

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0093- 07

返回舱垂直着陆过程动力学研究*

郭 鹏, 程文科, 秦子增

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在考虑着陆场地面弹塑性特点的情况下, 建立了返回舱垂直着陆过程的弹塑性接触模型。数值分析结果表明, 返回舱的着陆过程与地面土壤的物理性质有很大关系, 在相同的弹性模量下, 土壤的极限应力越大, 则着陆过载最大值就越大, 着陆过程中的能量损失就越小, 返回舱的“跳跃”现象越明显。

关键词: 返回舱; 着陆场地面; 弹塑性接触; 极限应力

中图分类号: V476. 2 **文献标识码:** A

Research on Dynamic Model of the Capsule's Vertical Landing

GUO Peng, CHENG Wen-ke, QIN Zi-zeng

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

Abstract: Considering the landing field's elastic-plastic characteristic, a model which took the capsule's vertical landing as an elastic-plastic contact problem was established. The numerical simulation indicated that the soil's bearing capability played an important role during the capsule's landing, with the same Young's modulus and Poisson's ratio: when the soil's bearing capability increases, the capsule gets bigger acceleration, less energy loss and higher bounce.

Key words: capsule; landing field; elastic-plastic contact; bearing capability

返回舱着陆是回收系统工作过程的最后一个阶段, 在此阶段, 返回舱与地面发生接触, 垂向速度在短时间内降为 0, 会产生比较大的冲击过载, 这不仅会对航天员的生命安全产生影响, 还可能导致返回舱出现“跳跃”现象。建立合适的返回舱着陆过程动力学模型, 不仅有利于分析返回舱着陆过程的运动状态, 也可以为航天医学工程方面的研究提供借鉴。从 20 世纪 60 年代起, 国外已经展开了对“阿波罗”飞船着陆冲击问题的研究^[1-3], 而国内也采用弹性力学^[4]、有限元^[5]及试验拟合^[6-7]等方法针对“神舟”号载人飞船的着陆过程开展了研究工作, 并取得了一定的成果。然而, 采用弹性力学方法还不能充分反映出着陆场的塑性特征, 而有限元方法则依赖于对结构及材料参数的准确设定, 目前在返回舱着陆冲击过程中的应用也比较有限^[8]。

本文正是在总结已有成果的基础上, 充分考虑着陆场地面的力学性质, 建立了返回舱着陆过程的弹塑性接触模型。由于返回舱着陆时水平速度的设计值较小, 姿态在平衡状态趋于稳定, 另一方面考虑到简化问题的需要, 文章只研究返回舱垂直着陆过程的动力学模型。

1 着陆场地面模型

载人飞船预定着陆场地面主要由土构成^[7], 而天然土体一般是由土颗粒、水和空气三相组成。一般而言, 土体在外力条件下发生的体积变化, 可以认为是空隙中流体体积变化引起的, 而土颗粒体积的变化可以忽略不计。但在冲击载荷作用的情况下, 土体内部的流体来不及排出, 表现出较大的弹性, 因此一般的冲击过程往往将土体作为弹性体来讨论。但在实际情况中, 土体受到冲击载荷作用之后, 往往还保留一部分变形, 这表明在冲击的过程中确实存在部分塑性变形。因此, 研究返回舱的着陆过程必须充分考虑到土的弹塑性。

* 收稿日期: 2010- 06- 15

基金项目: 国家部委资助项目(2009HK10015)

作者简介: 郭鹏(1985-), 男, 博士生。

本文计算中采用了一种较为简单的弹性-理想塑性模型,其应力应变关系曲线如图1所示。在OA段,土体表现出线弹性应力应变关系,在这一段任意一点进行卸载,土体都会按变形曲线的逆向进行恢复,当应力消失时,土体恢复原状;如果应力继续增大至土体的极限荷载 p_s ,土体开始屈服,表现出塑性特性,如AB段所示;在屈服段上某一点B进行卸载,土体会沿着与OA平行的恢复曲线BC进行恢复,直至应力为零,但土体还会保留一段残留应变。

2 返回舱着陆过程动力学模型

返回舱着陆时的速度一般小于 $10\text{ m/s}^{[9]}$,因此,着陆过程更适宜采用接触力学模型。为研究问题方便,对着陆过程作以下假设:

