

# 固定排气口型气囊冲击减缓特性研究\*

温金鹏<sup>1</sup>, 薛江<sup>1</sup>, 张思才<sup>1</sup>, 李斌<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所 绵阳, 621999) (2. 西北工业大学航空学院 西安, 710072)

**摘要** 为研究固定排气口型缓冲气囊冲击减缓特性, 基于能量守恒及热力学方程建立了固定排气口型气囊缓冲过程的解析模型, 并采用 LS-DYNA 和实验对其有效性进行了验证。基于该模型研究了竖直圆柱式气囊的缓冲特性, 开展了初始压力、排气口面积和排气口触发条件对竖直圆柱式气囊缓冲性能的影响研究, 并定义了初始极限压力。研究表明: 当初始压力小于初始极限压力时, 适当增大竖直圆柱式气囊的初始压力、选取合适的排气口触发条件, 均可将设备的峰值过载维持在一个合理水平的基础上, 减小气囊的体积; 采用合理的排气口设计参数, 可以提高系统的吸能率, 降低峰值过载, 同时避免设备的反弹。

**关键词** 航天器结构与设计; 冲击减缓; 气囊; 缓冲  
**中图分类号** V244.1; TH113

## 引言

缓冲气囊作为航空航天空投与软着陆技术领域一个极富应用前景的热点研究方向, 近年来受到较多的研究关注。缓冲气囊形式多样, 不同构型的缓冲气囊在重装空投防护、空间飞行器或无人机的软着陆等方面均起到了良好的缓冲防护效果<sup>[1]</sup>。近年来, 美国 ILC Dover 公司和 Airborne Systems North America(ASNA)公司分别开展了“猎户座乘员探测飞行器(Orion Crew Exploration Vehicle)”的第 1 代与第 2 代气囊着陆缓冲系统<sup>[2-4]</sup>设计研究, 推动了缓冲气囊的应用和发展。国内近年逐渐加大了对缓冲气囊的研究投入, 戈嗣诚等<sup>[5-6]</sup>探索了无人机伞降-气囊回收方式应用的可行性, 并开展了可主动控制冲击过载的智能气囊的试验研究。万志敏等<sup>[7]</sup>通过实验手段研究了飞行器模型的着陆特性以及封闭气囊特征内压。尹汉锋等<sup>[8]</sup>开展了空投设备缓冲气囊的仿真和优化设计研究。文献<sup>[9-10]</sup>等对空降车-气囊着陆缓冲过程进行了仿真分析及优化设计。刘鑫等<sup>[11]</sup>应用气体的热力学性质建立了气囊缓冲的动力学模型, 并进行了优化。陈帅等<sup>[12]</sup>建立了软着陆气囊缓冲响应的计算方法, 并对其缓冲

特性进行了研究。

综上所述, 目前缓冲气囊的工作性能可通过实验研究<sup>[2,4,6-7]</sup>和数值分析<sup>[3,5,8-16]</sup>等手段进行评估, 大部分工作均以缓冲过程中的峰值过载为指标, 对缓冲系统的吸能率涉及较少, 未能较为全面反映气囊缓冲系统的性能。本研究采用能量守恒及热力学方程建立了固定排气口型气囊的解析模型, 研究了竖直圆柱式气囊缓冲特性, 分析了排气口面积及触发条件、充气压力等条件对缓冲性能及吸能率的影响, 给出了气囊设计参数的选取建议。

## 1 固定排气口型缓冲气囊的动力学方程

假设固定排气口型缓冲气囊的囊内气体均为理想气体, 则气囊压缩变形、排气释能过程中能量守恒方程可表示为

$$\Delta W + \Delta Q_l = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta U + \Delta E_f \quad (1)$$

其中:  $\Delta W$  为外力对系统做功;  $\Delta Q_l$  为气囊排气释放的能量;  $\Delta E_k$  为系统的动能变化量;  $\Delta E_p$  为势能变化量;  $\Delta U$  为气囊内气体内能变化量;  $\Delta E_f$  为织物的弹性势能变化量。

式(1)中各项分别为

\* 国家自然科学基金青年基金资助项目(11602253); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3102014KYJD015)  
收稿日期: 2016-06-17; 修回日期: 2016-11-07

$$\begin{cases} \Delta W = \int -P_a A \dot{z} dt \\ \Delta Q_t = c_p \int \dot{m} T dt \\ \Delta E_k = \frac{M}{2} (\dot{z}^2 - \dot{z}_0^2) \\ \Delta E_p = Mg(z - z_0) \\ \Delta U = \int_{T_0}^T c_v m(t) dT = c_v [m(t)T - m_0 T_0] \\ \Delta E_f = \iiint_{V_{\text{fabric}}} \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV_{\text{fabric}} \end{cases} \quad (2)$$

