

主辅式气囊排气口设置及其阈值参数研究

孙宁国¹, 李良春², 张俊坤², 高飞²

(1.陆军工程大学, 石家庄 050000; 2.军械技术研究所, 石家庄 050000)

摘要: 目的 分析主辅式气囊排气口面积与开启气压阈值对气囊冲击加速度、速度等缓冲特性产生的影响, 以提高气囊缓冲性能。方法 根据动力学与热力学相关理论建立排气口有开启阈值的主辅式气囊理论模型。结果 增大主气囊排气口面积可使载荷加速度第1峰值减小, 第2峰值增大, 增大主气囊排气口面积效果相反; 增大辅气囊排气口面积, 载荷第2加速度峰值减小, 增大辅气囊排气口面积效果相反。结论 通过文中的解析模型合理设计了主、辅气囊排气口面积, 对主气囊排气口设开启阈值可有效降低气囊过载, 提高了气囊缓冲性能。

关键词: 主辅式气囊; 排气口; 阈值; 缓冲

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)19-0153-05

Vent Setting and Threshold Parameters of Slave-master Airbag

SUN Ning-guo¹, LI Liang-chun², ZHANG Jun-kun², GAO Fei²

(1.Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China;

2.Ordnance Technology Institute, Shijiazhuang 050000, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the influence of vent area and opening pressure threshold of the slave-master airbag on the airbag impact acceleration, speed and other cushioning characteristics, so as to improve the airbag cushioning performance. The theoretical model for the slave-master airbag with the opening vent thresholds was established according to the relevant theories of dynamics and thermodynamics. The increase in the master airbag's vent area could reduce the first peak of the load acceleration and increase the second peak. Reverse effects would be achieved with the increase in the master airbag's exhaust threshold. The increase in the vent area of the slave airbag, the second acceleration peak of the load would be reduced. Reverse effects would be achieved with the increase in the slave airbag's exhaust threshold. Through the analytical model herein, the vent area of the slave-master airbag was reasonably designed. The opening threshold set for the master airbag vent can effectively reduce the airbag overload and it has improved the strong cushioning performance.

KEY WORDS: slave-master airbag; vent; threshold; cushioning

气囊缓冲是一种效果显著、成本低且常用的缓冲方式, 在装备或后勤物资等空投方面具有广泛应用前景^[1-7]。气囊缓冲特性研究通常有3种方式, 即解析模型、有限元仿真、试验^[8]。解析与有限元仿真相比试验周期短, 参数设计便利。Esgar^[9]等建立了缓冲气囊的解析模型, 分析了各参数对缓冲性能的影响。牛四波^[10]等建立了重装空投双气室气囊的解析模型, 研究了主辅气囊各参数对缓冲性能的影响。尹汉锋^[11]等利用仿真与遗传算法优化了空投缓冲气囊各项参

数。文中针对主辅式气囊排气口相关参数对气囊缓冲特性的影响, 根据相关动力学与热力学方程, 建立了缓冲的解析模型, 得到相应加速度、速度、高度以及压强对时间的曲线, 研究了主、辅气囊排气口面积以及开启阈值大小对缓冲性能的影响。

1 主辅式气囊模型

主辅式气囊由主气囊与辅气囊构成, 又称双气室

收稿日期: 2017-04-08

作者简介: 孙宁国 (1992—), 男, 陆军工程大学硕士生, 主攻通用装备物流工程及其应用。

通讯作者: 李良春 (1967—), 男, 博士, 军械技术研究所高级工程师, 主要研究方向为装备供应保障。

气囊。主气囊底部设有进气口,利用空投物下落速度集气,无需气源。主气囊与辅气囊之间通过排气口相互连通,辅气囊设有外界相通的排气口。载荷只与主气囊上表面接触,辅气囊并不直接对载荷产生作用力。着陆时主气囊首先受压,在达到排气气压阈值后向辅气囊排气泄压,辅气囊充满后向外界排气泄压。相比单气囊,增加辅气囊对压缩空气具有延缓放气作用。

