

着陆气囊缓冲过程数值模拟研究

何健¹, 马吉胜¹, 吴大林¹, 邓士杰¹, 孙也尊²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 二四七厂军事代表室, 太原 030000)

摘要: **目的** 对某大型空降装备着陆缓冲系统的可排气型气囊缓冲过程进行数值模拟研究。**方法** 基于有限元方法, 建立着陆缓冲系统的有限元模型, 采用控制体积法, 利用显式动力分析软件LS-DYNA对着陆气囊的缓冲过程进行数值模拟, 分析了气囊缓冲过程中气囊内压、气囊剩余高度和气囊排气速率等特性的变化规律, 以及气囊织布的弹性模量、排气压力和排气口面积等主要参数变化时对气囊缓冲特性的影响规律。**结果** 对气囊的缓冲特性影响较大的参数为气囊的排气压力和排气口面积, 当气囊织布的弹性模量高于0.2 GPa时, 弹性模量的变化对气囊的缓冲特性影响较小。**结论** 研究结果可为工程人员进行气囊初始设计和对气囊缓冲过程进行模拟仿真提供参考。

关键词: 着陆气囊; 数值模拟; 控制体积法; 缓冲特性

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)13-0069-05

Numerical Simulation of Airbag Cushion Process of Landing

HE Jian¹, MA Ji-sheng¹, WU Da-lin¹, DENG Shi-jie¹, SUN Ye-zun²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. The Military Representative Office in 247 Factory, Taiyuan 030000, China)

ABSTRACT: In this research, the numerical simulation of the cushion process of the exhausting airbag in the landing system of the large airborne equipment was conducted. Based on the finite element method, the finite element model of landing cushion system was established. Using the control volume method, the dynamic analytical software LS-DYNA was adopted to simulate the airbag cushion process and obtain the changing patterns of the airbag parameters such as the internal airbag pressure, the residual airbag height and the velocity of air exhausting, then the influencing rules were analyzed of the changes of main parameters (elastic modulus of the airbag weaving, exhaust pressure, exhaust port area) on the cushioning property of the airbag. The research results showed that the exhaust pressure and the exhaust port area had greater influence on the airbag cushioning property. When the elastic modulus of the airbag fabrics was higher than 0.2 GPa, less effect of elastic modulus on the airbag cushioning property was observed. The results of the study can provide reference on airbag initial design and simulation of the airbag cushion process for the engineering personnel.

KEY WORDS: landing airbag; numerical simulation; control volume method; cushioning property

气囊缓冲技术是最常用的着陆缓冲技术之一, 缓冲气囊凭借高效的缓冲性能、低廉的成本在装备空投领域得到了广泛使用^[1-3]。由于气囊缓冲着陆的模拟试验受实际工况的影响较大, 试验难以实现, 且成本较高。随着计算机技术和有限元理论的快速发

展, 对于气囊缓冲过程的仿真研究成为了新的发展方向^[4-5], 目前, 关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^[6-8], 由于气囊的缓冲过程分析涉及有效载荷与囊内气体之间的耦合作用, 因此, 对于这类分析必须采用耦合分析技术^[9]。控制体积法(CV

收稿日期: 2014-12-29

作者简介: 何健(1991—), 男, 陕西渭南人, 军械工程学院硕士生, 主攻多体系统动力学仿真。

通讯作者: 马吉胜(1967—), 男, 河北阜城人, 博士, 军械工程学院教授、博导, 主要研究方向为多体系统动力学、虚拟样机技术和振动信号处理。

算法)基于热力学理论,计算速度快,能够比较准确地模拟气囊展开后期的作用^[10],对于空降着陆气囊而言,主要关心气囊充气完成后的状态,这时气室内压力均等。这里采用控制体积法,利用LS-DYNA软件对可排气型着陆气囊的缓冲过程进行数值模拟,得到缓冲气囊的囊压、气囊高度等参数的变化规律,并分析了气囊织布的弹性模量、排气压力和排气口面积等主要参数变化对气囊缓冲特性的影响。

1 控制体积法理论基础^[11-15]

控制体积法对于气囊的模拟有2个方面的假设:气囊内的气体满足理想气体条件,可以适用于经典热力学方程;气囊室内的温度和压力分布均等。该方法将气囊室看作一个控制体积,由气囊织布表面的单元围成,见图1。