其中： $\dot{m}$  为囊内气体质量变化率<sup>[17]</sup>。

$$\dot{m} = -KA_{\text{bag}} \frac{P}{R\sqrt{T}} \left(\frac{P_t}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{2g_c \left(\frac{\gamma R}{\gamma-1}\right) \left(1 - \left(\frac{P_t}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} \quad (3)$$

式(3)中喷管喉道处的压力  $P_t$  为

$$\begin{cases} P_t = P_a & (P_a > 0.528P) \\ P_t = \frac{P}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} & (P_a \leq 0.528P) \end{cases} \quad (4)$$

对缓冲过程中的系统进行受力分析,设备在缓冲气囊内压  $P$  (绝对压力)及大气压力  $P_a$  作用下,其垂直加速度为  $\ddot{z}$ 。设备上下表面受到的压差  $(P - P_a)A_c$  与设备自身的重力及垂直加速度  $\ddot{z}$  作用下的合力  $M(g + \ddot{z})$  相等,如图1所示,可得

$$M(g + \ddot{z}) = (P - P_a)A_c$$

即

$$M\ddot{z} = (P - P_a)A_c - Mg \quad (5)$$

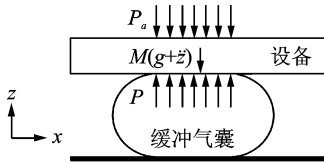


图1 设备的受力分析

Fig. 1 The force balance of the equipment

式(1)~(5)中各变量的物理意义如表1所示。

## 2 竖直圆柱式气囊的解析模型

竖直圆柱式气囊 (vertical cylindrical airbag, 简称 VCA) 在缓冲过程中,进行如下假设。

1) VCA 与地面以及设备底板的接触面积及气囊的横截面积均恒定,因此在缓冲过程中气囊仅轴向高度发生变化,其中四个时刻  $t_1 \sim t_4$  气囊的变形如图2所示, $D$  为气囊的直径, $z$  为设备离地面的高度。

表1 各变量的物理意义

Tab. 1 The physical meaning of various variables

符号	物理意义	符号	物理意义
$M$	设备质量	$P$	囊内压力
$z$	设备离地面的高度	$P_0$	囊内初始压力
$z_0$	设备离地面的初始高度	$P_a$	环境大气压力
$\dot{z}$	设备的垂直速度	$c_p$	定压比热
$\dot{z}_0$	设备初始着陆速度	$c_v$	定容比热
$\ddot{z}$	设备的垂直加速度	$m(t)$	$t$ 时刻囊内气体质量
$g$	重力加速度	$\dot{m}$	囊内气体质量变化率
$A_c$	气囊与设备的接触面积	$T$	囊内气体温度
$K$	排气口阻滞系数	$A_b$	气囊排气口面积
$R$	气体常数	$\gamma$	绝热系数
$g_c$	重力换算常数		

2) 气囊织布在缓冲过程中始终处于张紧状态,对于线弹性各向同性织布材料,在环向与轴向张力作用下,其环向应力  $\sigma_h$ 、轴向应力  $\sigma_t$  与对应的应变之间的本构关系满足

$$\begin{cases} \varepsilon_h = (\sigma_h - \mu\sigma_t)/E \\ \varepsilon_t = (\sigma_t - \mu\sigma_h)/E \end{cases} \quad (6)$$

此时气囊织物的弹性势能改变量  $\Delta E_f$  可简化为

$$\Delta E_f = \iiint_{V_f} \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV_f =$$

$$\frac{1}{2} \iiint_{V_f} (\sigma_h \varepsilon_h + \sigma_t \varepsilon_t) dV_f =$$

$$\frac{1}{2E} \iiint_{V_f} (\sigma_h^2 + \sigma_t^2 - 2\mu\sigma_h\sigma_t) dV_f =$$

$$\frac{\pi(5-4\mu)(P-P_a)^2 D^3 (2D+z)}{32Eh_0} \quad (7)$$

其中: $h_0$  为气囊织布的厚度; $V_f$  为气囊用织布的体积。

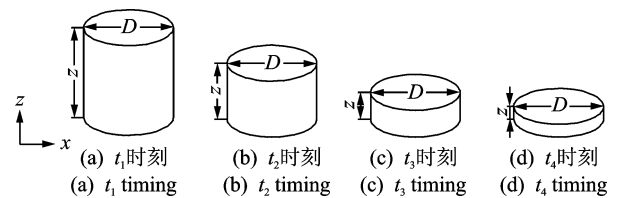


图2 缓冲过程中 VCA 变形示意图

Fig. 2 The deformation of the vertical cylindrical airbag during the impact attenuation