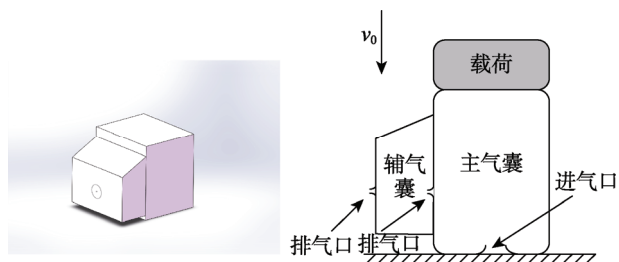


图1 主辅式气囊

Fig.1 Slave-master airbag

为方便研究,对主辅式气囊缓冲过程作如下假设:由于缓冲时间极短,忽略气囊与外界热量交换,整个缓冲过程视为等熵压缩过程;气囊壁无弹性、不透气,忽略其吸能作用;忽略辅气囊随主气囊压缩拖拽产生的形变;忽略水平方向速度,只研究具有垂直初速度的气囊缓冲。

2 缓冲解析模型

2.1 载荷运动方程

根据载荷受力平衡,载荷受力方程为:

$$ma + mg = (p_z - p_a)S \quad (1)$$

式中: m 为载荷质量; p_z 为主气囊压强; p_a 为环境大气压; S 为载荷与主气囊接触面积。

载荷运动方程:

$$\begin{cases} v = \frac{dh}{dt} \\ a = \frac{dv}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: h 为气囊高度; v 为载荷下落速率。

2.2 气囊压缩方程

1) 主气囊方程。气囊着陆后受到压缩,在主气囊内压未到达排气口开启阈值前,排气口保持封闭,气囊处于绝压缩阶段,根据理想气体状态方程 $pV=mRT$,可得绝热压缩气体状态特征,主气囊内气体压强为^[12]:

$$p_z = p_{z0} \left(\frac{\rho_z}{\rho_{z0}} \right)^\gamma \quad (3)$$

式中: ρ_z 为主气囊内气体密度; ρ_{z0} 为主气囊内气体初始状态的密度; p_{z0} 为主气囊气体初始状态的

压强。

当主气囊内气体压强达到气囊排气口的排气阈值时,气囊开始向外界排气释能,此时气囊排气口可等效为喷管处理,因为气流高速通过长度很短的喷管,因此忽略与周围的热交换,又因流程很短,可视其为等熵流动,得主气囊排气口气体流量方程^[13-15]:

$$q_z = KS_z p_f \sqrt{\frac{2}{RT} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left(\frac{p_{z0}}{p_f} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \left[\left(\frac{p_z}{p_f} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (4)$$

式中: γ 为绝热系数,对于空气 $\gamma=1.4$; R 为气体状态常数,对于空气 $R=287 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; K 为排气口阻尼系数,通常为 1; T 为气体温度,在此取 273 K; S_z 为主气囊排气口面积; p_f 为辅气囊内气体压强。

主气囊内气体质量为未压缩时的初始质量减去主气囊受压向辅气囊排出的气体质量:

$$m_z = m_{z0} - \int_0^t q_z dt \quad (5)$$

2) 辅气囊方程。辅气囊在充满前,内部压强等于环境大气压:

$$p_f = p_a \quad (6)$$

根据理想气体状态方程 $pV=mRT$,辅气囊充满前体积随辅气囊内气体质量变化为:

$$V_f = \frac{m_f RT}{p_a} \quad (7)$$

辅气囊充满后,忽略主气囊压缩对其的拖拽形变,辅气囊气压为:

$$p_f = p_{f0} \left(\frac{m_f}{m_{f0}} \right)^\gamma \quad (8)$$

式中: p_{f0} 为辅气囊初始压强; m_f 为辅气囊内气体质量; m_{f0} 为辅气囊内气体初始质量。

在辅气囊排气口达到排气阈值后,排气口打开向外界排气,与此同时主气囊继续受压向辅气囊排气,辅气囊排气口气体流量方程为:

$$q_f = KS_f p_a \sqrt{\frac{2}{RT} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left(\frac{p_{f0}}{p_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \left[\left(\frac{p_f}{p_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (9)$$

