

# 深空探测返回舱着陆冲击动力学分析

张大鹏, 雷勇军

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 为分析深空探测返回舱着陆冲击动力学问题,首先建立包括返回舱及着陆土壤在内的全柔体着陆冲击动力学分析模型,并利用“神舟号”载人飞船着陆冲击试验数据对土壤模型进行修正;然后利用非线性动力分析软件 LS-DYNA 对深空探测返回舱着陆冲击过程进行仿真分析。通过典型着陆工况计算,得到了返回舱着陆过程中姿态变化、应力分布、关键点加速度响应曲线及冲击能量分配等。仿真结果可为深空探测返回舱结构优化设计、着陆姿态选择及地面试验等研究提供参考。

**关键词:** 深空探测; LS-DYNA; 返回舱; 着陆冲击

中图分类号: V423.5 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2014)02-0150-06

## Dynamic Analysis of Landing Impact for Deep Space Reentry Capsules

ZHANG Dapeng, LEI Yongjun

(College of Aerospace Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Firstly the finite element model including the deep space reentry capsule and landing bed for dynamic analysis of landing impact is established. Then the parameters of the landing bed are calibrated according to the experimental data of Shenzhou spacecraft. The landing impact of deep space reentry capsule is simulated and analyzed by using LS-DYNA. The landing attitude change, the stress distribution, the acceleration response curves of the key point and the impact energy absorption are got according to the simulation and analyses of the landing impact in the typical working conditions. These results can provide reference to the structural optimization, the landing attitude selection and the study to ground test for deep space exploration reentry capsules.

**Key words:** deep space exploration; LS-DYNA; reentry capsule; landing impact

## 0 引言

随着航天事业的不断发展,世界各航天大国的深空探测计划层出不穷,深空探测相关技术发展突飞猛进,其中着陆探测并取样返回是深空探测重要且直接的手段之一,例如目前开展的嫦娥工程是我国迈出深空探测第一步的重大举措,嫦娥工程三期主要任务就是进行月面勘测及采样品返回<sup>[1]</sup>。深空探测返回舱承载了大量精密试验仪器及样品,其能否安全回收是深空探测中取样返回任务成败的最终标志。相对载人飞船返回舱而言,由于深空探测的特殊要求,深空探测返回舱具有体积小、质量轻、仪

器设备布置密集、着陆工况恶劣等特点,其着陆速度可达  $10\sim14 \text{ m/s}^{[2]}$ ,远大于载人飞船返回舱的着陆速度,因此需要专门针对深空探测返回舱进行分析研究。对深空探测返回舱着陆冲击动力学问题进行研究是研制过程中不可缺少的必要环节。

世界各国对返回舱着陆冲击问题做了多方面的研究,研究方法主要有改进试制试验、经验理论方法及有限元模拟计算等<sup>[3]</sup>。1970年,美国国家航空航天局的 Benson(1970)<sup>[4]</sup>提出一种试验原理对“阿波罗号”载人飞船指令舱的着陆冲击问题进行了研究;1979年,Cassenti(1979)<sup>[5]</sup>针对着陆冲击中的压力载荷(Pressure loading)建立了一种解析解模型,并

与已有试验进行了对比;同时,国外学者还对返回舱的着水冲击问题<sup>[6]</sup>以及气囊缓冲系统的着陆冲击问题<sup>[7]</sup>进行了多方面的研究。随着深空探测及载人航天事业的迅速发展,近年来国内也针对返回舱着陆冲击问题开展了许多研究。彭友君等(2007)<sup>[8]</sup>建造了返回舱着陆冲击试验模拟试验床。与试验方法相比,有限元方法具有计算周期短、投入成本低、重复性好等优点,同时可以对返回舱的结构设计及优化提供先验指导<sup>[9]</sup>。国防科大的郭鹏等(2010)<sup>[10]</sup>在考虑着陆地面弹塑性的情况下建立了弹塑性接触模型;北京空间飞行器总体设计部的孙国江等(1998)<sup>[11]</sup>利用非线性理论进行推导建立了返回舱着陆冲击的动力学模型;清华大学的杜汇良、马春生等<sup>[3,9,12]</sup>利用有限元等方法在返回舱着陆及着水冲击方面做了许多卓有成效的研究。随着有限元方法的广泛应用以及动力学分析软件的不断发展,利用有限元方法求解返回舱的着陆冲击问题成为一种趋势。目前,利用有限元方法对返回舱着陆冲击问题的研究还比较少,如果能够建立真实有效的有限元模型,分析不同工况条件下返回舱的着陆冲击影响,将为返回舱的结构设计改进和相关试验提供先验指导。