将方程(2)~(4)、(7)带入方程(1),求解得气囊内压力变化率  $\dot{P}$  为

$$\begin{aligned} \dot{P} = & \left[ -M\ddot{z}(\ddot{z} + g) - \frac{c_v}{R} P \dot{V} + \frac{(c_v + R)\dot{m}PV}{Rm} - \right. \\ & \left. \dot{z}P_a A_c - \frac{\pi(5-4\mu)(P-P_a)^2 D^3 \dot{z}}{32Eh_0} \right] \left/ \left[ \frac{c_v V}{R} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\pi(5-4\mu)(P-P_a)D^3(2D+z)}{16Eh_0} \right] \right. \quad (8) \end{aligned}$$

联立方程(3),(5),(8),即可采用四阶龙格-库

塔方法进行数值求解。

### 3 竖直圆柱式气囊解析模型的验证

假定应用图 2 所示的 VCA 对某种设备实施冲击缓冲,通过投放试验研究气囊的缓冲特性,并与计算结果进行对比验证解析模型的准确性。气囊缓冲系统的投放试验是在自行研制的投放试验平台上进行,如图 3 所示。该平台主要由刚性支架、升降葫芦、电磁铁、释放开关、测试系统及超高速照相机组成。测试系统中采用安装在设备上的压电式加速度传感器与压电式压力传感器分别测试加速度响应、气囊内气体压力,二者采集的信号通过 LMS SCADAS III/Test Lab 采集、存储并进行后处理,同时采用超高速照相机记录气囊缓冲过程的压缩变形行为。



(a) 试验平台 (b) 竖直圆柱式气囊  
(a) Experimental platform (b) Vertical cylindrical airbag

图 3 缓冲系统投放试验平台

Fig. 3 Experiment system of cushioning airbag

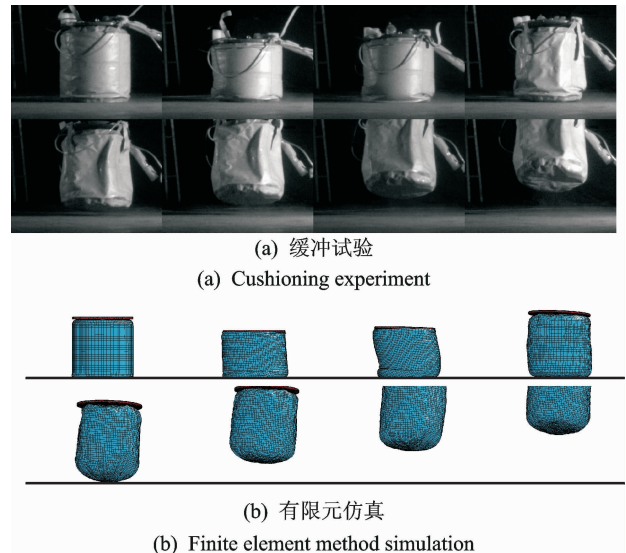
缓冲系统的参数见表 2。其中环境实测大气压力

表 2 VCA 缓冲系统的基本参数

Tab. 2 Basic parameters of VCA cushioning system

物理量/单位	数值	物理意义
$M$ /kg	26.5	设备质量
$z_0$ /m/s	-6	设备初始着陆速度
$P_a$ /Pa	$9.83 \times 10^4$	环境大气压力
$T_0$ /K	293	初始温度
$K$	0.7	排气口阻滞系数
$c_p$ /J/(kg·K)	1 004	定压比热
$c_v$ /J/(kg·K)	717	定容比热
$D$ /m	0.5	气囊直径
$L_t$ /m	0.5	气囊轴向长度
$\mu$	0.3	气囊织布泊松比
$h_0$ /mm	0.85	气囊织布的厚度
$E$ /GPa	0.2	气囊织布弹性模量
$A_b$ /m <sup>2</sup>	0.008	气囊排气口面积
$P_0$ /Pa	$1.0 \times 10^5$	气囊初始充气内压

