## 某空投装备在不同缓冲装置下的冲击响应分析

王新春1,马大为1,庄文许2,董振乐1,吴跃飞1

(1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 中船重工第七二四研究所, 南京 210003)

摘要:为给空投装备提供理想的缓冲装置,在利用相关等效理论对不同缓冲装置进行合理等效的基础上,应用 ABAQUS软件建立了某空投装备的有限元模型,分析了该空投装备在不同缓冲装置下的着陆冲击响应。根据 破损边界理论,对比分析了不同缓冲装置的缓冲性能。根据分析结果提出了组合式缓冲装置的构想,并对其进 行了仿真分析。仿真结果表明:组合式缓冲装置较其余2种缓冲装置具有较好的缓冲性能。

关键词:空投;冲击加速度;有限元;缓冲装置

中图分类号: TB485.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)13-0047-05

# Impact Response Analysis of Airdrop Equipment with Different Buffer Device

WANG Xin-chun<sup>1</sup>, MA Da-wei<sup>1</sup>, ZHUANG Wen-xu<sup>2</sup>, DONG Zhen-le<sup>1</sup>, WU Yue-fei<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. No. 724 Research Institute under SCIC, Nanjing 210003, China)

**Abstract**: A model of the airdrop equipment was set up using ABAQUS based on equivalent theory. The process of landing impact was analyzed on different buffer device. The cushioning property of different buffer device was evaluated according to damage boundary theory. The idea of combination buffer device was put forward according to the analysis result. Simulation analysis was carried out on the combination buffer device. The simulation results showed that the combination buffer device's cushioning property is the best in the three buffer devices.

Key words: airdrop; impact acceleration; finite element; buffer device

空投装备的安全着陆对提高空降部队的战斗能 力和抗震救灾中的快速应急能力具有十分重要的意 义。空投安全性的研究主要集中在两大方面,一是改 进空投装备的结构,二是研制更加安全可靠的缓冲装 置。目前,空投装备的缓冲装置主要包括充气式气囊 缓冲装置、可挤压泡沫缓冲装置、蜂窝纸板缓冲装置 以及火箭缓冲装置等。其中,火箭缓冲方式存在成本 高、设备复杂、保管维修困难等问题<sup>[1]</sup>,一般较少使 用;气囊缓冲装置的研究已经比较成熟,但可靠性不 是很大;可挤压泡沫缓冲装置和蜂窝纸板缓冲装置的 研究相对较少。然而,空投用缓冲装置的缓冲性能可 以通过空投装备的着陆冲击响应对其进行评估。在 以往一般都是直接通过外场试验来模拟实际情况,根 据试验结果评估缓冲性能的优劣,再逐步改进缓冲包 装,这样就会耗费大量的人力、物力和财力<sup>[2]</sup>。随着 数值仿真技术的发展,空投装备的着陆冲击过程可以 通过计算机仿真来实现,从而达到节约成本的目的。 空投装备的着陆冲击问题是一个复杂的非线性动力 学问题,通常伴随着大量的非线性、变接触和材料大 变形、失效等物理现象,这类问题采用显示动力学的 方法可以得到很好的解决。

以某空投战车为研究对象,利用 ABAQUS/Explicit 对空投战车的着陆冲击过程进行仿真分析。通 过分析空投车在不同缓冲装置下的冲击响应,提出组 合式缓冲装置的构想。根据破损边界理论<sup>[3]</sup>,对比分 析了可挤压泡沫缓冲装置、蜂窝纸板缓冲装置以及组 合式缓冲装置的缓冲性能。研究成果对空投技术的 进一步发展具有一定的参考价值。

#### 收稿日期: 2013-05-08

作者简介:王新春(1988-),男,山东青岛人,南京理工大学硕士生,主攻复杂机械系统的结构设计与仿真分析。

## 1 显示动力学理论

ABAQUS/Explicit 以显式动力学理论为指导,适 用于分析物体受冲击载荷并在结构内部发生复杂相 互作用的瞬态响应问题。空投战车着陆冲击问题即 是此类问题。ABAQUS/Explicit 在整个运算过程中采 用中心差分算法求解平衡方程,运用动态方程在每个 微小增量步内的动力学条件,计算下一个增量步的动 力学条件。