本文利用 LS-DYNA 大型商用软件对深空探测返回舱着陆冲击过程中的动力学问题进行了仿真分析。通过典型工况分析,获得了返回舱在不同工况下着陆姿态、应力分布、关键点加速度响应曲线及冲击能量分配等。分析结果可为深空探测返回舱的结构优化设计、着陆姿态选择及地面试验研究等提供参考。

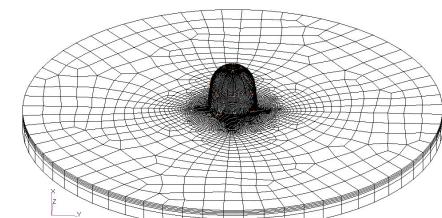
## 1 深空探测返回舱着陆冲击分析模型

返回舱着陆冲击分析模型主要由返回舱有限元模型及着陆土壤有限元模型两部分组成,均采用柔体模型建模,并利用相关试验数据对土壤模型进行修正。由于受工程实际需要以及着陆环境(风速、地貌等)等多方面因素影响,返回舱在着陆过程中可能以垂直或倾斜等姿态着陆。

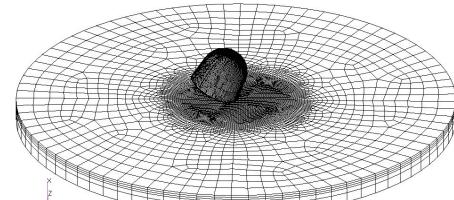
为此,本文针对返回舱垂直着陆和斜着陆工况的冲击问题进行对比分析。图 1(a)和图 1(b)分别给出了返回舱垂直着陆和斜着陆时的有限元分析模型。

### 1.1 深空探测返回舱有限元模型

为满足再入时气动外形要求,返回舱为钟罩形



(a) 返回舱垂直着陆工况



(b) 返回舱斜着陆工况

Fig. 1 The finite element model of space capsule and landing bed

侧壁加球冠状大底的密封结构,其主要结构包括前端框/盖、仪器舱、侧壁蒙皮、大梁、大底等。返回舱从外向内依次为防热结构、金属承力结构。在着陆冲击过程中,金属承力结构起主要承力作用,防热结构承力作用很小,在建模过程中可以忽略,仅通过质量点来模拟其质量特性。根据返回舱各结构件的不同特点,采用壳单元或六面体单元对相应结构进行建模,其中蒙皮、桁条及仪器舱等薄壁结构采用壳单元建模,试验仪器设备及样品采用六面体单元建模,然后对各结构附相应的材料特性。建模时,返回舱各部件单元间均采用共节点方式进行连接;同时,在返回舱大底蒙皮与着陆地面之间设置面面接触。返回舱有限元模型如图 2 所示。

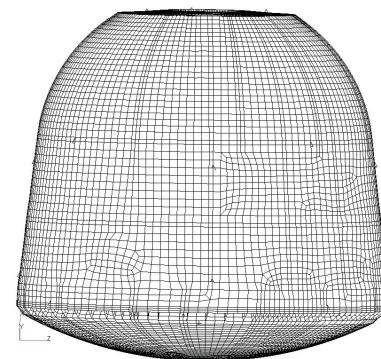


图 2 返回舱有限元模型

Fig. 2 The finite element model of space capsule

### 1.2 着陆土壤有限元模型

返回舱着陆冲击仿真分析中,所采用的土壤材料本构及模型能否真实有效地反映实际地面特性是

仿真计算有效的基础,也是模型建立的重点和难点。

由于返回舱着陆冲击过程时间很短,所产生的冲击波影响的土壤面积是有限的。因此为降低计算成本和减少计算时间,可以建立有限的土壤模型,通过对下表面及圆周方向均施加无反射边界条件来模拟无限大空间的土壤。通过强夯法或波速法计算冲击波在土壤中的传播距离<sup>[13]</sup>,确定土壤有限元模型的尺寸。