$P_a = 98\ 300\ \text{Pa}$ ,排气口打开的触发条件为囊内压力  $P = 140\ 950\ \text{Pa}$ 。采用 LS-Dyna 有限元仿真及试验手段对笔者所建立的 VCA 解析模型进行验证,解析模型、仿真与试验的对比结果如图 4~图 5 所示。图 4(a)为固定排气口型 VCA 缓冲试验中通过超高速照相机拍摄的囊体的变形历程,设备过载为 3 g 时开始拍摄,图中 8 幅图片的拍摄曝光时间 1 ms,延迟 0.1  $\mu\text{s}$ ,间隔时间为 23 ms;图 4(b)为同等条件下有限元仿真得到的对应时刻气囊的变形。图 5 为该工况下峰值过载附近的时间历程曲线。



(a) 缓冲试验 (a) Cushioning experiment  
(b) 有限元仿真 (b) Finite element method simulation

图 4 固定排气口型 VCA 的缓冲试验过程与有限元仿真对比  
Fig. 4 The comparison of the cushioning processing of VCA between experiment and finite element method

由图 4、图 5 可得,在该缓冲过程中,解析模型与试验数据在过载脉冲宽度、气囊峰值内压、缓冲时间历程等方面均比较吻合;但在 0.7 s 附近解析模型的过载计算结果与试验及有限元仿真有比较显著的误差。结合能量守恒方程式(1),导致这种计算误差的主要原因有:

- 1) 解析模型忽略了摩擦力、空气阻力及热传导等能量的损耗,将气囊内气体当做绝热状态的理想气体处理;
- 2) 在解析模型中,将地面视作理想的刚性面处理,不吸收冲击能量;
- 3) 解析模型在计算过程中仅考虑设备在垂直方向的位移、速度与加速度,而在有限元与试验结果中,由于气囊在压缩过程中的不规则变形,设备除垂直方向,在水平方向上也有较小的位移、速度与加速

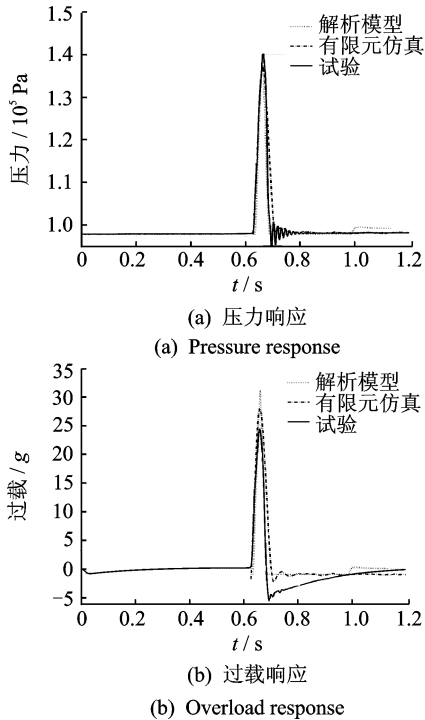


图5 固定排气口型 VCA 解析模型与有限元及试验结果对比

Fig. 5 The time history comparison of VCA between the numerical model, FEM and experiment

度分量,这导致了解析计算结果中过载最大。

综上所述,解析模型在过载变化历程、脉冲宽度及缓冲过程压力等方面均与仿真及实验结果一致,表明本解析模型具有较高的精度。

## 4 竖直圆柱式气囊的缓冲特性分析

假定应用图2所示的VCA对某种设备实施缓冲,系统的参数设置见表2。排气口打开的触发条件为设备过载  $a = 10 \text{ g}$ 。规定触地时刻缓冲系统初速度  $\dot{z}_0 = -6 \text{ m/s}$ ,系统允许最大过载  $a_{\max} \leq 15 \text{ g}$ ,设备触地速度不得超过  $1.5 \text{ m/s}$ 。

为方便研究缓冲气囊的性能,这里引入吸能率  $E_a$  的概念。在  $t$  时刻缓冲系统的吸能率  $E_a$  定义为

$$E_a = \frac{\frac{1}{2}m\dot{z}_0^2 + mgz_0 - \frac{1}{2}m\dot{z}^2 - mgz}{\frac{1}{2}m\dot{z}_0^2 + mgz_0} = 1 - \frac{\dot{z}^2 + 2gz}{\dot{z}_0^2 + 2gz_0} \quad (9)$$