在动力学有限元分析中,系统的求解方程式 为<sup>[4]</sup>:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P - I \tag{1}$$

式中: *ü* 为加速度; *P* 为广义外作用力; *I* 为单元 的广义内力; *M* 为质量矩阵; *K* 为刚度矩阵; *C* 为阻尼 矩阵。

对于单个节点,阻尼矩阵和刚度矩阵为0,所以 单个节点平衡方程转化为:

$$M\ddot{u} = P - I \tag{2}$$

在当前增量步的*t*时刻,计算加速度为:

 $\ddot{u} \mid_{(t)} = (\mathbf{M})^{-1} \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{I}) \mid_{(t)}$ (3)

在计算速度的变化时假设加速度是一个常量,应 用这个速度的变化值加上前一个增量步中点的速度 来确定当前增量步中点的速度。采用中心差分方法 对加速度在时间上进行积分,可得速度和加速度方程 式为:

$$\dot{u} \mid {}_{\left(t+\frac{\Delta u}{2}\right)} = \dot{u} \mid {}_{\left(t-\frac{\Delta u}{2}\right)} + \frac{\left(\Delta t \mid {}_{\left(t+\Delta t\right)} + \Delta t \mid {}_{\left(t\right)}\right)}{2} \ddot{u} \mid {}_{\left(t\right)}$$

$$(4)$$

$$u \mid_{(\iota+\Delta t)} = u \mid_{(\iota)} + \Delta t \mid_{(\iota+\Delta t)} \dot{u} \mid_{(\iota-\Delta t)}$$
(5)

由此可见,利用显示动力学求解复杂的非线性问题时,不必联立方程组进行求解,每一个增量步的计算成本很低,有效的提高了计算效率。

## 2 有限元模型的建立

#### 2.1 空投系统模型的建立

战车空投系统的有限元模型见图1,主要由空投 战车、缓冲装置、货台3部分组成,其总质量满足空 投、空运的要求。将战车车体简化为刚体,轮胎等效 为刚性系数较大的弹簧,地面采用混凝土地面并简化 为弹性模型,货台与地面之间的动摩擦系数参考中科



图1 空投战车着陆系统有限元模型

Fig. 1 The finite element model of airdrop car

院岩土力学研究所(武汉)提供的参数,取为 $f = 0.3^{[5]}$ 。

## 2.2 缓冲装置的设定

根据战车的尺寸设定3种缓冲装置的底面积为 3000×1800=5.4×10<sup>6</sup> mm<sup>2</sup>,厚度值参照 GJB 设定为 400 mm。3种缓冲装置的材料属性及所采用的等效 理论说明如下。

1) 可挤压泡沫缓冲装置的材料采用硬质聚氨酯 泡沫塑料,强度极限为1.67 MPa。这种材料的屈服 行为,由单轴压缩的初始屈服应力与三向均匀压缩的 初始屈服应力的比值(设定为1.1)和三向均匀拉伸 的屈服应力与三向均匀压缩的初始屈服应力的比值 (设定为0.1)决定<sup>[4]</sup>,利用 Crushable Foam 模型定义 其材料属性。

2) 蜂窝纸板缓冲装置主要由蜂窝板组合而成, 强度极限为 10.2 MPa。蜂窝板是一种高强度轻质的 复合材料<sup>[6]</sup>,在航空航天等领域得到了广泛的应用。 在 ABAQUS 和 ANASYS 等有限元软件中没有提供蜂 窝结构的材料模型,因此需要通过蜂窝结构的等效模 型对其进行有限元建模和分析。目前蜂窝板等效理 论主要有3种,即三明治夹芯板理论、蜂窝板理论和 等效板理论<sup>[7]</sup>。其中等效板理论是将整个蜂窝夹层 板结构等效成等刚度的各向同性的简单板,然后根据 刚度相等推导出等效板的弹性模量和厚度,再根据质 量相等推导出等效板的弹性模量和厚度,再根据质 量相等推导出等效板的密度。虽然通过此理论等效 的模型形式简洁、建模简便,但在对蜂窝板结构进行 模拟计算时仍可获得较精确的计算结果。因此,采用 等效板理论对蜂窝板进行等效建模。

