段和计算时间的减少都有很大效果,只不过现在只有较高版本的 DYNA 软件才有,并且计算也还不稳定,所以目前进行气囊数值模拟仍以控制体积法和任意拉格朗日法为主^[2]。由于所设计的着陆缓冲系统是在气囊完全充气完成之后开始仿真的,各个气室相对独立,气室内的压力值又相等,因此使用控制体积方法。

2 缓冲过程的仿真分析处理

2.1 气囊缓冲过程

仿真过程为气囊在空投下落的过程中完全展开后,从刚触地的一瞬间开始,随着空投载荷对气囊的压缩,气囊内压逐步增大,当达到一定值之后两侧气室的排气口打开开始排气,两侧气室的内压减小,而主气室的内压继续增大,当主气室内压达到排气压力值时排气口打开排气,直至着陆完成。

2.2 缓冲过程仿真的假设

由于整个着陆缓冲过程涉及的因素复杂繁多,为了突出计算的结果和缓冲的效果,以提高计算的效率,对缓冲过程作以下近似处理^[3]:(1)由于缓冲过程持续时间很短,与外界热交换几乎可以忽略,因此对于气囊内气体的压缩可处理为绝热压缩过程;(2)在空投着陆时,空投平台与地面存在着小于 15°的倾斜

角,由于货台的作用,倾斜角在着陆的一瞬间被修正,因此为了方便仿真和计算,可将空投系统的着陆近似处理为垂直着陆;(3)在气囊材料的设计中,采用了聚酯纤维和硅酮涂层相结合材料,其气密性很好,在仿真过程中,气囊材料的透气性可定义为零,即气囊是完全不透气的;(4)为了提高仿真的运算速度,将货台以上(包括空投弹药)假设为刚性体,且不陷入气囊中,地面也假设为刚体;(5)在压缩过程中忽略气囊壁的横向变形,只有垂直方向的收缩。

3 模型的建立

根据整个着陆缓冲系统的结构特点,在保证着陆缓冲的效果和精确度的情况下,尽量减少计算量,以提高仿真速度,并减少出错的概率,从而将模型按照实际功能结构和仿真需要进行一定的简化。主要是针对气囊的缓冲效果进行仿真分析,因此可以将气囊以上的货台和空投物资合并,简化成一个刚性体,通过对反映在刚体上的加速度和应力来分析物资着陆时受到的冲击。

3.1 模型结构及参数

整个模型结构由 3 个大的部分组成,即底部地面、中间气囊和上面的货台及空投弹药及相关配属物资(即重物简化为一个长方体)。着陆地面采用 LS-DYNA 中的刚性面进行模拟;通过关键字把气囊与重物模型连接处的节点(即气囊体的上底面)建立 * SET NODES,然后将着陆装备作为主 PART,* SET NODES 约束到装备物资即重物模型上并有相同的自由度;重物模型和气囊的初速度通过关键字 * INITIAL VELOCITY 设定,整个系统模型通过关键字 * LOAD BODY Z 加载沿负方向的重力,整个连接用关键字 * CONSTRAINED RIGID BODIES 实现。

气囊采用的是织物材料,因此选用 LS-DYNA 中提供的 34 号正交各向异性材料(* MAT FABRIC)仿真,为便于计算分析,重物用刚体材料近似代替,因此采用的是 3D SOLID 164 号材料单元,并用线弹性材料(* MAT_ELASTIC)进行仿真。

主要用到 2 种接触类型^[4]:着陆面和气囊之间的接触用自动面面接触定义(* CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE);气囊和气囊之间的接触用自动单面接触定义(* CONTACT AUTOMATIC SINGLE SURFACE)。

针对气囊的特点和要求,选择 CV 法定义气囊,并且选用 CV 法中的王氏方法,用该方法可以定义气囊初始压力以及内外环境压力,其关键字为 * AIRBAG WANG NEFSKE,3 个气室的关键字定义如下。

由于两侧气室的结构完全相同,所以采用了相同参数设置,气体温度为 300 K,初始气压均设置为 1.2 倍标准大气压,排气面积设置为 250 cm^2 ,排气气压设置为 1.7 倍标准大气压,排气口比例系数为 1.0。中间主气室气体温度为 300 K,初始气压均设置为 1.0 倍标准大气压,排气面积设置为 500 cm^2 ,排气气压设置为 1.5 倍标准大气压,排气口比例系数为 1.0。