$E_a$  作为评判缓冲系统性能的指标之一,可以准确反映出缓冲系统的缓冲效率。

### 4.1 初始压力的影响

为研究气囊初始充气压力的影响,除了改变气

囊的初始充气压力外,系统参数均采用表2中的值。取气囊的初始压力  $P_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $1.1P_0$ ,  $1.2P_0$ ,  $1.3P_0$ ,图6分别给出了这几种条件下气囊缓冲历程曲线。图7为缓冲系统在  $t=0.1 \text{ s}$  时的吸能率以及缓冲过程中的最大过载。

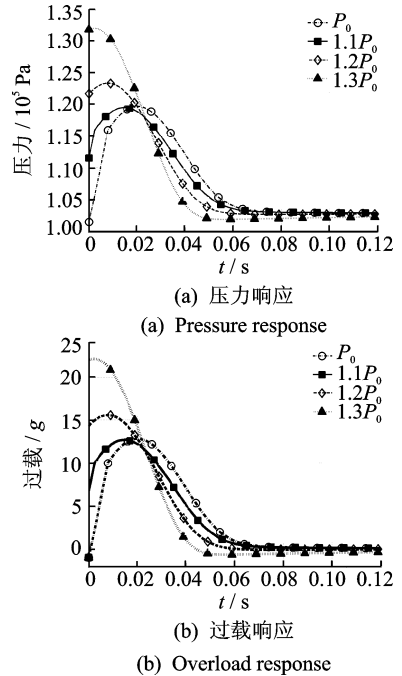


图6 初始压力对 VCA 缓冲特性的影响

Fig. 6 Effect of initial pressure on cushioning characteristics

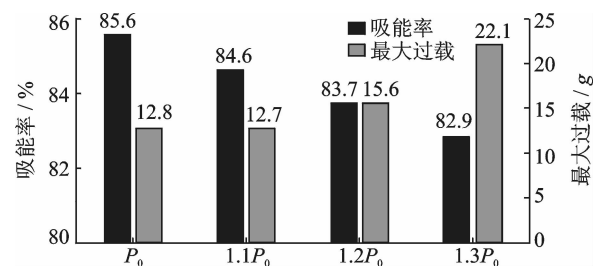


图7 初始压力对 VCA 吸能率和最大过载的影响

Fig. 7 Effect of initial pressure on energy absorbing ratio and peak acceleration

为方便研究,当大气压力和气囊的初始内压相同时,将气囊缓冲过程中所能达到的峰值压力定义为该排气口打开条件下气囊的初始极限压力。由图6可见,当大气压力和气囊的初始内压均为  $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  时,气囊的初始极限压力为  $1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。当气囊的初始内压小于初始极限压力时,增加气囊的初始压力,气囊内的峰值压力与峰值过载基本没有变化,但会增加缓冲结束时气囊的高度。从能量角度进行分析,气囊的初始压力越高,则气囊储能的能力越强,如果将气囊等效为弹簧,则相当于弹簧的刚度系数越大,相同的动能只需较短的行程就可以转

化为弹簧的弹性势能。因此小于初始极限压力的条件下,增加气囊的初始内压,可以在不增加设备峰值过载的同时有效减小气囊的体积。

结合图 6、图 7 得,对于 VCA,由于气囊与设备的接触面积恒定,囊内压力与设备的过载成正比关系。因此当气囊的初始压力大于初始极限压力时,在气囊触地时刻设备过载急剧增大,这是由于虽然排气口在设备过载达到 10 g 时触发打开,但在气囊触地时刻气囊的初始压力过大,而此时设备向下的速度最大,排气口的面积不足以在很短的时间将气体排出以减小气囊内外的压差,导致设备的峰值过载急剧加大,使得缓冲性能下降。

在  $t=0.1$  s 时,随着内压的增加,缓冲系统的吸能率有所下降。这是因为增加气囊的初始压力,可以提高气囊单位体积的储能能力,使得缓冲系统在较短行程内设备的速度降至可接受的水平,而此时气囊尚有一定高度,设备仍有部分重力势能,从而造成缓冲系统吸能率下降。因此对于 VCA,适当增大气囊的初始压力,可以减小气囊的高度,过载峰值也将有微量的下降。但如果气囊初始压力超过初始极限压力,反而会恶化气囊的缓冲性能。