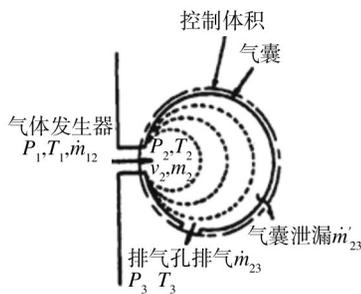


图1 控制体积法

Fig.1 The control volume method

1.1 气囊内部控制方程

假设控制体积内部的气体是理想气体,满足理想气体状态方程:

$$p_2 v_2 = m_2 R T_2 \quad (1)$$

式中: p_2 , v_2 , m_2 和 T_2 分别为气囊的压力、体积、气体质量、气体温度; R 为气体常数。

进一步假设气体热容量系数为常数,与外界没有热量交换,控制体积内部温度和压力是均匀的,于是由状态方程有:

$$p_2 = (k-1) \rho e \quad (2)$$

式中: ρ 为气体密度; e 为气体能量; $k=c_p/c_v$, c_p 为气囊气体的定压摩尔热容量, c_v 为气囊气体的定容摩尔热容量。

$$de = dU / (\rho v_2) = -p_2 dv_2 / (\rho v_2) \quad (3)$$

由式(2)(3)可以得到:

$$de/e = (1-k) dv_2/v_2 \quad (4)$$

于是气囊内气体满足方程:

$$\begin{cases} p_2 v_2 = m_2 R T_2 \\ p_2 = (k-1) \rho e \\ de/e = (1-k) dv_2/v_2 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 气囊排气量计算

控制体积内部气体质量的变化率是由 t 时刻流过边界的气体质量流量决定的:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{12} - (\dot{m}_{23} + \dot{m}'_{23}) \quad (6)$$

式中: \dot{m}_{12} 为流入气囊内的气体质量流量; \dot{m}_{23} 为经排气孔向外排出的气体质量流量; \dot{m}'_{23} 为经气囊织布之间的间隙泄漏出的其他质量流量。

气囊由纤维材料制成,泄压的特点是由压力高的一方向压力低的一方泄漏。于是单气室气囊对环境的总体泄漏可计算如下。

$$(\dot{m}_{23} + \dot{m}'_{23}) = \rho f_p (\Delta p) f_t (\Delta t) \quad (7)$$

式中: f_p, f_t 分别为与压力差相关和与时间相关的泄漏率系数。

1.3 气囊体积计算

对于控制体积的体积大小,根据格林积分定理,可以得到一封闭曲面积分与该封闭曲面所包围的体积积分的关系式:

$$\iiint (\psi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi \frac{\partial \psi}{\partial x}) dx dy dz = \oint \varphi \psi n_x d\tau \quad (8)$$

式中: ψ, φ 是在区域内的2个任意函数,在区域内二阶连续; n_x 为曲面法向与 x 轴夹角的余弦。

空间的体积公式为:

$$V = \iiint dx dy dz \quad (9)$$

令 $\varphi = x, \psi = 1$,则有 $V = \oint \varphi \psi n_x d\tau$, 表面积分可以用组成气囊的单元来估算:

$$\oint \varphi \psi n_x d\tau \approx \sum_{i=1}^n \bar{x}_i n_{ix} A_i \quad (10)$$

式中: \bar{x}_i 为单元小坐标的平均值; n_{ix} 为单元法向与 x 轴夹角的余弦; A_i 为单元的表面积; n 为单元总数。如果气囊网格上面有孔(气体发生器进气孔、节流孔等),则由计算软件自动用平面将孔封闭,从而形成封闭的曲面。

2 着陆缓冲系统有限元模型建立

以可排气型气囊空投缓冲系统为研究对象,该缓

冲系统由8个子气囊组成,每个气囊底部设有进气口,两侧面设有排气口,气囊在下落过程中依靠底部进气孔充气,气囊在着陆受到冲击时气囊先保持封闭,产生压缩以吸收能量,气囊内压升高,当内压升高到预定阈值时,排气口开启,囊内气体向外排气以耗散能量,直至缓冲过程结束。

2.1 模型结构和参数

整个模型由空降装备、气囊和着陆地面等3部分组成,因为这里主要研究气囊的缓冲特性,为了减小计算时间,所以将空降装备简化成刚性体,大小为:长5 m、宽1.7 m和高1.1 m,单元类型由SOLID164三维实体单元和SHELL163单元组成,选用刚性体材料(*MAT_RIGID),着陆地面采用LS-DYNA中的刚性面进行模拟。

