

## 土壤参数对返回舱着陆冲击特性的影响分析

张大鹏<sup>1</sup>, 雷勇军<sup>1</sup>, 段静波<sup>1</sup>, 谢燕<sup>1</sup>, 郑健<sup>2</sup>

(1. 国防科学技术大学 航天科学与工程学院,长沙 410073;2. 中国人民解放军 65739 部队,辽宁 丹东 118006)

**摘要:** 建立合理可靠的土壤模型是返回舱着陆冲击仿真分析的关键问题。利用显式动力有限元软件 LS-DYNA 模拟了返回舱着陆冲击过程,并采用正交试验设计对土壤模型中主要材料参数对着陆冲击响应特性的影响显著性进行了分析。结果表明:土壤材料体积模量、屈服参数  $A_2$  对最大加速度、冲击脉宽影响较大,土壤材料屈服参数  $A_0$ 、 $A_1$  对最大加速度、冲击脉宽的影响较小,各参数的交互效应不显著。这些结论可为返回舱着陆冲击过程的相关试验和返回舱设计分析提供参考。

**关键词:** 返回舱;着陆冲击;LS-DYNA;试验设计;冲击特性

中图分类号: V423.5

文献标志码: A

DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2014.07.020

### Effects of soil parameters on space capsule's landing impact characteristic

ZHANG Da-peng<sup>1</sup>, LEI Yong-jun<sup>1</sup>, DUAN Jing-bo<sup>1</sup>, XIE Yan<sup>1</sup>, ZHENG Jian<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. 65739 Troops of PLA, Dandong 118006, China)

**Abstract:** Selecting and establishing a finite element model of soil plays an important role in simulating and analyzing landing impact of a space capsule. The landing process of a space capsule was simulated using LS-DYNA, and the effects of main parameters of soil model on the landing impact characteristic of the space capsule were analyzed with the orthogonal test design. The results demonstrated that the soil bulk modulus and the yield parameter  $A_2$  significantly influence the maximum impact acceleration and the impact pulse width; the effect of the yield parameters  $A_0$  and  $A_1$  on the maximum impact acceleration and the impact pulse width is smaller; the interaction effect of soil parameters is not significant. These conclusions provided a reference for tests of landing impact process of a space capsule and its structural design optimization.

**Key words:** space capsule; landing impact; LS-DYNA; test design; impact characteristic

由于承载了宇航员和大量的精密试验仪器,返回舱安全着陆问题是载人航天工程的最关键问题。在着陆瞬间,返回舱会受到很大的冲击,从而会对舱内的宇航员和试验设备造成较大影响<sup>[1]</sup>,因此需要对返回舱的着陆安全问题进行分析研究。由于有限元方法具有计算周期短、投入成本低以及重复性好等特点,可以为结构设计及相关试验等提供先验指导,因而在工程应用中有着广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。在利用有限元方法进行仿真分析时,建立真实有效的返回舱着陆冲击模型十分重要,其中土壤模型的建立是着陆冲击仿真分析问题的关键<sup>[2,4]</sup>,为保证土壤模型的真实有效,需要对土壤参数的着陆冲击特性进行研究。同时,为保证返回舱

安全着陆,需要建造返回舱着陆冲击试验模拟试验床<sup>[5]</sup>并进行相关试验,同样需要对土壤参数的着陆冲击特性进行研究。

世界各国针对返回舱的回收安全问题进行了许多研究。根据国情不同,美国的“水星”、“双子座”和“阿波罗”三个系列的载人飞船均是选择海上回收<sup>[6]</sup>,研究较多的是返回舱的着水冲击问题<sup>[7-9]</sup>;而国内的载人飞船主要是陆地回收,因而需要在土壤模型方面进行深入研究<sup>[4-5,10-14]</sup>。关于土壤的计算模型主要有双线性模型、等效线性模型、粘弹性模型、理想弹塑性模型以及可压垮式模型等<sup>[15]</sup>。相关人员对理想弹塑性模型及可压垮泡沫模型等模型进行了相关研究,研究表明可压垮式泡沫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,通过修正模型中的各个参数,可以使仿真计算结果和试验结果较好的吻合,因此该模型在返回舱的着陆冲击仿真分析中得