### 4.2 排气口面积的影响

排气口面积作为决定气囊缓冲性能的主要因素之一,图 8 给出了 4 种不同排气口面积  $A_0$  时,气囊的缓冲历程曲线。其中  $A=0.008$  m<sup>2</sup>,气囊初始内压  $P_0=1.0 \times 10^5$  Pa。

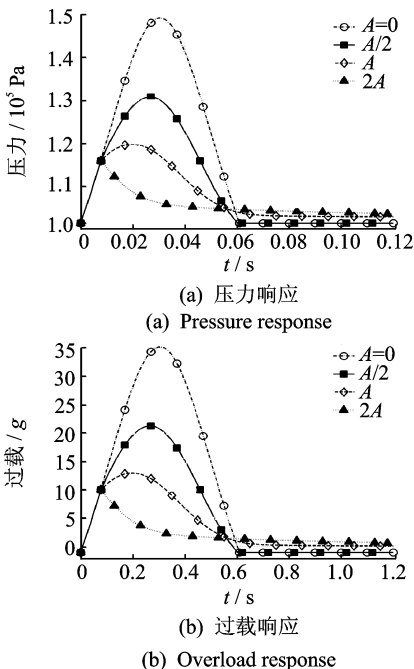


图 8 排气口面积对 VCA 缓冲特性的影响

Fig. 8 Effect of venting area on cushioning characteristics

由图 8 可见,不同的排气口面积对压力、过载的影响非常显著。由于各工况的初始条件除排气口面积外均相同,所以在排气口打开前缓冲气囊的各个性能曲线均重合。当排气口面积为 0 时,气囊为密闭气囊,设备以很高的过载(35.1 g)从初始速度达到静止,然后重新加速;在这个过程中压力和过载的峰值较大,并且会造成多次反弹。当排气口面积为  $A/2$  时,由于排气口面积较小,气体排出的速度低于气囊内气体受到压缩的速度,因此气囊内压力继续增大;导致能量不能及时释放,在造成反弹的同时,峰值过载达到 20 g,但反弹速度和高度相对前者都有所下降。当排气口面积为  $2A$  时,囊内压力快速下降,囊内峰值压力即为排气口打开时的压力,缓冲时间短,设备不能充分减速,使得设备有较大的残余速度,并将以该残余速度发生二次冲击。

图 9 为缓冲系统在  $t=0.1$  s 时的吸能率以及缓冲过程中的最大过载。由于解析分析模型中没有计入阻尼项,且忽略了摩擦力和空气阻力等因素的影响,因此当排气口面积为 0 时,设备的动能与势能之间不停的进行转换;并且在  $t=0.1$  s 时,缓冲系统反弹,气囊内压恢复初始压力,因此在解析模型中其吸能率为 0。实际情况中,由于摩擦力等因素的影响,设备的动能将在缓冲过程中逐渐衰减。当排气口面积为  $A$  时,缓冲系统的吸能率最高,并且此时设备的最大过载在合理的范围内。而当排气口面积为  $2A$  时,由于最大压力维持时间较短,因此吸能率为 69.8%,较排气口为  $A/2$  和  $A$  时都低。因此在缓冲气囊参数设计中,选取合适排气口面积非常重要。

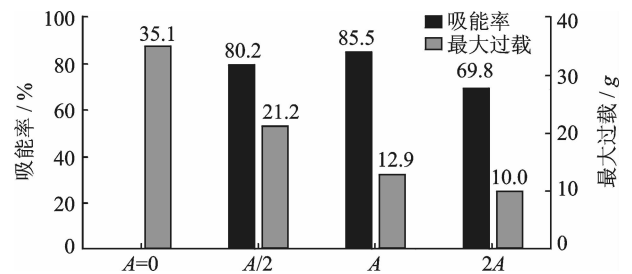


图 9 排气口面积对 VCA 吸能率和最大过载的影响  
Fig. 9 Effect of venting area on energy absorbing ratio and peak acceleration

### 4.3 排气口触发条件的影响

与上节相同,气囊的排气口面积  $A_0=0.008$  m<sup>2</sup> 保持不变,取气囊初始压力  $P_0=1.0 \times 10^5$  Pa。图 10 给出了排气口在不同触发条件打开时,气囊的缓冲历程曲线,对应工况分别为:排气口一直打开 ( $a=-1$  g), 排气口分别在  $a=5$  g,  $a=10$  g,  $a=$