辅气囊内气体质量为:

$$m_f = \begin{cases} \int_0^t q_z dt & \text{辅气囊充满前} \\ m_{f0} + \int_0^t q_z dt - \int_0^t q_f dt & \text{辅气囊充满后} \end{cases} \quad (10)$$

缓冲过程在主气囊高度下降为 0 时结束,根据式(1—10),可以建立气囊缓冲过程的解析模型,代入气囊参数进行求解。

2.3 解析模型验证

为验证解析模型正确性,选取了气囊基本参数:载荷质量为 1000 kg,下落速度为 -7 m/s,主气囊高

度为 1 m，载荷接触面积为 1.2 m²，辅气囊体积为 0.4 m³，主气囊排气口面积为 0.04 m²，辅气囊排气口面积为 0.02 m²。利用 LS-DYNA 软件求解有限元仿真

模型，得到对比见图 2。文中的解析模型在加速度、速度、高度与压强等 4 个方面的曲线变化均与有限元仿真结果一致，误差较小，验证了文中模型的正确性。

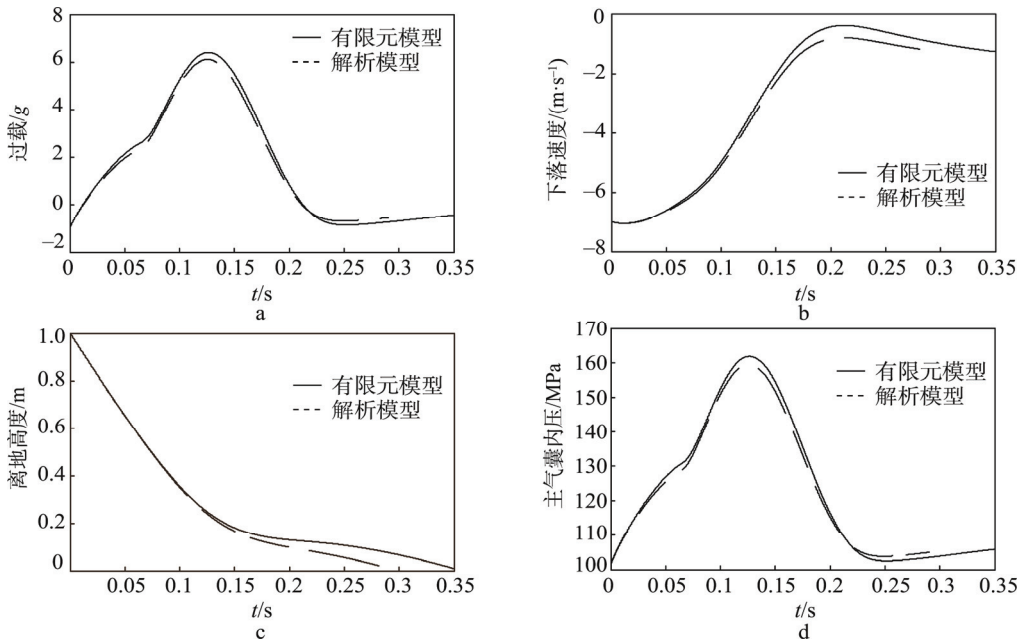


图 2 解析模型与有限元模型对比
Fig.2 Contrast of analytical and finite element models

3 排气口参数分析

3.1 排气口面积影响

在主、辅气囊都无排气阈值的情况下，分析气囊排气口面积对其性能影响。选取了 3 组参数见表 1，通过参数 1 与参数 2 对比分析主气囊排气口面积对缓冲特性的影响，参数 1 与参数 3 对比分析辅气囊排气口面积的影响。

表 1 气囊排气口面积参数 Tab.1 Airbag vent area parameters			m ²
参数	主气囊排气口面积 S_z	辅气囊排气口面积 S_f	
1	0.04	0.02	
2	0.05	0.02	
3	0.04	0.03	