强夯法给出落体撞地时对地基的影响深度的计算公式

$$D = \alpha \sqrt{MH} \quad (1)$$

式中,  $D$  为影响深度, 单位是 m;  $\sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0$  是与土质有关的系数, 取值范围是 0.42~0.8, 沙质土取较大值;  $M$  为落体质量, 单位是 t;  $H$  为落体, 自由下落高度, 单位是 m。

土壤的有限元模型采用六面体单元, 网格划分从着陆点向土壤模型边缘由细密逐渐变稀疏, 有限元模型如图 1 所示。土介质材料的本构十分复杂, 本文采用了典型的可压溃的泡沫模型——LS-DYNA3D TYPE14 模型<sup>[3,14]</sup>, 该模型综合考虑了土壤的弹性性能、体积压缩性能及其特殊的屈服特性。模型中的相关参数可以利用 Drucker-prager 模型<sup>[15]</sup>进行求解, 其表达式为

$$\sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad (2)$$

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = -3p \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

$$k = \frac{\sqrt{3} c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (5)$$

其中,  $J_2$  为应力偏量的第二不变量;  $p$  为静水压力;  $\varphi$  为摩擦角;  $c$  为粘结力参数。

屈服函数  $\phi$  用  $J_2$ 、 $p$  和常数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  来表示<sup>[16]</sup>

$$\phi = J_2 - [a_0 + a_1 p + a_2 p^2] \quad (6)$$

在屈服面上,  $J_2 = \frac{1}{3} \sigma_y^2$ , 而

$$\sigma_y = \sqrt{3(a_0 + a_1 p + a_2 p^2)} \quad (7)$$

又知土壤的屈服满足下列关系<sup>[17]</sup>

$$J_2 = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \quad (8)$$

由式(2)、式(3)和式(8)可得<sup>[3]</sup>

$$a_0 = k^2, a_1 = 6ak, a_2 = 9a^2 \quad (9)$$

### 1.3 着陆土壤模型参数修正

土介质材料的本构十分复杂, 为使所采用的可压

溃泡沫模型能够真实有效地反映返回舱着陆冲击过程中的实际土壤特性, 必须对土壤模型进行修正。为此, 本文根据返回舱着陆冲击的刚体舱试验<sup>[3]</sup>, 建立刚体舱—土壤模型。根据刚体舱试验数据对土壤模型参数进行调整, 使仿真分析得到的结果与试验结果吻合, 从而获得能够反映真实土壤特性的材料参数。

试验中刚体舱分别以 3.5 m/s、6.0 m/s、8.0 m/s 和 10.0 m/s 的速度垂直降落, 选取与试验相对应的特征点与试验结果进行对比。在理论计算获得初始材料参数的基础上, 对土壤模型相关参数(包括材料密度、剪切模量  $G$ 、体积模量  $K$ 、屈服参数  $a_0, a_1, a_2$ )进行了不同组合, 使仿真结果与试验结果吻合。通过土壤参数标定, 对应特征点的加速度峰值及最大回弹速度与试验结果的对比如表 1 所示。

表 1 刚体舱不同工况下对应特征点计算结果对比

Table 1 The comparison of the results in different landing conditions

垂直着 陆速度/ (m/s)	加速度峰值/g			最大回弹速度/(m·s <sup>-1</sup> )		
	仿真结果	试验平 均值	误差	仿真结果	试验平 均值	误差
3.5	11.38	17.78	-6.40	0.30	1.12	-0.82
6.0	30.14	27.41	2.73	0.52	1.32	-0.80
8.0	49.43	51.98	-2.55	1.84	1.63	0.21
10.0	69.20	66.40	2.80	2.52	1.64	0.88