15 g 时触发打开。图 11 为这些工况下缓冲系统在  $t=0.1$  s 时的吸能率及缓冲过程中的最大过载。

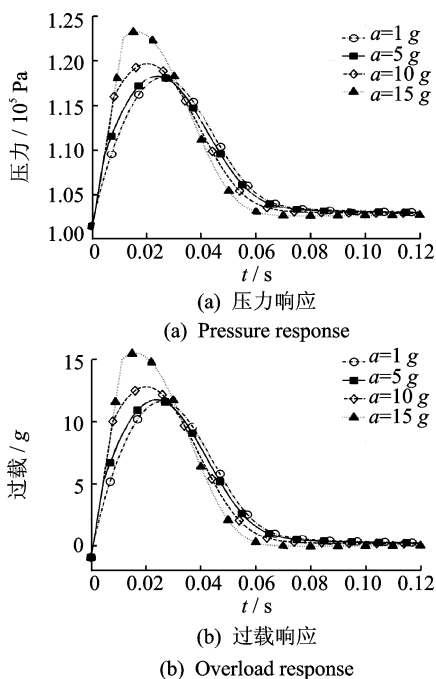


图 10 排气口触发条件对 VCA 缓冲特性的影响

Fig. 10 Effect of the triggering condition of the venting orifice on cushioning characteristics

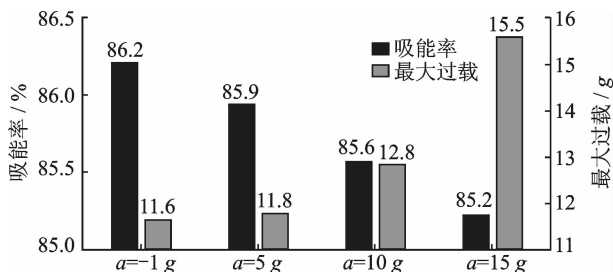


图 11 排气口触发条件对 VCA 吸能率和最大过载的影响

Fig. 11 Effect of the triggering condition of the venting orifice on energy absorbing ratio and peak acceleration

如图 10~图 11 所示,不同的排气口触发条件直接影响缓冲过程中气囊内压力峰值。气囊排气口一直打开与当设备的过载为 5 g 时打开具有相同的峰值压力,压力均在排气口打开后持续增加。这是由于在缓冲初始时刻,气囊内气体经排气口排出的速度小于气囊受到设备压缩的速度,因此尽管排气口处于打开状态,气囊压力仍然增大。随着气囊压力的增加,排气速度进一步提高;当排气速度与气囊受到压缩的速度达到平衡时,气囊压力达到峰值,此时设备的过载最大。

在设备过载越小时触发,排气口打开时间愈早,气囊内的峰值压力越小,进而导致设备的过载较小。

但排气口过早触发,气囊没有经过充分的压缩吸能,将直接导致缓冲结束时气囊的高度减小。因此相同条件下,气囊排气口触发较早将额外增加缓冲所需的气囊体积。因此排气口触发条件由气囊的体积和设备允许过载决定。

排气口一直打开时与其他条件相比,具有其自身的优势。当气囊在展开时,可在气囊底部加装重物,采用依靠自重自动充气;或在充气时使用尼龙搭扣或其他材料对排气口进行密封,当气囊内压力稍大于外界压力时,排气口打开。我国目前重装空投缓冲系统中使用的某型自落式缓冲气囊<sup>[13]</sup>即为依靠自重充气的此类气囊,缓冲系统无需携带额外的气源,并且无需额外机构控制排气口打开时间,不但减轻了缓冲系统的重量,也提高了缓冲系统可靠性。

## 5 结论

1) 当初始压力小于初始极限压力时,增大初始压力可以减小气囊的高度,进而减小气囊的体积,对于峰值过载的影响较小;但如果初始压力超过初始极限压力时,将使气囊的缓冲性能急剧恶化。因此在选取初始压力时应以略低于初始极限压力为宜。

2) 排气口面积过小,将导致设备着陆后发生反弹;排气口面积过大,则缓冲时间短,设备以较大的残余速度发生二次碰撞。因此选取排气口面积时应综合考虑反弹与二次碰撞对设备的影响,选取吸能率较大的排气口面积,以提高系统的缓冲性能,降低峰值过载,同时避免设备的反弹与二次碰撞。

3) 排气口在设备过载较小时触发,将提高缓冲系统的吸能率,降低设备的过载峰值,但额外增加了缓冲所需的气囊体积;在不考虑气囊体积约束的条件下,排气口触发的越早越有利于缓冲。

## 参 考 文 献

- [1] 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 Jinpeng, Li Bin, Yang Zhichun. Progress of study on impact attenuation capability of airbag cushion system[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2438-2447. (in Chinese)
- [2] Smith T R, Sandy C R, Ware J S, et al. Orion CEV earth landing impact attenuation airbags - design challenges and application[C]//28th IEEE Aerospace Conference, IEEEAC Paper No. 1111. Los Alamitos, CA: IEEE, 2007:1-12.