单个着陆气囊的尺寸为:长1.1 m、宽0.8 m和高1.2 m,单元类型为SHELL163薄膜单元,气囊采用织布材料,因此,选用LS-DYNA中的34号正交各向异性材料(*MAT_FABRIC),选用CV法中的王氏方法定义气囊,其关键字^[14]为*AIRBAG_WANG_NEFSKE。

空降装备与气囊的连接用关键字*CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET完成,具体做法是将气囊与装备连接处的节点(即气囊上表面所有节点)建立*SET_NODES,空降装备作为主PART,将*SET_NODES附着到主PART上;空降装备与气囊之间的接触,及气囊与着陆地面之间的接触采用自动面接触定义(*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)。

2.2 网格划分

空降装备采用四面体自由网格的形式划分网格,网格密度为0.25 m,着陆气囊采用四边形映射网格划分,网格密度为0.05 m,整个模型网格划分为108 458个单元,共有90 861个单元节点,装备和气囊从距离地面1 m处,以初始速度为6.5 m/s的速度下落,缓冲系统模型见图2。

3 仿真计算及结果分析

利用LS-DYNA Solver求解器对关键字文件进行求解,时间为0.3 s,时间历程步长为0.0005 s,缓冲过程示意图见图3。图3反映了气囊着陆缓冲过程的系统状态,其中,气囊刚开始着陆的时刻、缓冲过程中的1个时刻和仿真结束时刻分别为0.138,0.218,0.300 s。



图2 着陆缓冲系统有限元模型

Fig.2 Finite element model of landing cushion system

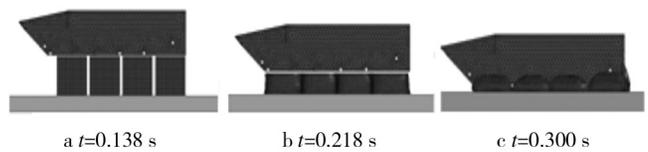


图3 着陆缓冲过程示意

Fig.3 The landing cushion process

从图3可以看出,随着气囊触地气囊开始被压缩,气囊高度逐渐下降,气囊内压增大向外膨胀,当气囊被压缩到一定程度时,气囊开始向外排气,气囊体积减小,直到装备着陆。

通过后处理软件LS-PrePost对仿真结果进行后处理,从中提取气囊内压、气囊剩余高度、气囊排气速率(这里以单个子气囊为例,后面相同)和装备速度的时间特性曲线分别见图4—7。从图4—7中可以得出如下所述的结论。

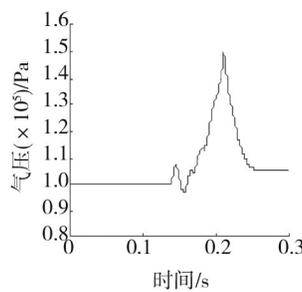


图4 气囊内压时间特性

Fig.4 The internal airbag pressure

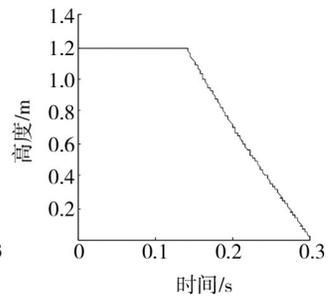


图5 气囊剩余高度时间特性

Fig.5 The residual height

1) 在初始时刻,气囊随着装备自由下落,装备下降速度逐渐增大,气囊内压和气囊剩余高度保持不变,气囊不排气;在139 ms时气囊接触地面,开始被压缩,气囊内压逐渐增大,对装备产生向上的作用力,装备速度开始减小,气囊高度逐渐减小,此时没有达到

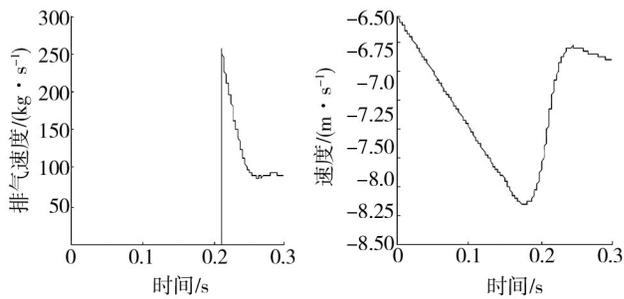


图6 气囊排气速率时间特性 图7 装备下落速度时间特性
Fig.6 The exhaust velocity of Fig.7 The velocity of equip-
airbag ment landing