通过土壤模型修正, 得到一组参数可使该土壤模型计算的结果和试验值基本吻合, 所建土壤模型能够有效反映真实土壤特性。因此, 利用该土壤模型可对返回舱着陆冲击动力学问题进行分析。

## 2 典型工况下仿真分析结果分析

根据返回舱的着陆速度范围<sup>[2]</sup>, 在着陆速度为 12 m/s 情况下, 对返回舱垂直着陆及斜着陆工况进行对比分析。根据着陆冲击过程及需要, 仿真计算时间取 0.1 s。

### 2.1 返回舱着陆姿态变化情况分析

如图 3 所示, 为分析返回舱在着陆冲击过程中的姿态变化情况, 分别给出了 0 s、0.03 s、0.06 s 及 0.1 s 时刻返回舱的着陆姿态。图 3(a)为返回舱垂直着陆时的姿态变化情况, 可以看出, 返回舱随时间变化逐渐下落, 大底中心位置首先与地面发生碰撞, 地面因碰撞产生了中心凹陷、四周凸起的近似中心对称变形, 整个大底结构与地面发生碰撞后返回舱有所回弹, 且未发生明显倾斜。返回舱斜着陆时的姿态变化情况如图 3(b)所示, 可以看出, 返回舱

陆时大底边缘首先触地,之后返回舱由倾斜状态逐渐变为垂直,并向相反方向有所倾斜。相对垂直着

陆而言,斜着陆时返回舱后端框及侧壁结构发生明显变形,且地面变形程度明显较大,撞击坑较深。

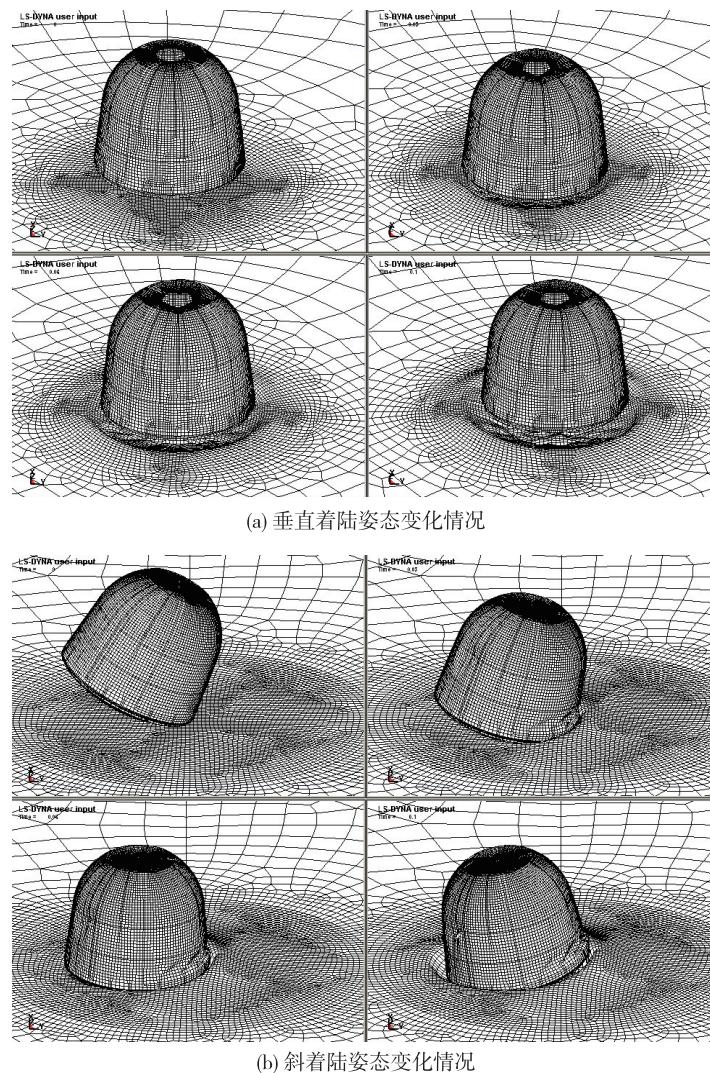


图3 返回舱着陆姿态变化情况  
Fig. 3 The landing attitude of space capsule

## 2.2 返回舱着陆冲击过程中应力分析

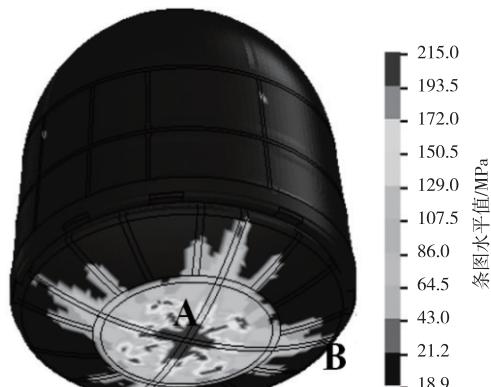
图4给出了返回舱在0.006 s时刻的应力云图。从图中可以看出,返回舱在不同工况下着陆时,大底落点位置均达到了材料的屈服极限,且未出现断裂。同时,返回舱斜着陆时侧壁蒙皮结构受较大应力影响,垂直着陆时侧壁结构所受应力较小。