由图 3 知，在辅气囊排气口面积固定时，增大主气囊排气口面积，造成主气囊维持高压时间缩短，载

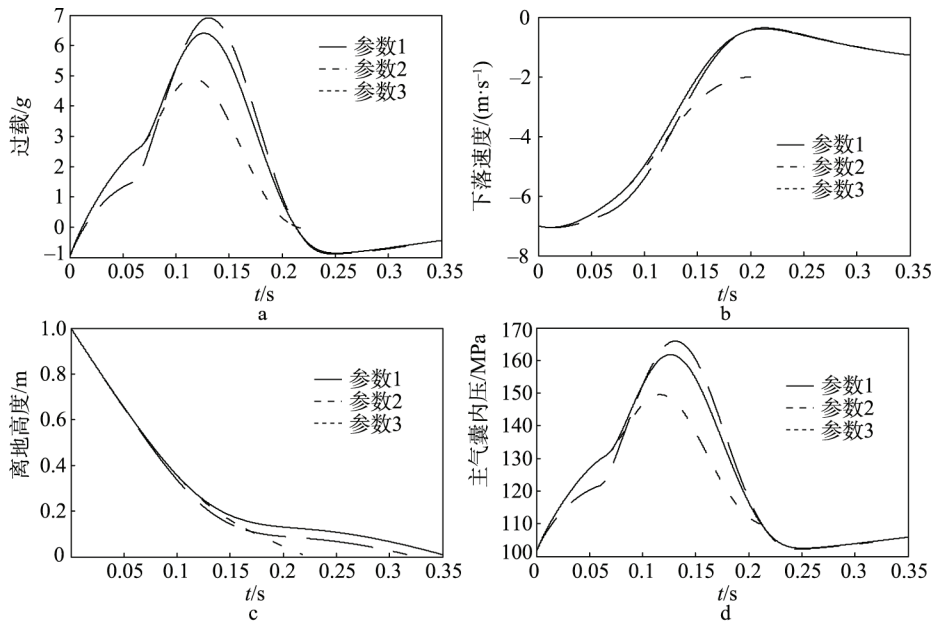


图 3 排气口面积大小对缓冲特性的影响
Fig.3 Influence of vent area size on cushioning characteristics

荷加速度第1峰值减小,第2峰值增加,最大加速度增大,缓冲时间缩短,但对载荷触地速度影响较小。主气囊排气口面积固定时,增大辅气囊排气口面积,气囊排气变快,载荷最大加速度减小,但缓冲时间也随之缩短,触地速度明显增大。

3.2 主气囊排气阈值影响

主气囊排气口有开启阈值,辅气囊排气口无阈值,分析主气囊排气口阈值影响,2排气口面积取表2参数值1,主气囊排气口开启阈值分别取101.325,121.325,141.325 kPa,其中101.325 kPa为对照组,等同于主气囊排气口常开无阈值。