基金项目: 国家自然科学基金(11132012)

收稿日期: 2013-10-23 修改稿收到日期:2013-04-01

第一作者 张大鹏 男,硕士生,1989年9月生

通信作者 雷勇军 男,博士生导师,1968年12月生

到广泛应用<sup>[2,4,14]</sup>。就目前而言,针对返回舱着陆冲击过程中土壤有限元模型的研究还比较少,同时缺少系统的针对土壤参数对着陆冲击特性影响方面的研究,如果能够给出泡沫模型中各参数对返回舱着陆冲击特性的影响,可为返回舱着陆冲击过程的相关试验和返回舱设计提供参考依据。

本文采用显式动力有限元软件 LS - DYNA3D 对返回舱着陆冲击过程进行仿真分析。基于实验设计的思路<sup>[16]</sup>,首先通过正交试验从各土壤参数中选出对目标值影响显著的参数,然后进一步分析这些参数对目标值的影响情况,从而较为全面地得到了土壤参数对返回舱着陆冲击特性的影响情况。

## 1 模型建立与验证

### 1.1 着陆冲击有限元模型

为满足气动外形的要求,返回舱为钟罩形侧壁加球冠状大底的密封构件。如图 1 所示,根据返回舱的具体结构尺寸及质量分布等相关参数,建立了返回舱的有限元模型。土壤有限元模型采用六面体单元,网格从着陆点向边缘由细密逐渐变稀疏,并选用可压垮泡沫模型—LS - DYNA3D TYPE14 模型<sup>[2,14]</sup>进行建模。

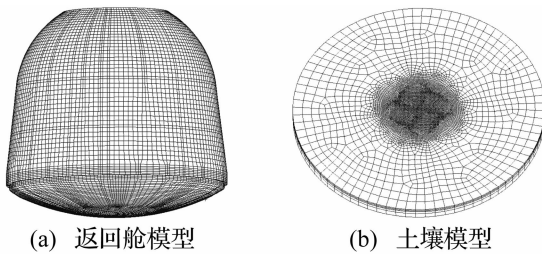


图 1 有限元模型  
Fig. 1 The finite element mode

返回舱着陆过程中与地面冲击时间很短,所产生的冲击波影响到的土壤面积有限。为降低计算成本及减小计算时间,可以建立有限的土壤模型,通过施加无反射边界条件来模拟无限大空间的真实土壤情况。

通过强夯法可以计算出返回舱着陆冲击过程中对土壤的影响深度<sup>[17]</sup>:

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

式中: $D$  为影响深度; $\alpha$  是与土质有关的系数,一般在 0.42 ~ 0.8 之间; $M$  为落体的质量; $H$  是落体自由下落的高度。通过计算,土壤模型厚度  $D$  为 2.0 m。

可压垮泡沫模型中的相关参数可以利用 Drucker-Prager 模型<sup>[17]</sup>进行求解,其表达式<sup>[2]</sup>为:

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

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

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

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

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>[18]</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

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

可得土壤的屈服满足下列关系:

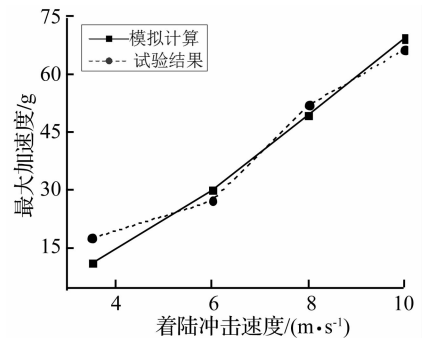
$$J_2 = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \quad (8)$$

由式(2)、(3)及(8)可得:

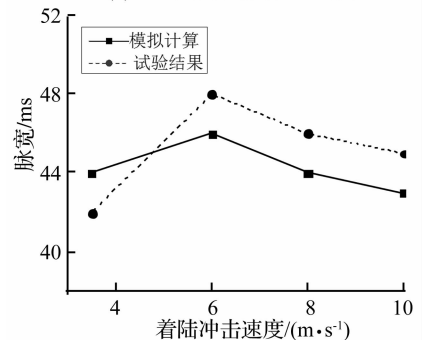
$$a_0 = k^2, \quad a_1 = 6\alpha k, \quad a_2 = 9\alpha^2 \quad (9)$$

### 1.2 土壤模型有效性验证

根据土壤物理及力学性质指标变化范围,通过上述计算可以得出模型中各参数理论取值范围。在理论取值范围内,通过调整不同的参数组合,计算分析各参数的影响趋势,并与试验数据进行比较,可以得到与相关试验数据<sup>[2]</sup>较为吻合的结果,如图 2 所示。从而验证了所建模型的有效性,因此可以利用该模型进行下一步的分析。



(a) 最大加速度验证结果



(b) 脉宽验证结果

图 2 模拟验证结果

Fig. 2 The result of simulations

## 2 影响因子的实验设计与分析

加速度响应特点可由最大加速度和脉宽来体现,本文选用返回舱的最大加速度  $a$  及其脉宽  $W$  作为分析研究的目标值,通过返回舱在 10 m/s 的着陆速度下进行仿真计算。在土壤模型中,影响返回舱加速度曲线的参数主要有:剪切模量  $G$ ,体积模量  $K$  以及屈服参数  $A_0$ 、 $A_1$  和  $A_2$ 。根据试验设计的思路,设计试验并对结果进行分析。

为了表述方便,用  $A$  到  $E$  分别代表剪切模量  $G$ 、体积模量  $K$  以及三个屈服参数  $A_0$ 、 $A_1$  和  $A_2$ ,各因子取 3 个水平,初步选定各因子的水平值如表 1 所示。

表 1 因子水平表  
Tab. 1 The grade table of factors

因子	因子含义	水平 1	水平 2	水平 3
$A$	剪切模量 $G/\text{MPa}$	3	9	15
$B$	体积模量 $K/\text{MPa}$	5	15	25
$C$	屈服参数 $A_0/\text{KPa}^2$	0	20	40
$D$	屈服参数 $A_1/\text{KPa}$	1	4	7
$E$	屈服参数 $A_2$	0.1	0.4	0.7

首先在不考虑交互作用的情况下对各因子的主效应进行分析,再根据分析结果将所有因子按影响大小分为两组,然后分别在考虑交互作用的情况下进行试验分析,从而得到全面综合的试验分析结果<sup>[3]</sup>,其中每组试验分别以最大加速度  $a$  和脉宽  $W$  为目标值进行试验分析。

### 2.1 无交互作用下的主效应分析

首先不考虑土壤模型中各参数间的交互作用影响,对以上 5 个因子的主效应进行分析。此时采用的正交表至少需要 5 列,因此采用  $L_{18}(3^7)$  正交表,其试验表头如表 2 所示。

表 2 无交互作用时的表头设计

Tab. 2 The head of table when interaction effect is ignored

列数	1	2	3	4	5	6	7
因子	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$		

正交表确定之后,严格根据正交表中参数的组合方式进行模拟计算试验,记录下每组试验的结果,从而得到相关的各个数据。以最大加速度  $a$  和脉宽  $W$  为目标值时的方差分析见表 3 和表 4。

从表 3 中可以看出,当以最大加速度  $a$  为目标值时,仅因子  $B$  对试验指标(最大加速度  $a$ )有显著作用,对其他 4 个因子进行分析可知,其中因子  $A$  和  $E$  的  $F$  值比因子  $C$  和  $D$  的  $F$  值明显偏大,因此,将因子  $A$  和