- (1) 考虑返回舱底部的变形涉及复杂的弹性壳理论,且与地面相比,返回舱底部变形量相对为一小量,因此在研究中不考虑舱底的变形;
- (2) 返回舱的底部为一半径为 R 的球冠;
- (3) 返回舱着陆时仅存在垂直速度,水平速度和角速度均为0,舱体轴线平行于当地铅垂线方向;
- (4) 着陆场地面为平面大地,且土质分布均匀。

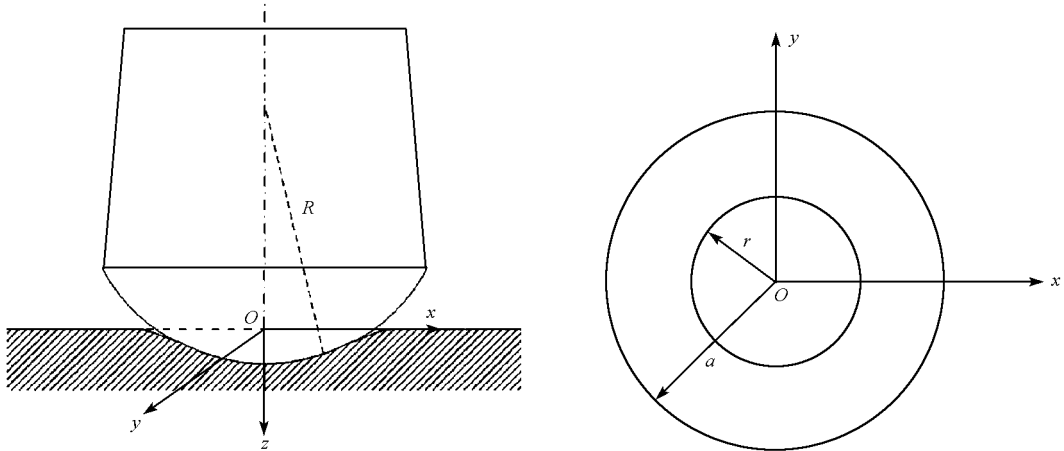


图2 数值计算模型
Fig. 2 The computational model of the capsule

在以上的假设条件下,返回舱垂直着陆过程可视为球形压模压入弹性半空间的过程。

设返回舱受到的接触力大小为 P ,舱底与地面一半径为 a 的圆形区域发生接触。如图2建立坐标系,其中,原点 O 为返回舱轴线与水平面的交点, xy 平面为地表面, z 轴沿返回舱轴线方向指向下,三轴共同组成一右手系。以 O 点为原点还可以建立柱坐标系。

如图3所示,设返回舱在某一时刻侵彻深度为 w ,由于返回舱与地面的接触部分始终保持为一球冠,故而返回舱在地面的侵彻深度可以表示为:

$$w(r) = d_0 - \frac{r^2}{2R} \quad (r \leq a) \quad (1)$$

式中, r 为待求位置与 z 轴的距离, d_0 为中心处位移。返回舱与地面的接触应力分布满足以下关系:

$$\sigma_z(r) = \begin{cases} p(r) & r \leq a \\ 0 & r > a \end{cases} \quad (2)$$

其中, $p(r)$ 为待求量, 并且满足:

$$\iint_{\Omega} p(r) r dr d\theta = P \quad (3)$$

设地面的弹性模量为 E , 泊松比为 ν , 根据弹性半空间上受到分布载荷时的位移公式有:

$$w(r) = \frac{1-\nu^2}{\pi E} \int_0^a \left(\frac{4s}{r+s} \right) K \left(\frac{2\sqrt{rs}}{r+s} \right) p(s) ds \quad (4)$$

式中, $K(\cdot)$ 即代表第一类椭圆积分。经过一系列较为复杂的变换^[10-11], 压缩区域内的接触应力 $p(r)$ 及位移 $w(r)$ 可以通过 Legendre 多项式表示为如下形式:

$$p(r) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \sum_{n=0}^N a_n P_{2n} \left[\left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad r \leq a \quad (5)$$

$$w(r) = \frac{\pi}{2} k a \sum_{n=0}^N \left\{ a_n [P_{2n}(0)]^2 P_{2n} \left[\left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}, \quad r \leq a \quad (6)$$