由图4知,增大主气囊排气口排气阈值,载荷加速度第1峰值逐渐增大,第2峰值减小。可知在一定

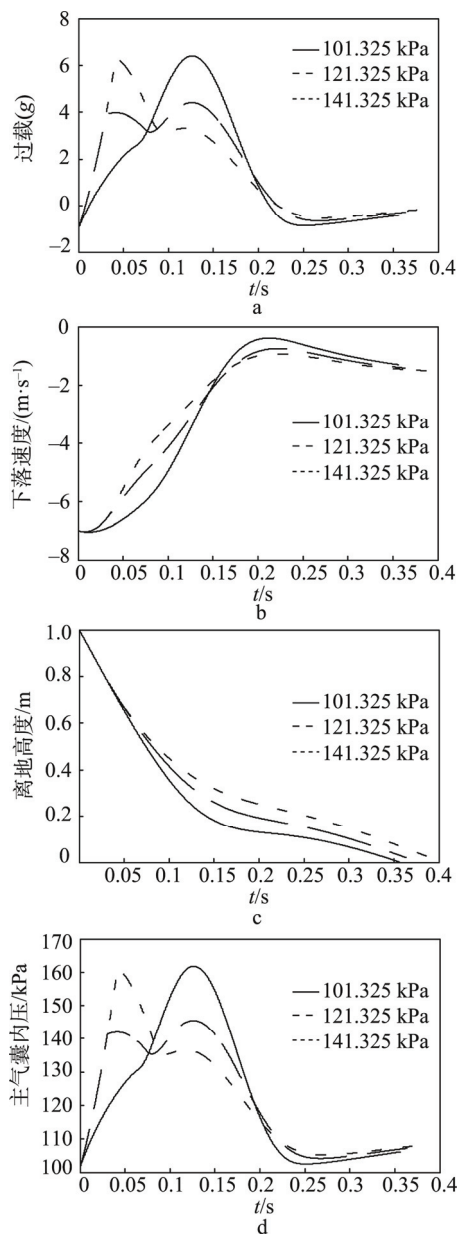


图4 主气囊排气口开启阈值对缓冲特性的影响
Fig.4 Effect of opening threshold of master airbag vent on cushioning characteristics

范围内,最大加速度先减小后增大,载荷触地速度变化较小,因此合理选择主气囊排气阈值可有效降低最大过载,提高缓冲性能。

3.3 辅气囊排气阈值影响

辅气囊排气口设排气阈值,主气囊排气口与辅气囊相通,无阈值。分析辅气囊排气口阈值大小对气囊性能的影响。排气口面积参数选取表2中参数1,辅气囊排气口开启阈值取101.325,131.325,161.325 kPa,其中101.325 kPa为对照组,等同于辅气囊排气口常开无阈值。阈值增大到131.325 kPa与161.325 kPa时,通过对比分析可得出,增大辅气囊排气阈值会带来载荷最大加速度的增长,载荷触地速度也会增大,但受其影响幅度小,因此,辅气囊排气口与外界相通更能发挥其对压缩空气起的延缓放气作用,对气囊整体缓冲性能更加有利,见图5。

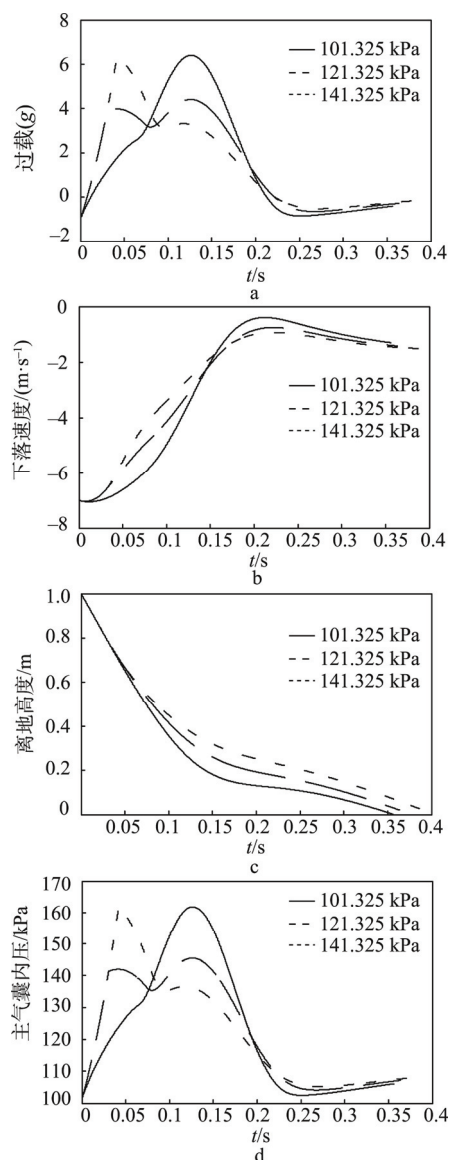


图5 辅气囊排气口开启阈值对气囊缓冲特性的影响
Fig.5 Effect of opening threshold of slave airbag vent on cushioning characteristics