排气压力,因此气囊仍不排气;在210 ms时气囊内压达到了排气压力1.5 atm(1 atm=101.325 kPa),此时气囊排气口被打开,气囊开始向外排气,气囊内压逐渐减小,当气囊内压减小到一定程度时,气囊对装备的作用力小于装备的重力,此时装备速度进一步增大,气囊剩余高度继续减小。

2) 气囊内压到达排气压力后,气囊开始向外排气,由于气囊排气的速率与气囊内压是成正相关的,因此,此时的排气速率是最快的,随着气囊内压的减小,气囊向外排气的速率也随之减小,在缓冲的后期,气囊内压趋于稳定,这是由于气囊被压缩减小的体积与气囊向外排气的体积基本相同,导致气囊内压稳定在1.05 atm(1 atm=101.325 kPa)左右。

4 气囊主要参数变化对气囊缓冲特性的影响

由于该研究的气囊是在空中下落过程中依靠底部进气孔充气,因而初始充气压力 p_0 为1 atm。下面主要讨论初始压力 p_0 为1 atm时气囊织布的弹性模量、气囊排气压力和气囊排气口面积等参数变化对气囊缓冲特性的影响,具体参数设置见表1。

表1 气囊参数对比

Tab.1 The comparison of airbag parameters

编号	排气压力/atm	总排气口面积/m ²	织布弹性模量/GPa
1	1.3	0.8	0.2
	1.5		
	1.7		
2	1.5	0或0.6	0.2
		0.8或1.0	
3	1.5	0.8	0.02
			0.2
			2

4.1 排气压力的影响

单个气囊排气口面积为0.1 m²,所有气囊的排气口面积之和为0.8 m²,气囊织布的弹性模量为0.2 GPa,排气压力为1.3 p_0 ,1.5 p_0 和1.7 p_0 的情况下,气囊的缓冲特性曲线(装备的下落速度、冲击加速度、气囊内压和气囊上表面高度的时间历程曲线)见图8。

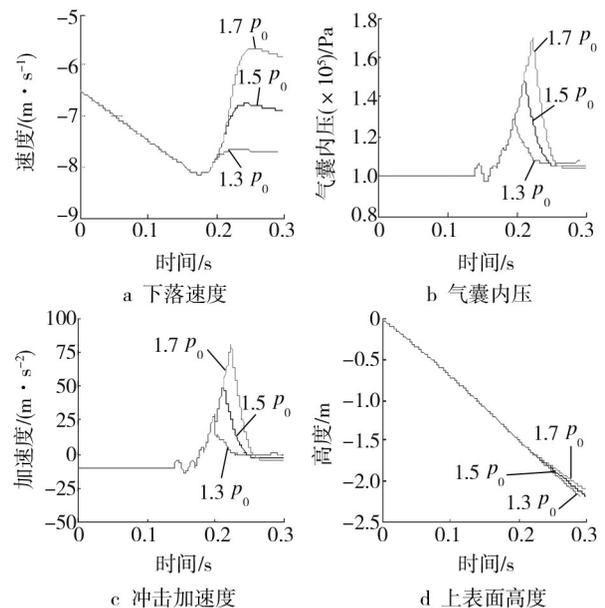


图8 排气压力对气囊缓冲特性的影响

Fig.8 The influence of exhaust pressure on airbag cushioning property

从图8可以看出,气囊排气压力的增大,可以有效地减小装备着陆时的速度,着陆时速度较小意味着装备触地时能量较小,装备触地时所受到的冲击加速度会减小,但同时装备受气囊缓冲过程的冲击加速度增大,而且排气压力增大会对气囊织布的性能有较高的要求,因此,排气压力的设置需要综合考虑装备在缓冲过程和触地过程中所受的冲击过载。随着气囊排气压力增大,会导致气囊排气速率较快,因而在缓冲的后期气囊稳定的内压值应相对低一些。

4.2 排气口面积的影响

排气口面积的大小也是影响气囊缓冲特性的主要因素,取气囊织布弹性模量为0.2 GPa,排气压力为1.5 p_0 ,所有气囊的排气口面积之和分别为0,0.3,0.8,1.0 m²时气囊的缓冲特性时间历程曲线见图9。