如图5所示,取靠近大底中心位置特征点A及靠近斜着陆时落点位置特征点B为研究对象,给出两特征点对应的应力-时间变化曲线。从图中可以看出,各应力曲线变化趋势相同,着陆冲击开始后应力首先急剧增大,达到峰值后又迅速减小,并稳定在一定值上下波动。垂直着陆时,特征点A及斜着陆时特征点B均达到了材料的屈服极限。相对落点

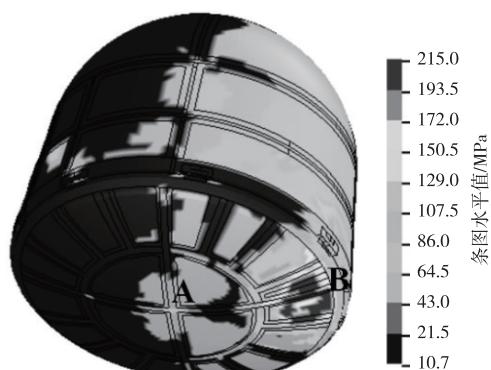
位置而言,远离落点位置应力曲线达到峰值的时间均有所延后,且斜着陆时延后程度明显较大。同时,返回舱斜着陆时,大底中心位置特征点A的应力峰值未达到材料的屈服极限。

## 2.3 返回舱关键点冲击响应分析

返回舱大梁上承载了大量精密试验仪器,其所受冲击响应情况是分析的重点。图6给出了两种工况下返回舱大底和大梁上特征点的加速度响应曲线。从图中可以看出,各加速度响应曲线变化趋势相同,在着陆开始后迅速增大,并于0.01 s时刻左右达到峰值。大底结构在垂直着陆和斜着陆时的加速度响应峰值分别为318 g和410 g,大梁结构加速度响应峰值分别为81 g和100 g。因此可以看出,返



(a) 返回舱垂直着陆时的应力云图



(b) 返回舱斜着陆时的应力云图

图 4 返回舱在 0.006 s 时刻的应力分布  
Fig. 4 The stress distribution of space capsule at 0.006 s

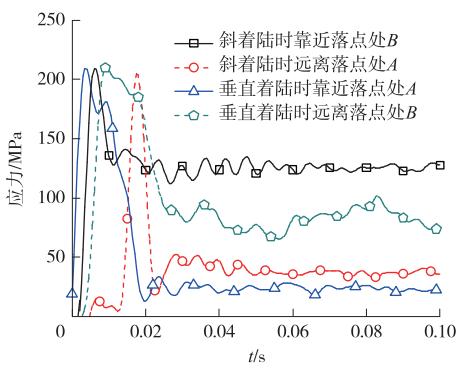


图 5 返回舱上特征点不同工况下的应力—时间曲线

Fig. 5 The curves of stress—time in different working conditions

回舱垂直着陆时大底及大梁的加速度响应比斜着陆时明显减小,同时经返回舱大底等结构缓冲作用后大梁上加速度响应明显变小。

经分析可以看出,返回舱大底在着陆冲击过程中起主要缓冲作用,返回舱垂直着陆有利于充分发挥大底结构的缓冲作用,对保护舱内仪器设备及样品起到积极作用,而斜着陆不能充分发挥大底结构的缓冲作用。