3)组合式缓冲装置的材料由可挤压泡沫材料塑料和蜂窝纸板材料组成。将组合式缓冲装置分为4层,每层厚度为100mm,因为蜂窝纸板的强度极限较大,因此采用串联的组合形式按照"蜂窝纸板-可挤压泡沫塑料-可挤压泡沫塑料-蜂窝纸板"的顺序对其



图 2 组合式缓冲装置 Fig. 2 Combination buffer device

## 2.3 材料的定义

ABAQUS 拥有极其丰富的材料库,可以模拟绝大 多数的工程材料,如金属、橡胶、泡沫塑料、复合材料、 土壤、岩石以及钢筋混凝土等。所用到的材料性能参 数见表1。

表1 材料性能参数

Tab.1 Material property parameters

如此夕积	计划反称	ho /	Ε	
即任石仰	初种石协	$(t \cdot m^{-3})$	/ MPa	μ
空投战车	硬铝合金	2.7	70 000	0.3
可挤压泡沫缓冲装置	聚氨酯泡沫塑料	0.05	3	0
蜂窝纸板缓冲装置	蜂窝纸板	0.01	3.5	0.3
货台	硬铝合金	2.7	70 000	0.3
地面	混凝土	2.2	10 000	0.25

## 3 空投系统动态响应分析

根据破损边界理论<sup>[3]</sup>,在空投过程中可以用最大 冲击加速度和脉冲持续时间来衡量空投战车的安全 性。另外,根据空投轻量化的指标,还需要考虑空投 系统的整体质量。因此可以通过分析空投战车在着 陆冲击时的最大冲击加速度、稳定时间以及缓冲装置 的重量这3个不同的指标对缓冲装置的缓冲性能进 行评估。将空投战车的过载系数设定为40g(g为重 力加速度),脉冲持续时间取第一次冲击地面后的稳 定时间,设定战车的冲击加速度在最大冲击加速度的 5%范围内时战车处于稳定状态。为减小计算成本, 仿真计算过程从空投战车临近地面的那一时刻开始, 并假设战车在无横风、着陆速度为6m/s的情况下垂 直降落在水平硬质混凝土地面,且战车在临近地面时 刻只受重力的作用。

## 3.1 可挤压泡沫作用下的仿真分析

通过 ABAQUS 软件的后处理功能得到空投战车

的冲击加速度曲线见图3。从图3可以看出,该战车



图 3 战车在可挤压泡沫缓冲下的冲击加速度曲线 Fig. 3 The impact acceleration curve of the car on foam buffer device

的冲击加速度大约在 0.024 s 时第一次出现峰值,其 值为 34.32g。之后由于系统阻尼的存在,战车的冲 击加速度的幅值在不断的衰减,在大约 0.435 s 时冲 击加速度降为-1.69g(在 34.32g×5% 范围内),即从 空投系统接触地面那一时刻算起,在经历 0.435 s 后 空投系统第一次与地面的冲击过程结束,系统趋于稳 定状态。

可挤压泡沫缓冲装置的应力云图见图4,从图4



图 4 可挤压泡沫缓冲装置应力云图(MPa) Fig. 4 The stress cloud of foam buffer device

可以看出缓冲装置应力较大的地方主要出现在战车 后两排轮胎与缓冲装置的接触处,最大应力出现在第 3 排轮胎与缓冲装置的接触处,这是因为战车上的炮 塔和发动机都安装在此轮胎上侧的车架上。缓冲装 置的最大应力为1.467 MPa,未超过了聚氨酯泡沫塑 料的强度极限1.67 MPa,缓冲装置不会发生破坏性 变形。