简化的弹药物资模型为长方体刚性体,大小为:长 2.4 m,宽 1.2 m,高 1.0 m,质量为 2 000 kg(长即 X 轴方向的距离,宽即 Z 轴方向的距离,高即 Y 轴方向的距离,下同)。整个气囊长 2.4 m,宽 1.2 m,高 0.6 m,内部 3 个气室,两侧气室的空间形状相同,分别长 0.6 m,宽 1.2 m,高 0.6 m,中间主气室是两侧气室空间的 2 倍,并且两侧气室和中间主气室分别用一个气囊膜隔开。每个气室的前后都有一个排气口,均为圆形,并位于各气室前后两面的中间,两侧气室排气口的半径为 0.050 m,主气室排气口半径为 0.100 m,即主气室的排气口面积为两侧气室的 4 倍。地面由于按照刚性体处理,因此地面按照比空投系统底面积稍大的长方体平板构建,具体参数为:长 3.0 m,宽 1.6 m,厚(高)0.1 m。着陆缓冲系统模型见图 1。

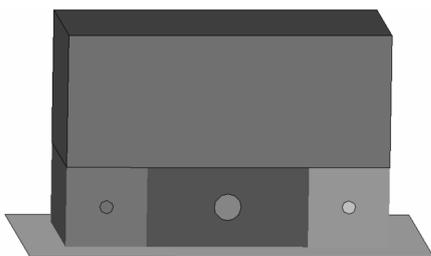


图 1 精确空投着陆缓冲系统模型
Fig. 1 Model diagram of precision airdrop landing cushioning system

3.2 模型网格划分

模型网格的划分由网格划分软件 HYPERMESH 完成,使用软件中的 AUTOMESH 自动划分生成,同时手动调整网格。着陆装备网格、内外囊大小约为 60 mm,网格划分为 16 714 个单元,共有 17 296 个单元节点,其中空投装备物资(重物)11 520 个节点,气囊 5 194 个节点^[5]。

4 仿真计算与结果分析

将前处理材料、模型、接触等信息生成关键字文件 "AIRBAG_DROPDOWN",并用关键字文件 LS-DYNA Solver 求解器对关键字文件进行求解计算^[5]。设置的着陆缓冲初始速度为正常空投高度落地时速度,过程为 600 ms,时间历程步长为 0.025 ms,每隔 5 ms 输出一次动画文件 d3plot 和时间历程数据,整个过程经历 20 113 次循环完成计算。

为了便于计算结果的分析,分别对缓冲过程中空投装备物资(重物)受到的冲击应力、冲击加速度、速度的变化进行分析。

4.1 仿真计算过程

从初始时刻到气囊压缩排气结束即为着陆缓冲系统的整个着陆过程,缓冲过程应力云图见图 2。

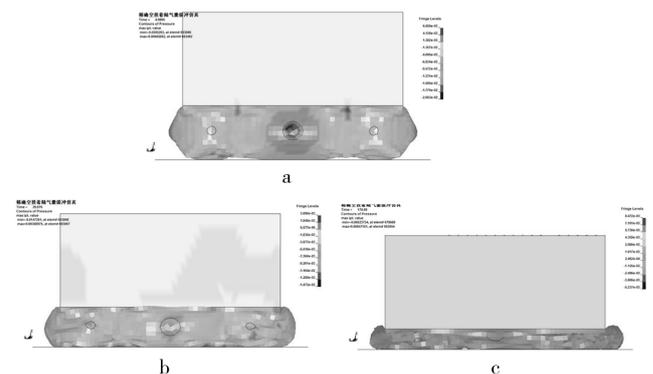


图 2 精确空投系统着陆缓冲过程应力云图

Fig. 2 Stress contour figure of the precision airdrop landing system during landing cushioning process

可以看出空投装备物资(重物)的应力随着气囊压缩快速上升,空投装备物资底部和四周边缘的冲击应力云图的颜色更深,说明其应力值相对较大,随着气囊排气,应力下降直至排气完成,着陆结束。

4.2 仿真计算结果分析

4.2.1 应力分析

通用弹药空投着陆的应力分析见图 3。

从图 3 可以看出,空投通用弹药在整个着陆过程中受到的冲击应力变化,缓冲过程在 250 mm 左右结束,经过 2 次缓冲,在主气室压缩过程中,即在 50 mm 左右达到极值 203.53。

4.2.2 冲击加速度分析^[6]