4 结语

主气囊与辅气囊的排气口面积以及开启阈值对气囊缓冲性能都有不同影响。辅气囊排气口面积增大, 载荷最大加速度减小, 但触地速度明显增大; 增大主气囊排气口排气阈值, 载荷加速度第1峰值逐渐增大, 第2峰值减小; 增大辅气囊排气阈值会带来载荷最大加速度的增大, 因此不宜在辅气囊设阈值。通过文中的解析模型合理设计主、辅气囊排气口面积, 对主气囊排气口设开启阈值可有效降低气囊过载, 提高了强缓冲性能。文中建立的解析模型可对气囊的工程设计有实际指导意义。

参考文献:

- [1] 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): 144—146.
YU Cheng-guo, LI Liang-chun. Ways of Airdrop Safety Landing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 144—146.
- [2] 蔡文, 李斌, 温金鹏, 等. 无人机软着陆气囊缓冲特性研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1867—1875.
CAI Wen, LI Bin, WEN Jin-peng, et al. Research on Cushioning Characteristics of UAV Soft Landing Airbags[J]. Acta Armamentaria, 2014, 35(11): 1867—1875.
- [3] 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.
- [4] 曲普, 史锐, 李锦红, 等. 空投着陆气囊缓冲系统环境适应性研究[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 64—68.
QU Pu, SHI Rui, LI Jin-hong, et al. Cushioning Property and Environmental Adaptability of Airbag Landing System[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 64—68.
- [5] WANG J T. An Analytical Model for an Airbag with a Hybrid Inflator[J]. ASME Crashworthiness Occupant Prot Transportation Syst, 1995, 30: 467—497.
- [6] WANG J T, NEFSK D J. A New CAL3D Airbag Inflation Model[C]// SAE International Congress and Exposition, General Motors Research Laboratories, Society of Automotive Engineers, Detroit, 1998.
- [7] 文桂林, 雷志华, 尹建武, 等. 全向式多室连通气囊的缓冲特性研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(8): 13—17.
WEN Gui-lin, LEI Zhi-hua, YIN Jian-wu, et al. Cushion Characteristics of an Omni-directional and Multi-chamber Airbag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8): 13—17.
- [8] 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.
- [9] ESGAR J B, MORGAN W C. Analytical Study of Soft Landings on Gas-filled Bags[R]. NASATRR75: 5—20.
- [10] 牛四波, 王红岩, 迟宝山, 等. 重装回收系统双气室气囊缓冲特性分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 74—78.
NIU Si-bo, WANG Hong-yan, CHI Bao-shan, et al. Cushioning CHARACTERISTICS of Double-chamber Airbag for Heavy Equipment Recovery System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 74—78.
- [11] 尹汉锋, 文桂林, 韩旭. 空投设备缓冲气囊的优化设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1325—1327.
YIN Han-feng, WEN Gui-lin, HAN Xu. Optimal Design of Airbag Impact Attenuation System for Airdropping Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(5): 1325—1327.
- [12] 马常亮, 何欢, 陈国平. 气囊着陆缓冲系统的排气孔面积优化[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(4): 6—10.
MA Chang-liang, HE Huan, CHEN Guo-ping. The Optimization of Venting Area of Airbag Landing System[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(4): 6—10.
- [13] CADOGAN D, SANDY C, GRAHNE M. Development and Evaluation of the Mars Pathfinder Inflatable Airbag Landing System[J]. Acta Astronautica, 2002, 50(10): 633—640.
- [14] COLE J K, WAYE D E. BAG: A Code for Predicting the Performance of a Gas Bag Impact Attenuation System for the Pathfinder Lander[R]. SAND93 -2133, Albuquerque, New Mexico, November 1993.
- [15] 戈嗣诚, 陈斐. 智能气囊的冲击主动控制原理实验研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 600—603.
GE Si-cheng, CHEN Fei. Experimental Study on Theory of Impact Active Control of Intelligent Airbag[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 600—603.