## 3.2 蜂窝纸板作用下的仿真分析

在蜂窝纸板缓冲的作用下,空投战车的冲击加速 度曲线见图5。从图5可以看出,该战车的冲击加速度 大约在0.024 s时第一次出现峰值,其值约为37.90g大

49



图 5 战车在蜂窝纸板缓冲装置下的冲击加速度曲线 Fig. 5 Impact acceleration curve of the car on honeycomb paperboard buffer

于 34. 32g,这主要是由 2 种材料的弹性模量不同造成 的。随后,由于系统阻尼的影响,战车冲击加速度的 幅值在不断的衰减,在大约 0. 402 s 时冲击加速度降 为-1. 84g(在 37. 90g× 5% 范围内),即0. 402 s 时空 投系统在与地面的第一次冲击结束,系统趋于稳定。 通过前文的分析可以看出,虽然在采用蜂窝纸板缓冲 装置时战车的最大冲击加速度大于采用可挤压泡沫 缓冲装置时的最大冲击加速度,但是在采用蜂窝纸板 材料时其脉冲持续时间降低,可以减小对战车的损害 程度。

蜂窝纸板缓冲装置的应力云图(见图6)显示:缓

图 6 蜂窝纸板缓冲装置应力云图(MPa) Fig. 6 Stress cloud of honeycomb paperboard buffer

冲装置应力较大的地方仍然集中在缓冲装置与战车 后两排轮胎的接触处,其最大应力的位置在第三排轮 胎与缓冲装置的接触处,但最大应力为 3.007 MPa, 大于 1.467 MPa,这是因为在蜂窝纸板缓冲装置下冲 击加速度较大造成的。虽然应力较大但是并没有超 过材料的强度极限 10.3 MPa,缓冲装置没有发生破 坏性变形。

### 3.3 组合式缓冲作用下的冲击响应分析

根据前文对战车冲击加速度曲线的分析,在综合

考虑 2 种缓冲装置利弊的情况下,提出了组合式缓冲 装置的构想,再次对组合式缓冲装置与战车这一空投 系统进行建模仿真分析。

在组合式缓冲装置作用下,空投战车的冲击加速 度曲线见图7,从图7可以看出该战车的冲击加速度



图7 战车在组合缓冲装置下的冲击加速度曲线



大约在 0.024 s 时第一次出现峰值,通过对比发现出 现峰值的时间与采用前 2 种缓冲装置出现峰值的时 间相同。战车的最大冲击加速度为 35.63g,这是由 组合式缓冲装置的材料性质决定的。在出现峰值之 后,空投系统冲击加速度曲线呈波浪状上下浮动,目 幅值在不断的衰减,在大约 0.408 s 时冲击加速度降 为-1.55g(在 35.63g× 5% 范围内),即空投系统在 0.408 s 时开始趋于稳定。

根据组合式缓冲装置的应力云图(见图8)可以



图 8 蜂窝纸板组合缓冲装置应力云图(MPa) Fig. 8 The stress cloud of combination buffer

看出,组合式缓冲装置的应力分布情况与前2种缓冲 装置的应力分部情况基本相同。该缓冲装置的最大 应力为2.372 MPa,出现在缓冲装置的最上层,而此 组合式缓冲装置的最上层为蜂窝纸板,因此能够满足 强度要求,缓冲装置不会发生破坏性变形。

#### 3.4 分析结果

3 种不同缓冲装置的仿真分析数据见表 2。通过

50 I

表2可以看出:

表 2 不同缓冲装置下的仿真数据

Tab.2 Simulation data of different buffer device

缓冲方式	最大冲击	脉冲持续	质量	应力
	加速度/g	时间/s	∕kg	/MPa
可挤压泡沫	34.32	0.435	108	1.467
蜂窝纸板	37.90	0.402	21.6	3.007
组合式	35.63	0.408	129.6	2.372