$E$ 、因子  $C$  和  $D$  分别组成两组,在考虑有交互作用的情况下分析其显著性。

表 3 以最大加速度  $a$  为目标值的方差分析表

Tab. 3 Variance analysis table when maximum acceleration  $a$  is goal

因子	平方和	自由度	$F$ 值	显著性
$A$	280.76	2	10.51	
$B$	378.20	2	14.15	*
$C$	15.52	2	0.58	
$D$	8.52	2	0.32	
$E$	231.75	2	8.67	
误差	93.54	7		

注:取  $\alpha = 0.005, F_{0.995}(2, 7) = 12.40$ , \* 表示对试验指标作用显著。

当以脉宽  $W$  为目标值时(如表 4 所示),同样仅因子  $B$  对试验指标(脉宽  $W$ )有显著作用。其余 4 个因子中因子  $A$  的  $F$  值明显偏小,因此可以将因子  $C$ 、 $D$  和  $E$  组成一组,在考虑交互作用的情况下其显著性,然后再单独分析因子  $A$  的显著性。

表 4 以脉宽  $W$  为目标值的方差分析表

Tab. 4 Variance analysis table when pulse width  $W$  is goal

因子	平方和	自由度	$F$ 值	显著性
$A$	1.33	2	0.14	
$B$	842.33	2	87.56	*
$C$	6.33	2	0.66	
$D$	12.33	2	1.28	
$E$	31.00	2	3.22	
误差	33.66	7		

注:取  $\alpha = 0.005, F_{0.995}(2, 7) = 12.40$ , \* 表示对试验指标作用显著。

### 2.2 有交互作用下的显著性分析

#### 2.2.1 以最大加速度 $a$ 为目标值

首先只针对  $A$ 、 $E$  两个因子在考虑有交互作用下进行试验设计。将因子  $B$ 、 $C$  和  $D$  分别固定为 15、20 和 4,因子  $A$ 、 $E$  的 3 个水平值仍如表 1 所示。由于各因子有 3 个水平值,则每个单因子的自由度为 2,而交叉因子的自由度为 4,至少需占用 2 列,一共至少需要 4 列,因此选用  $L_{18}(3^7)$  正交表,其表头设计如表 5 所示。

表 5 分析  $A$ 、 $E$  两因子时的表头设计

Tab. 5 The head of table when  $A$  and  $E$  are analyzed

列数	1	2	3	4	5	6	7
因子	$A$	$E$	$AE_1$	$AE_2$			

利用相同方法对  $C$ 、 $D$  两个因子进行试验设计。将因子  $A$ 、 $B$  和  $E$  分别固定为 9、15 和 0.4，因子  $C$ 、 $D$  的 3 个水平值仍如表 1 所示。选用  $L_{18}(3^7)$  正交表，其表头设计如表 6 所示。

表 6 分析  $C$ 、 $D$  两因子时的表头设计

Tab. 6 The head of table when  $C$  and  $D$  are analyzed

列数	1	2	3	4	5	6	7
因子	$C$	$D$	$CD_1$	$CD_2$			

表 7 关于  $A$ 、 $E$  两因子的方差分析表

Tab. 7 Variance analysis table of  $A$  and  $E$

因子	平方和	自由度	$F$ 值	显著性
$A$	454.55	2	26.71	*
$E$	220.83	2	12.98	*
$AE$	25.52	4	0.75	
误差	76.59	9		

注：取  $\alpha = 0.005$ ， $F_{0.995}(2, 9) = 10.11$ ， $F_{0.995}(4, 9) = 7.96$ ，\* 表示对试验指标作用显著。

表 8 关于  $C$ 、 $D$  两因子的方差分析表

Tab. 8 Variance analysis table of  $C$  and  $D$

因子	平方和	自由度	$F$ 值	显著性
$C$	0.002	2	3.00	
$D$	0.112	2	168.17	*
$CD$	36.736	4	$2.76 \times 10^4$	*
误差	0.003	9		