空投通用弹药着陆综合加速度以及竖直下落方

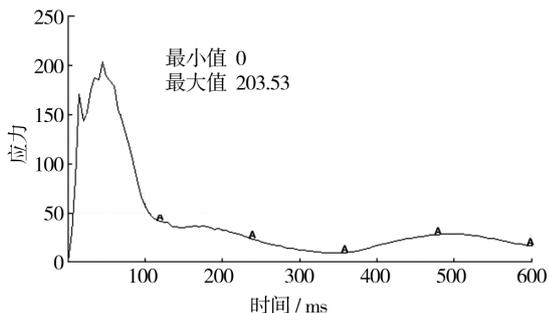


图 3 空投通用弹药着陆冲击应力曲线

Fig. 3 Landing impact stress curve of the airdropped general ammunition

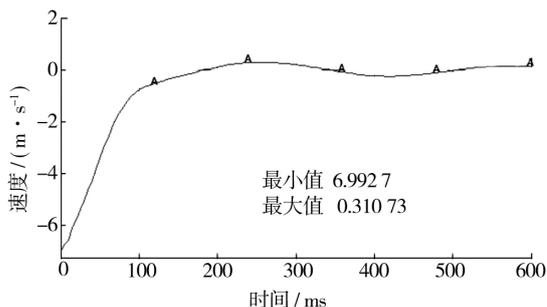
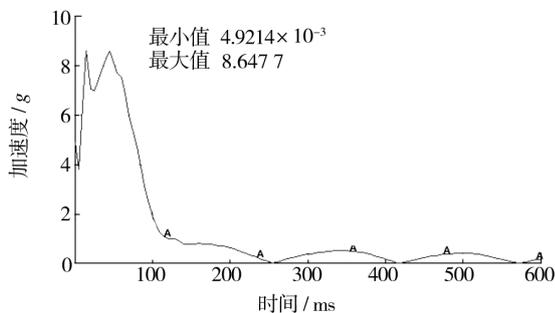


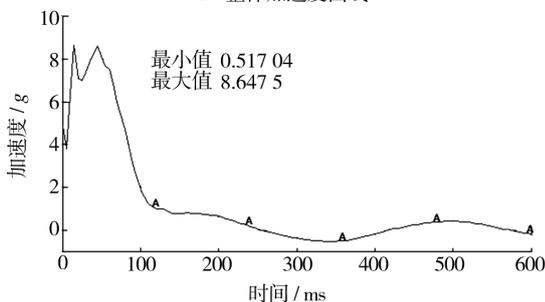
图 5 空投通用弹药整体速度曲线

Fig. 5 Overall velocity curve of the airdropped general ammunition

向(Z轴)冲击加速度分析见图4。



a 整体加速度曲线



b 竖直下落方向(Z轴)冲击加速度曲线

图 4 空投通用弹药着陆冲击加速度曲线

Fig. 4 Landing impact acceleration curve of the airdropped general ammunition

从图4可以看出,空投通用弹药在气囊缓冲的作用下经过了2次缓冲,最后平稳着陆,并有轻微的波动。由于气囊的三气室以及2次排气的设计,使得气囊在着陆的过程中经历2次缓冲,且综合最大加速度仅有8.6g,完全符合所设计的 $a_{max} \leq 15g$ 的要求。

4.2.3 速度变化分析

空投通用弹药整体速度变化(垂直速度即Z轴速度)见图5。

在收到气囊的压缩产生的缓冲力之后空投通用弹药的着陆速度从7m/s迅速下降,在接近100ms

时,由于主气室开始排气,下落的速率有所减缓;在接近200ms时,由于排气结束完成缓冲,气囊的速度也接近于0,其后在剩余能量的作用下有轻微的波动。

4.2.4 位移变化分析

空投通用弹药整体位移变化(竖直方向即Z轴位移)见图6。

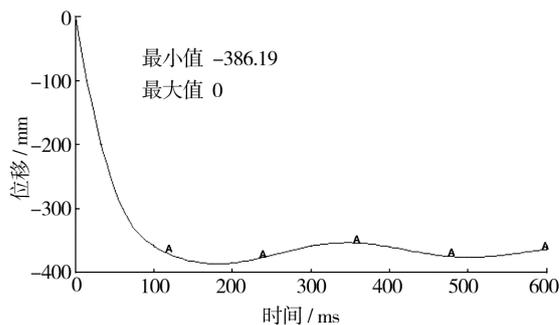


图 6 空投通用弹药整体位移变化曲线

Fig. 6 Overall-displacement curve of the airdropped general ammunition

空投通用弹药的位移变化反映了气囊压缩高度的变化,从图6可以看出,空投的弹药由于受到气囊的缓冲作用,平缓下落,由于气囊的厚度设置为5mm,到气囊缓冲过程的结束距离地面还有200mm,之后一直保持在距离地面200~250mm之间轻微波动,从而避免直接碰撞地面造成过大的冲击。且各节点的位移在着陆过程中保持了高度一致,说明在缓冲过程中空投通用弹药内部受力是比较平稳的,并未出现应力过大造成节点分离的情况。