1)3种不同缓冲装置下的最大冲击加速度均小于战车的过载系数40g,缓冲装置的最大应力也均未超过其强度极限,即达到安全性指标。

2)空投战车在可挤压泡沫塑料缓冲作用下的最大冲击加速度小于蜂窝纸板缓冲作用下的最大冲击加速度,而前者的脉冲持续时间大于后者的脉冲持续时间,这主要是由蜂窝纸板的弹性模量大于可挤压泡沫塑料的弹性模量决定的,符合前文提到的跌落冲击理论。

3)组合式缓冲作用下的最大冲击加速度介于前 2种缓冲装置之间,相对于第2种缓冲装置,可以降低最大冲击加速度,提高空投战车的安全系数。其脉冲持续时间和质量也介于前2种缓冲装置之间,相对第一种缓冲装置,可以在缩短系统振动时间提高稳定性的同时,降低空投系统的总体质量。

## 4 结论

针对某战车在空投过程中缓冲装置的选型问题, 利用 ABAQUS 软件建立了该战车空投系统的有限元 模型,分析了战车在泡沫缓冲装置和蜂窝纸板缓冲装 置作用下的冲击加速度和脉冲持续时间,在此基础上 提出了组合式缓冲装置的构想并对其进行仿真分析。 仿真结果显示,战车在组合式缓冲装置作用的下的最 大冲击加速度为 35.63g 介于战车在其余 2 种缓冲装 置作用下的最大冲击加速度 34.32g 和 37.90g 之间; 其脉冲持续时间为 0.408 s,也介于战车在其余 2 种 缓冲装置作用下的缓冲持续时间 0.435 s 和 0.402 s 之间。对比分析结果表明:组合式缓冲装置可以在 一定程度上提高战车的安全性,具有较好的缓冲性 能。

#### 参考文献:

[1] 郝贵祥,王红岩,洪煌杰.空降车着陆缓冲过程仿真研究
 [J]. 机械科学与技术,2012,31(2):340-344.
 HAO Gui-xiang, WANG Hong-yan, HONG Huang-jie. Numerical Simulation of Landing Cushion Process for Airborne

Vehicle[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(2):340–344.

- [2] 刘霞,齐欢. 空投物资冲击过程中的缓冲性能分析[J]. 包装工程,2006,27(2):70-72.
  LIU Xia,QI Huan. Cushion Performance Analysis of the Impact Response of Airdropping Cargo[J]. Packaging Engineering,2006,27(2):70-72.
- [3] 刘霞,齐欢,陈迎春. 空投货物冲击过程的仿真[J]. 包装 工程,2005,26(5):28-30.
  LIU Xia, QI Huan, CHEN Ying-chun. Simulation of the Impact Response of Airdropping Cargo[J]. Packaging Engineering,2005,26(5):28-30.
- [4] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于 ABAQUS 的有限元分析 和应用[M].北京:清华大学出版社,2009:190-191.
  ZHUANG Zhuo, YOU Xiao-chuan, LIAO Jian-hui. Finite Element Analysis and Application Based on ABAQUS[M].
  Beijing:Tsinghua University Press,2009:190-191.
- [5] 杨雪松, 王乘, 李振环. 超低空空投过程的仿真[J]. 华中 科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(4):108-110.
  YANG Xue-song, WANG Cheng, LI Zhen-huan. Simulation of Airdropping at A Super-Low-Altitude [J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech (Nature Science Edition), 2003, 31 (4):108-110.
- [6] 彭键林.蜂窝纸板力学性能分析研究[D].昆明:昆明理 工大学,2008.
   PENG Jian-lin. Research on Static Properties of Honeycomb Paperboard[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2008.
- [7] 秦玉灵,孔宪仁,罗文波.基于响应面方法的碳纤维蜂窝 板有限元模型修正[J].振动与冲击,2011,30(7):71-76.

QIN Yu-ling, KONG Xian-ren, LUO Wen-bo. RSM-based FEM Model Updating for A Carbon Fiber Honeycomb Sandwich Panel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (7):71-76.