注：取  $\alpha = 0.005$ ， $F_{0.995}(2, 9) = 10.11$ ， $F_{0.995}(4, 9) = 7.96$ ，\* 表示对试验指标作用显著。

分别进行模拟试验得到试验结果，对其试验结果进行方差分析，得到以最大加速度为目标值的方差分析表，如表 7 和表 8 所示。从表中可以看出因子  $A$ 、 $D$ 、 $E$  和  $CD$  对最大加速度  $a$  的作用显著，即剪切模量  $G$ 、屈服参数  $A_1$ 、屈服参数  $A_2$ 、屈服参数  $A_0$  与屈服参数  $A_1$  的交互作用达到显著，其他因子作用不显著。

### 2.2.2 以脉宽 $W$ 为目标值

首先只对  $C$ 、 $D$ 、 $E$  3 个因子进行试验设计，同时考虑因子间的交叉作用。将因子  $A$ 、 $B$  分别固定为 9、15。其他因子的 3 个水平值仍如表 1 所示。由于交叉因子的自由度为 2，至少需要 2 列，一共至少需要 9 列，因此选用  $L_{27}(3^{13})$  正交表，其表头设计如表 9 所示。

通过对模拟试验数据进行方差分析，可以得到以脉宽  $W$  为目标值的方差分析表，如表 10 所示。从表中可以看出仅因子  $E$  对脉宽  $W$  的作用达到显著，即屈服参数  $A_2$  的作用显著，而因子  $C$ 、 $D$ 、 $CD$ 、 $CE$  和  $DE$  的作用不显著。

表 9 分析  $C$ 、 $D$ 、 $E$  三因子时的表头设计

Tab. 9 The head of table when  $C$ 、 $D$  and  $E$  are analyzed

列数	1	2	3	4	5	6	7
因子	$C$	$D$	$CD_1$	$CD_2$	$E$	$CE_1$	$CE_2$
列数	8	9	10	11	12	13	
因子	$DE_1$			$DE_2$			

表 10 关于  $C$ 、 $D$ 、 $E$  三因子的方差分析表

Tab. 10 Variance analysis table of  $C$ 、 $D$ 、 $E$

因子	平方和	自由度	$F$ 值	显著性
$C$	0.03	2	$2.33 \times 10^{-2}$	
$D$	6.91	2	5.37	
$E$	59.72	2	46.44	*
$CD$	6.52	4	2.53	
$CE$	5.30	4	2.06	
$DE$	3.72	4	1.45	
误差	5.14	8		

注：取  $\alpha = 0.005$ ， $F_{0.995}(2, 8) = 11.04$ ， $F_{0.995}(4, 8) = 8.81$ ，\* 表示对试验指标作用显著。

将因子  $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $E$  分别固定为 15、20、4 和 0.4，通过改变因子  $A$  的大小分析其对脉宽  $W$  作用的显著性，如表 11 所示。可知脉宽  $W$  的变化范围均在 2ms 以内，可以认为因子  $A$  对脉宽  $W$  的作用不显著。

表 11 因子  $A$  的显著性分析

Tab. 11 Significance analyses of factor  $A$

$A$ /MPa	3	5	7	9	11	13	15
$W$ /ms	32.5	33.5	33.9	34.0	33.9	33.5	33.5

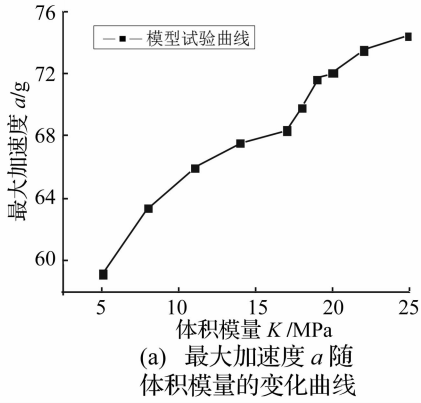
## 3 不同因子的冲击响应特点

通过利用正交表对 5 个因子的显著性进行了分析，确定了其中影响较为显著的因子后，再对各因子的影响效应进行进一步的分析。在分析各因子影响效应过程中，除在研究因子外，其他因子均固定在水平 2 值（如表 1）。