从图9可以看出,当排气口面积为0时,也就是密闭型气囊时,气囊内压持续升高,此时装备过载达到了18.6 g,并且产生了弹跳。当排气口面积为0.3 m²

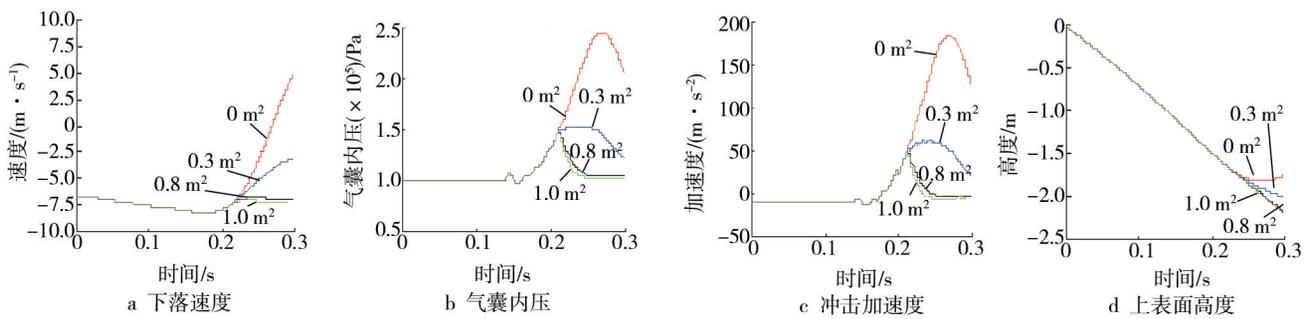


图9 排气口面积对气囊缓冲特性的影响

Fig.9 The influence of exhaust area on airbag cushioning property

时,气囊能量得不到及时释放,导致气囊内压有一段时间超过了排气压力,对装备的减缓作用明显,但装备受到的过载也相对较高。当排气口面积增大时,对装备的减速作用减弱,会使装备与地面产生硬接触,因此,对缓冲气囊设计时应选取合适的排气口面积。

4.3 气囊织布弹性模量的影响

气囊织布的弹性模量影响气囊的储能及变形等特性,常用气囊的弹性模量一般为1~1000 MPa^[6],取所有气囊排气口面积之和为0.8 m²,排气压力为1.5 p₀,气囊弹性模量分别为0.02, 0.2, 2 GPa时气囊的缓冲特性时间历程见图10。

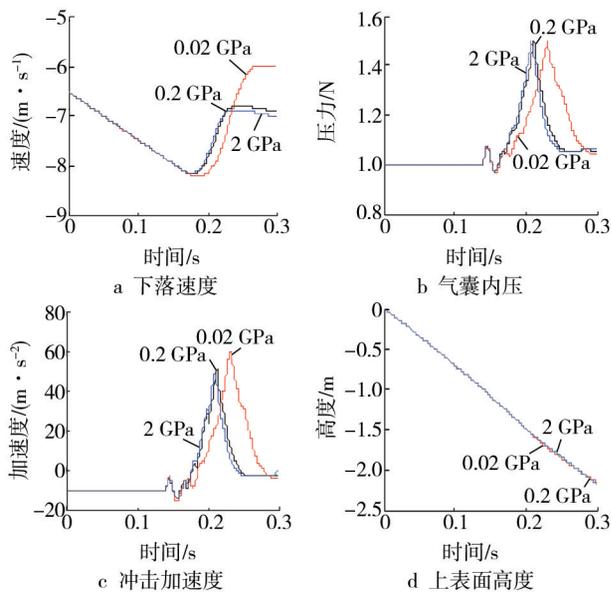


图10 气囊织布弹性模量对缓冲特性的影响

Fig.10 The influence of airbag fabric elastic modulus on airbag cushioning property

从图10可以看出,当气囊织布弹性模量减小为0.02 GPa时,由于气囊织布的储能作用,使得气囊内压上升较缓慢,最大内压到达时间滞后,气囊着陆速度

减小,同时由于气囊对装备的作用面积增大,导致最大过载值升高,当气囊织布弹性模量超过0.2 GPa时,弹性模量变化对气囊缓冲特性影响较小。但气囊织布的弹性模量较小时,对接触地面的要求较高,当地面过硬时气囊织布会被穿透。由此,在选择气囊织布弹性模量时,需要综合考虑着陆地面情况及装备的过载情况。