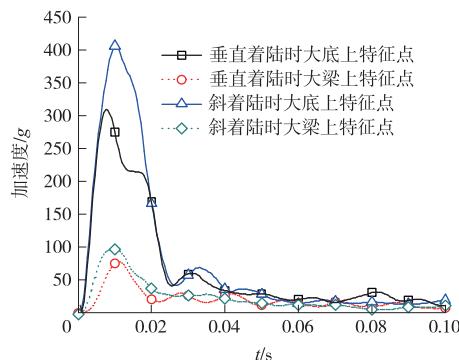


图 6 返回舱不同工况下加速度—时间曲线  
Fig. 6 The curves of acceleration-time in different working conditions

## 2.4 返回舱着陆冲击能量分配情况

根据返回舱着陆冲击前后各结构能量变化情况,可以得出着陆冲击能量的分配情况,如表 2 所示。从表中可以看出,土壤是返回舱着陆冲击能量吸收的主体,吸收能量的比例达到近 50% 以上,返回舱大底结构在冲击过程中起主要缓冲作用,在返回舱上各结构中吸收能量最多,其次为侧壁等结构。同时,相对垂直着陆而言,斜着陆时返回舱大底结构吸能比例明显减小,侧壁、后端框、大梁等结构吸能比例明显增大。返回舱斜着陆时,大底吸能所占比例不足,没有充分发挥大底的缓冲作用,但斜着陆有利于土壤吸收能量,从而从整体上减小返回舱吸收能量比例。

表 2 不同工况下各部分冲击能量分配情况

Table 2 The rate of different parts' energy absorption in different working conditions

着陆方式	大底	后端框	大梁	侧壁	土壤	%	
						其他部件	剩余动能
垂直着陆	28.54	0.52	0.95	1.83	48.24	5.03	14.89
斜着陆	4.36	0.73	1.37	3.72	65.08	5.26	19.47

## 3 结论

本文建立了能够真实反映返回舱着陆冲击的有限元模型。利用该模型对不同工况下返回舱的着陆冲击过程进行了仿真分析,给出了姿态变化、应力、冲击响应及能量等仿真结果,主要得到以下结论:

1) 返回舱垂直着陆过程中会出现回弹现象,而斜着陆时返回舱会发生倾斜;斜着陆时,返回舱后端框及侧壁结构会发生明显变形,地面变形程度明显变大;

2) 返回舱斜着陆时,侧壁受较大应力影响,返回

舱大底上远离落点位置达到应力峰值的时间相对落点位置有所延后,且斜着陆时延后程度明显变大;

3)由于大底的缓冲作用,大梁上的加速度响应比大底上有明显减小;斜着陆时,返回舱的加速度响应明显较大,垂直着陆时能更充分地发挥大底结构的缓冲作用;

4)着陆地面是冲击能量吸收的主体,而大底则是返回舱上最主要的吸能部位,垂直着陆时大底结构能起到很好的缓冲作用,吸能比例达28%以上;斜着陆时,大底吸能比例不足5%;但斜着陆有利于土壤吸收能量,从而从整体上减小返回舱吸收能量比例。

本文仅从返回舱所受冲击、应力等方面对返回舱垂直着陆和斜着陆工况进行了对比分析,在深空探测返回舱的实际研制过程中,如何选择返回舱着陆姿态受多方面因素影响,需要综合考虑加以权衡,从而选出最优着陆姿态方案。