- [3] Welch J V. CEV airbag landing system modeling[C]// Proceedings of 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Williamsburg, VA: AIAA, 2007.
- [4] Smith T R, Sandy C R, Wilson D, et al. CEV airbag landing system design[C]// Proceedings of 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Williamsburg, VA: AIAA, 2007.
- [5] 戈嗣诚, 施允涛, 徐庆华. 无人机回收气囊的优化设计初探[J], 振动、测试与诊断, 2002, 22(1):34-36. Ge Sicheng, Shi Yuntao, Xu Qinghua. Optimum design of recovery air bag for unmanned aircraft [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2002, 22(1):34-36. (in Chinese)
- [6] 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 Sicheng, Chen Fei. Experimental study on theory of impact active control of intelligent airbag [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6):600-603. (in Chinese)
- [7] 万志敏, 陈立平. 飞行器模型着陆特性的试验研究[J]. 物理测试, 2002, 1:16-19. Wan Zhimin, Chen Liping. Experimental study on landing characteristics of vehicle models [J]. Physics Examination and Testing, 2002, 1:16-19. (in Chinese)
- [8] 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 Hanfeng, Wen Guilin, Han Xu. Optimal design of airbag impact attenuation system for airdropping equipment [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(5):1325-1327. (in Chinese)
- [9] 牛四波, 王红岩, 迟宝山. 空投设备缓冲气囊的优化设计[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(5):36-40. Niu Sibao, Wang Hongyan, Chi Baoshan. Optimal design of airbag cushion process for airdropping equipment [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(5):36-40. (in Chinese)
- [10] 洪煌杰, 王红岩, 郝贵祥. 空降车-气囊系统着地缓冲过程仿真分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(4):33-36. Hong Huangjie, Wang Hongyan, Hao Guixiang. Simulation and analysis of landing cushioning process for airborne vehicle and airbag [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(4):33-36. (in Chinese)
- [11] 刘鑫, 韩旭, 刘桂萍. 基于微型多目标遗传算法的气囊缓冲特性优化[J]. 中国机械工程, 2009, 20(15):1819-1823. Liu Xin, Han Xu, Liu Guiping. Optimization of cushion characteristic of airbag based on micro multi-objective genetic algorithms [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(15):1819-1823. (in Chinese)
- [12] 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):25-28. Chen Shuai, Li Bin, Wen Jinpeng, et al. Cushioning characteristic and parameter design of a soft landing airbag [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4):25-28. (in Chinese)
- [13] 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):107-120. Liu Shoujun, Qi Mingsi, Huang Hongsheng, et al. Theoretical analysis and design of a new self-inflating landing cushion airbag [J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1):107-120. (in Chinese)
- [14] 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 Liangchun, Huang Gang, Li Wensheng, et al. Simulation analysis of new type landing cushion airbag based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):16-20. (in Chinese)
- [15] 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 Mingsi, Liu Shoujun, 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. (in Chinese)
- [16] 何欢, 倪磊, 何成, 等. 气囊着陆缓冲系统冲击动力学模型修正方法[J]. 振动工程学报, 2014, 27(3):311-317. He Huan, Ni Lei, He Cheng, et al. Finite element model updating of airbag cushion landing system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(3):311-317. (in Chinese)
- [17] Esgar J B, Morgan W C. Analytical study of soft landing on gas-filled bags [R]. Cleveland, Ohio, US: NASA, 1960.



**第一作者简介:**温金鹏,男,1985年1月生,博士,副研究员。主要研究方向为结构动力学与动态破坏分析。曾发表《Study on cushioning characteristics of soft landing airbag with elastic fabric》(《International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics》2010, Vol. 33, No. 3-4)等论文。

E-mail:401wenjp@caep.cn

**通信作者简介:**薛江,男,1972年1月生,高级工程师。主要研究方向为机械设计及制造。

E-mail:xuej@caep.cn