4.3 结果分析

仿真计算表明空投通用弹药整体在气囊缓冲下受到的最大冲击加速度为8.6g,小于弹药着陆的脆值要求15g,说明三气室气囊设计的缓冲性能符合要

求,缓冲效果较好。

5 结语

运用 ANSYS/LS-DYNA 软件对一种通用弹药精确空投着陆缓冲新型气囊设计进行了仿真计算分析,通过仿真验证了该气囊的缓冲效果,计算结果也达到了设计的目的和要求。该方法的实现,为我军通用弹药空投以及其他脆值相对较低物资的空投着陆缓冲的设计提供了一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 方康寿. 无人机回收气囊减震性能的有限元研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
FANG Kang-shou. UAV Recovery of Air Damping Performance of Finite Element Analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [2] HIRTH A, HAUFE A, OLOVSSON L. Airbag Simulation with Ls-dyna Past-present-future[R]. The 6th European Ls-dyna Users Conference, Germany, 2005:23-46.
- [3] 乐永祥. 着陆缓冲气囊缓冲过程数值模拟和优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
LE Yong-xiang. Landing Airbag Cushion Process Numerical Simulation and Optimal Design [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [4] 都学飞, 欧阳效卓, 张汪年. EPS 缓冲材料的静态压缩性能的试验研究[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 39-45.
DU Xue-fei, OUYANG Xiao-zhuo, ZHANG Wang-nian. Experimental Research on Static Compression Properties of EPS Buffer Material [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 39-45.
- [5] 王亚伟, 杨春信, 柯鹏. 货台空投系统气囊缓冲过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3176-3179.
WANG Ya-wei, YANG Chun-xin, KE Peng. Airbag Cushion Process Simulation for Cargo Airdrop System [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3176-3179.
- [6] 赵德坚. 充气量对充气缓冲包装垫缓冲性能的影响研究[J]. 包装工程, 2011, 32(13): 32-34.
ZHAO De-jiang. On Influence of Gas Volume on Cushioning Property of Air Cushion [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 32-34.
- (上接第 5 页)
- [8] 冯峰. 胡萝卜的流变特性及质地评价研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.
FENG Feng. Studies on Rheological Properties and Texture Evaluation of Carrot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.
- [9] POLYDERA A C, STOFOROS N G, TAOUKIS P S. Quality Degradation Kinetics of Pasteurised and High Pressure Processed Fresh Navel Orange Juice: Nutritional Parameters and Shelf Life [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2005, 6(1): 1-9.
- [10] 蒋和体, 钟林. 超高压处理对橙汁品质影响研究[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 24-29.
JIANG He-ti, ZHONG Lin. Influence of Ultra-high Pressure on Quality of Orange Juice [J]. Food Science, 2009, 30(17): 24-29.
- [11] POLYDERA A C, STOFOROS N G, TAOUKIS P S. Comparative Shelf Life Study and Vitamin C Loss Kinetics in Pasteurised and High Pressure Processed Reconstituted Orange Juice [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60(1): 21-29.
- [12] GB/T 12143, 饮料通用分析方法[S].
GB/T 12143, General Analytical Methods for Beverage[S].
- [13] 李欣. 菠萝浓缩汁储藏过程中非酶褐变的研究[D]. 桂林:广西大学, 2007.
LI Xin. Nonenzymatic Browning of Pineapple Juice Concentrates during Storage [D]. Guilin: Guangxi University, 2007.
- [14] ROIG M G, BELLO J F, RIVERA Z S, et al. Studies on the Occurrence of Non-enzymatic Browning during Storage of Citrus Juice [J]. Food Research International, 1999, 32(9): 609-619.
- [15] ZERDIN K, ROONEY M L, VERMUE J. The Vitamin C Content of Orange Juice Packed in an Oxygen Scavenger Material [J]. Food Chemistry, 2003, 82(3): 385-395.
- [16] 李云康. 柑橘特征糖酸组成及其与果汁褐变关系研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2006.
LI Yun-kang. Studies on Composition of Sugar and Acid in Different Citrus Cultivars and Relationship between Composition and Non-enzymatic Browning [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [17] 路福绥. 果汁的流变特性研究[J]. 食品工业科技, 1999, 20(2): 12-13.
LU Fu-sui. Study on the Rheological Property of Fruit Juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 1999, 20(2): 12-13.
- [18] ALWAZEER D, DELBEAU C, DIVIES C, et al. Use of Redox Potential Modification by Gas Improves Microbial Quality, Color Retention and Ascorbic Acid Stability of Pasteurized Orange Juice [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 89(1): 21-29.