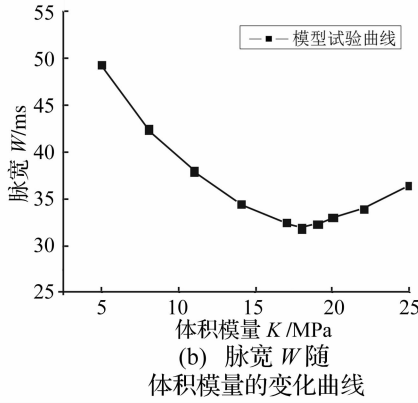
### 3.1 单因子的冲击响应特点分析

图 3 为最大加速度  $a$  和脉宽  $W$  随体积模量的变化曲线。从图 3(a) 可知，最大加速度  $a$  随体积模量的增加而增加。

从图 3(b) 中可知脉宽  $W$  先随体积模量的增加而呈近似线性减小，当增加到 18 MPa 后又逐渐增大。对加速度曲线波形观察可知，当体积模量小于 18 MPa 时，加速度曲线呈前锯齿波形，且在第一个大波峰后还出现一小波峰；当体积模量大于 18 MPa 时，加速度曲线大波峰后的小波峰消失。



(a) 最大加速度  $a$  随体积模量的变化曲线



(b) 脉宽  $W$  随体积模量的变化曲线

图3 体积模量对冲击响应特点的影响

Fig. 3 The influence of bulk modulus on impact characteristic

图4为不同屈服参数 $A_2$ 下最大加速度 $a$ 随剪切模量 $G$ 的变化曲线,从图中可知,随着剪切模量的增加,最大加速度 $a$ 逐渐增加,且增加的幅度逐渐减小。同时可以看出,当屈服参数 $A_2$ 增加时最大加速度 $a$ 随剪切模量的变化幅度有明显增加。

图5为不同屈服参数 $A_0$ 下最大加速度 $a$ 随屈服参数 $A_1$ 的变化曲线,从图中可知,随着屈服参数 $A_1$ 变化, $a$ 的变化范围均在0.5g以内,因此,可以认为屈服参数 $A_1$ 的影响作用很小。

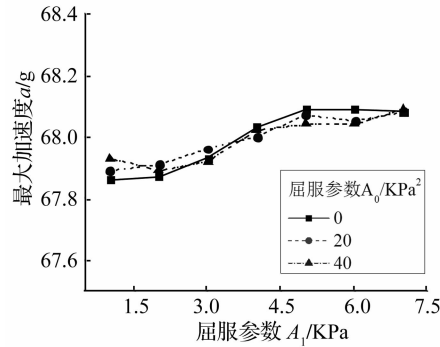
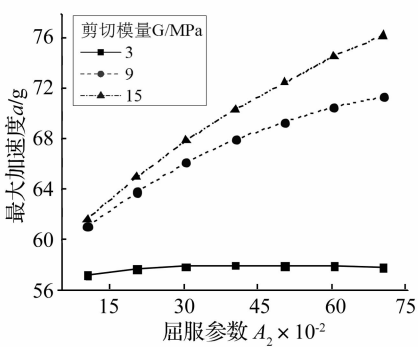