## 参 考 文 献

- [1] 紫晓. 嫦娥工程二、三期研究展望[J]. 中国航天, 2007(11): 58-62. [ZI X. Expectation of Chang'e lunar project's first and second phases[J]. Aerospace China, 2007(11):58-62.]
- [2] 林宝华. 着陆缓冲技术综述[J]. 航天返回与遥感, 1996, 17(3): 1-16. [LIN B H. Landing impact attenuation technologies review[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1996,17(3):1-16.]
- [3] 杜汇良. 飞船返回舱故障着陆冲击缓冲系统改进计算分析[D]. 北京: 清华大学, 2003. [DU H L. The calculation analyses of improvement design of buffer system for abnormal landing impact of manned spacecraft [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.]
- [4] Harold E Benson. Land impact of the apollo command module[C]// AIAA Aerodynamic Deceleration Systems Conference. Dayton, USA:[s. n.],1970.
- [5] Brice N Cassenti. Hugoniot pressure loading in soft body impact [C]//20th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Louis. USA:[s. n.],1979.
- [6] Seddon C M, Moatamedi M. Review of water entry with applications to aerospace structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32:1045-1067.
- [7] Cliff E Willey, Charles Sandy, Joseph Welch, et al. Impact attenuating airbags for earth and planetary landing systems [C]// AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition, Long Beach. California, USA:[s. n.], 2007.
- [8] 彭友君,金淮. 航天返回舱着陆冲击模拟试验床建造过程控制研究[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(2):74-77. [PENG Y J, JIN H. Research on building process control of the impact imitating test bed of spaceflight's return capsule landing[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007,21(2):74 - 77. ]
- [9] 张虚怀,杜汇良,马春生. 返回舱着水的数值模拟及冲击特性分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(8): 1297-1301. [Zhang X H, Du H L, Ma C S. Water impact simulations and analyses of space capsule response characteristics[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2010,50(8):1297 - 1301. ]
- [10] 郭鹏,程文科,秦子增. 返回舱垂直着陆过程动力学研究[J]. 国防科技大学学报, 2010,32(6):93-99. [Guo P, Cheng W K, Qin Z Z. Research on dynamic model of the capsule's vertical landing[J]. Journal of National University of Defense Thechnology, 2010,32(6):93 - 99. ]
- [11] 孙国江,于登云,吴琼. 飞船返回舱着陆撞击分析数学模型[J]. 航天器工程, 1998,7(2):36 - 43. [Sun G J , Yu D Y, Wu Q. Mathematic model of space capsule' landing impact [J]. Spacecraft Engineering, 1998,7(2):36 - 43.]
- [12] 马春生,黄世霖,张金换,等. LS-DYNA 的ALE方法在飞船返回舱着陆仿真中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006,46(8):1455 - 1457. [Ma C S, Huang S L, Zhang J H. Simulations of the landing of manned spacecraft with parachutes using the ALE method in LS-DYNA. Journal of Tsinghua University ( Sci & Tech ), 2006, 46 ( 8 ): 1455 -1457. ]
- [13] 孔令伟,袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报,1998(3):86 - 92. [Kong L W Yuan J X. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(3):86 - 92. ]
- [14] 贾世锦. 载人飞船返回舱着陆冲击仿真分析[C]//北京力学学会第17届学术年会. 北京:[出版者不详], 2011. [Jia S J. Landing impact simulation and analyses of manned spacecraft [C] // The 17<sup>th</sup> Annual Symposium of Beijing Dynamics. Beijing:[s. n.],2011. ]
- [15] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1990. [Long X N. Plastic mechanics of solid [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990. ]
- [16] LS-DYNA keyword user's manual [M]. [s. l.]: Livermore Software Technology Corporation,2003.
- [17] 王仁,黄文彬. 塑性力学引论[M]. 北京:北京大学出版社, 1981. [Wang R, Huang W B. Introduction to plastic mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1981. ]

作者简介:

张大鹏(1989—),男,博士研究生,研究方向:飞行器结构动力学分析与设计。

通信地址:湖南省长沙市开福区 国防科学技术大学航天科学与工程学院 1102 教研室(410073)

电话:18711149064

E-mail:zhangdapenghit@126.com

〔责任编辑:宋宏〕