5 结语

建立了一种可排气型气囊着陆缓冲系统的有限元模型,基于控制体积法对气囊的缓冲过程进行了数值模拟研究,得到了气囊缓冲过程各参数(气囊内压、气囊剩余高度及气囊排气速率)的变化规律,并且分析了气囊主要参数变化时对气囊缓冲特性的影响。研究表明:对气囊的缓冲特性(装备着陆时的速度和着陆过程中所受到的冲击加速度)影响较大的参数为气囊的排气压力和排气口面积,当气囊织布的弹性模量高于0.2 GPa时,弹性模量的变化对气囊的缓冲特性影响较小。

参考文献:

- [1] 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(5): 16—20.
LI Liang-chun, HUANG Gang, LI Wen-sheng, et al. Simulation Analysis of New Type Landing Cushioning Airbag Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2012, 33 (5) : 16—20.
- [2] 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—8.
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—8.
- [3] 王晓东,张金换,黄世霖. 气囊模拟计算技术综述[J]. 汽车

- [J]. 包装工程, 2011, 32(3): 103—104.
WAN Min, TAO Qiang, CUI Peng. Development of Dangerous Goods Packaging and Discussion on Common Quality Problems[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 103—104.
- [14] 黄锐. 电石钢桶鉴定中不合格原因初探[J]. 中国检验检疫, 2001(6): 30—32.
HUANG Rui. Discussion on the Reason of the Unqualified Identification of Calcium Carbide Steel Drums[J]. China Inspection and Quarantine, 2001(6): 30—32.
- [15] 黄现. 危险化学品包装常见质量问题及检测应对[J]. 中国包装, 2011(8): 56—58.
HUANG Xian. Dangerous Chemicals and Packaging Quality Problems and Detection Response[J]. China Packaging, 2011(8): 56—58.
-
- (上接第73页)
- 技术, 2000(9): 4—7.
WANG Xiao-dong, ZHANG Jin-huan, HUANG Shi-lin. Airbag Simulation Computing Technology Overview[J]. Automotive Engineering, 2000(9): 4—7.
- [4] EWING, LIEUTENANT C B. Precision Parachute Capabilities and Their Potential Employment in the Land Force[J]. Canadian Army Journal, 2005, 8(3): 83—92.
- [5] WEN Jin-peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Study on Cushioning Characteristics of Soft Landing Airbag with Elastic Fabric[J]. International Journal of Applied Electronics and Mechanics, 2010, 33(3/4): 1535—1545.
- [6] 杨卫, 齐明思, 张皎. 冲压式快速空投硬式气囊缓冲技术研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 106—108.
YANG Wei, QI Ming-si, ZHANG Jiao. Research on Punched Quick Airdrop Cushion[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 106—108.
- [7] 田婧婷. 汽车正面安全气囊充气过程模拟及试验验证技术[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
TIAN Jing-ting. Simulation and Test Verification Technology of Vehicle Frontal Airbag Inflating Process[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [8] ZHANG Jun-yuan, LI Dong-jun, BI Ying, et al. Optimization of Vehicle Side Curtain Airbag Module Based on Computer Aided Engineering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(4): 521—527.
- [9] AUDREY H D, FREDERIC R, PASCAL D, et al. Determination of Pre-impact Occupant Postures and Analysis of Consequences on Injury Outcome—Part II: Biomechanical Study[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(1): 75—81.
- [10] 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.
- [11] 程涵. 气囊工作过程仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
CHENG Han. Numerical Simulation Research on Airbag Working Process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [12] 代小芳. 基于流固耦合方法的气囊展开数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
DAI Xiao-fang. Numerical Simulation of Airbag Deployment based on Fluid-Structure Interaction Methodology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [13] 徐静静. 基于流-固耦合模型的气囊织物动态力学仿真研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
XU Jing-jing. Numerical Simulation of Airbag Dynamic Mechanical Performance Based on Fluid-Structure Interaction Approach[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [14] 戈嗣诚, 施允涛. 无人机回收气囊缓冲特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(4): 458—463.
GE Si-cheng, SHI Yun-tao. Study on Cushioning Characteristics of Air Bag for RPV Recovery[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 31(4): 458—463.
- [15] 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. Numerical Simulation and Optimal Design of the Process of Airbag Landing[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [16] 陈帅, 李斌, 温金鹏, 等. 软着陆气囊缓冲特性与参数设置的理论研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4): 25—29.
CHEN Shuai, LI Bin, WENG Jin-peng, et al. Cushioning Characteristic and Parameter Design of a Soft Landing Airbag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4): 25—29.