图5 不同屈服参数 $A_0$ 下最大加速度 $a$ 随屈服参数 $A_1$ 的变化曲线

Fig. 5 Relation of maximum acceleration  $a$  and  $A_1$  with different  $A_0$



(a) 不同剪切模量 $G$ 下最大加速度 $a$ 随屈服参数 $A_2$ 的变化曲线

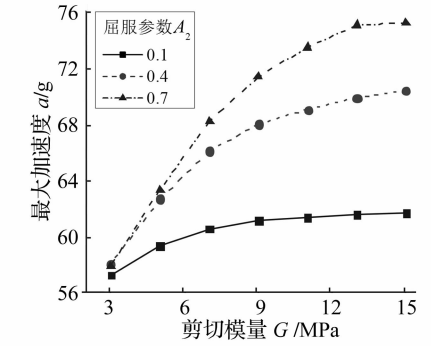
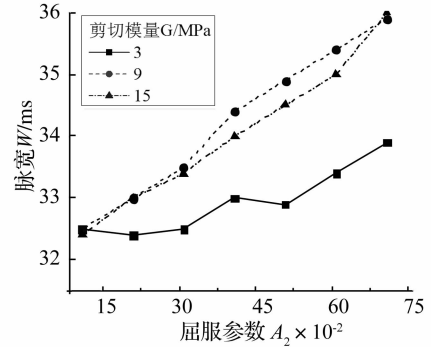


图4 不同屈服参数 $A_2$ 下最大加速度 $a$ 随剪切模量 $G$ 的变化曲线

Fig. 4 Relation of maximum acceleration  $a$  and shearing modulus  $G$  with different  $A_2$

不同剪切模量 $G$ 下最大加速度 $a$ 及脉宽 $W$ 随屈服参数 $A_2$ 的变化曲线如图6所示。从图6(a)中可知,最大加速度 $a$ 随屈服参数 $A_2$ 的增加而逐渐增加;同时随着剪切模量 $G$ 由15 MPa变为9 MPa、3 MPa时,最大加速度 $a$ 随屈服参数 $A_2$ 的变化幅度逐渐减小,当剪切模量 $G$ 为3 MPa时,其变化曲线近似水平。从图6(b)中可知,脉宽 $W$ 随着屈服参数 $A_2$ 的增加而增加,当剪切模量 $G$ 由3 MPa变为9 MPa或15 MPa时,其变化曲线的斜率增加。



(b) 不同剪切模量 $G$ 下脉宽 $W$ 随屈服参数 $A_2$ 的变化曲线

图6 屈服参数 $A_2$ 对冲击响应特点的影响

Fig. 6 The influence of  $A_2$  on impact characteristic

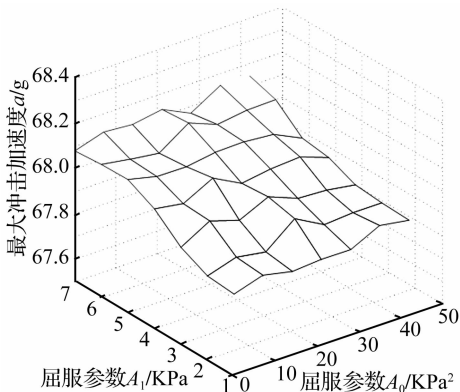


图7 屈服参数 $A_0$ 和 $A_1$ 的双因子响应面

Fig. 7 The influence surface of  $A_0$  and  $A_1$

### 3.2 双因子的冲击响应特点分析

在固定其他参数的情况下,同时更改屈服参数 $A_0$ 和 $A_1$ 进行模拟试验,可以得到一个响应面,如图7所示。从图中可知,最大加速度 $a$ 随屈服参数 $A_0$ 和 $A_1$ 的变化范围均在1g以内,从整体看双因子响应面近似水平于XY平面,屈服参数 $A_0$ 和 $A_1$ 的交互作用对最大加速度 $a$ 的影响不显著。

## 4 结论

本文利用显式动力有限元软件LS-DYNA建立了可以真实模拟返回舱着陆红酒过程的有限元模型,并

利用试验设计的思路,对土壤模型中主要材料参数对着陆冲击响应特性的影响进行了显著性分析。

土壤模型中涉及的参数较多,按通常方法进行分析难度较大,本文灵活应用正交试验方法,全面有效地分析了土壤模型参数对返回舱着陆冲击特性的影响情况,得到的主要结论如下:

(1) 对最大加速度影响最为显著的有体积模量、剪切模量及屈服参数  $A_2$ ,对脉宽影响较大的有体积模量及屈服参数  $A_2$ ,屈服参数  $A_0$  及  $A_1$  对两者的影响都不大。

(2) 对加速度峰值影响显著的因子进行了分析,最大加速度随剪切模量、体积模量及屈服参数  $A_2$  的增加而增加。同时,屈服参数  $A_2$  越小,剪切模量对最大加速度的影响作用越弱;同样剪切模量越小,屈服参数  $A_2$  对最大加速度的影响越弱。

(3) 对脉宽影响显著的因子进行了分析,脉宽随体积模量的增加先减小后增大、随屈服参数  $A_2$  的增加而增加;屈服参数  $A_0$  及屈服参数  $A_0$  和  $A_1$  的交互作用对最大加速度的影响不大。

(4) 在相关问题研究中对计算模型修正时,可根据实际工程需要并在一定物理条件约束下,根据各土壤模型参数的影响规律对相关参数进行微调,从而得到可以有效反映真实土壤特性的土壤模型。

#### 参考文献

- [1] 刘炳坤,王宪民,王玉兰. 人体对模拟着陆冲击动态响应特性研究[J]. 航空学报,1999,20(增):68-70.  
LIU Bing-kun, WANG Xian-min, WANG Yu-lan. Study on characteristics of human body dynamic responses to simulated landing impact[J]. Chinese Journal of Aeronautics,1999, 20 (Sup.):68-70.
- [2] 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.
- [3] 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 Xu-huai, DU Hui-liang, MA Chun-sheng. Water impact simulations and analyses of space capsule response characteristics[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2010,50(8):1297-1301.
- [4] 赵俊锋,刘莉,周思达,等. 月球探测器软着陆冲击力学环境研究[J]. 振动与冲击,2012,31(3):37-42.  
ZHAO Jun-feng, LIU Li, ZHOU Si-da, et al. Dynamic environment research for soft landing for lunar lander[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 37-42.
- [5] 贾世锦. 返回舱结构缓冲仿真分析[R]. 中国宇航学会飞行器专业委员会2004年学术研讨会,2005.
- [6] 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 You-jun, JIN Huai. 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.
- [7] 卞韩城,黄宁,袁亚军,等. 国外载人航天器返回着陆分析与启示[J]. 载人航天,2011(6):1-6.  
BIAN Han-cheng, HUANG Ning, YUAN Yajun. et al. Enlightenment and analyses of foreign manned spacecrafts' landing[J]. Manned Spaceflight, 2011(6):1-6.
- [8] Seddon C M, Moatamedi M. Review of water entry with applications to aerospace structures[J]. International Journal of Impact Engineering,2006,32:1045-1067.
- [9] Wang J T, Lyle K H. Simulating space capsule water landing with explicit finite element method[R]. AIAA-2007-1779, 2007.
- [10] Roland S J. Simulation of the apollo command module uprighting system using LS-DYNA[R]. AIAA-2011-2591, 2011.
- [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 Guo-jiang, YU Deng-yun, WU Qiong. Mathematic model of space capsule' landing impact [J]. Spacecraft Engineering, 1998,7(2):36-43.
- [12] 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 Peng, CHENG Wen-ke, QIN Zi-zeng. Research on dynamic model of the capsule's vertical landing[J]. Journal of National University of Defense Thechnology, 2010,32(6):93-99.
- [13] 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 Chun-sheng, HUANG Shi-lin, ZHANG Jin-huan. Simulations of the landing of manned spacecraft with parachutes using the ALE method in LS-DYNA[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2006, 46(8):1455-1457.
- [14] 贾世锦. 载人飞船返回舱着陆冲击仿真分析[R]. 北京力学学会第17届学术年会,2011.
- [15] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [16] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [17] 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 Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,3:86-92.
- [18] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州:浙江大学出版社,1990.
- [19] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL [M]. Livermore Software Technology Corporation,2003.