式中, k 为与地表土层相关的物理量, 其表达式为:

$$k = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \quad (7)$$

P_{2n} 代表 Legendre 多项式的偶数项, 当 $n=0$ 及 $n=1$ 时对应的具体形式如下:

$$\begin{cases} P_0(x) = 1 \\ P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1) \end{cases} \quad (8)$$

考虑到在返回舱压入地面的过程中始终满足式(1)确定的几何关系, 可知取到 P_2 项即可精确反映返回舱在地面的位移情况, 从而得到下式:

$$p(r) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ a_0 + a_1 \frac{1}{2} \left[3 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) - 1 \right] \right\} \quad (9)$$

$$w(r) = \frac{\pi}{2} k a \left\{ a_0 + a_1 \frac{1}{8} \left[3 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) - 1 \right] \right\} \quad (10)$$

结合式(1)可求得系数 a_0 和 a_1 的具体形式:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{2R} \frac{16a}{3\pi k} \\ a_0 = \frac{2}{\pi k a} \left(d_0 - \frac{a^2}{3R} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式(9)~(11)即为返回舱着陆过程中位移和接触应力的一般表达式。由于在返回舱与地面的接触圆的外缘, 接触应力为0, 应变不为0, 故边缘处应满足 $a_1 = 2a_0$ 。

考虑到返回舱在着陆过程中的实际情况, 将整个返回过程分为三个阶段: 弹性变形阶段、弹塑性变形阶段以及恢复阶段。以下即对每个阶段的动力学模型进行详细介绍。

2.1 弹性变形阶段

在这一阶段, 返回舱对地面的接触力比较小, 最大接触应力小于着陆场地表土层的极限应力, 地面处于弹性变形状态。在这一阶段, 接触力 P 的大小为:

$$\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ a_0 + a_1 \frac{1}{2} \left[3 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) - 1 \right] \right\} r dr = P \quad (12)$$

积分即可得:

$$2\pi a a_0 = P \quad (13)$$

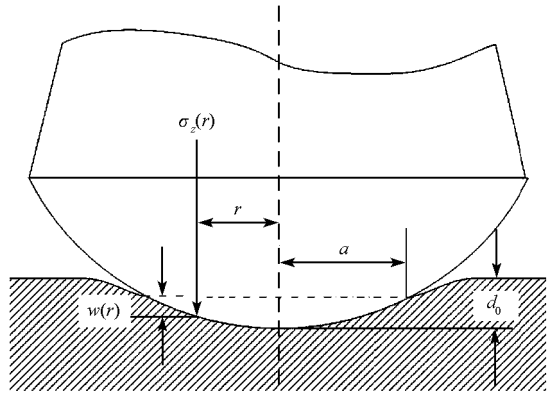


图3 接触过程应力应变图
Fig. 3 Relationship between stress and strain during contact process

从而可以得到以下表达式:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{P}{2\pi a^2} \\ a_1 = \frac{P}{\pi a^2} \\ P = \frac{8a^3}{3kR} \end{cases} \quad (14)$$

又由式(11)可得:

$$a^2 = d_0 R \quad (15)$$

从而可以将接触力表示为返回舱中心处侵彻深度 z 的函数:

$$P = \frac{8\sqrt{R}}{3k} d_0^{\frac{3}{2}} = \frac{8\sqrt{R}}{3k} z^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

在弹性变形阶段,由上面的公式得到的接触力大小与 Hertz 理论^[12]得到的接触力大小完全相同。

2.2 弹塑性变形阶段

当返回舱与地面之间的接触应力大于地表土层自身的极限载荷即满足 $p > p_s$ 时,地表会产生塑性变形,此时,式(16)不再成立。返回舱与地面的碰撞进入弹塑性变形阶段。

在弹塑性变形阶段,返回舱与地面的接触位移公式依然满足式(1)的关系,但接触圆内的区域将分为两个不同的部分,靠近中心的部分由于产生的接触应力大,成为塑性区,而远离中心的部分依旧产生弹性变形。图4中,半径为 r_s 的圆形区域即为塑性变形区。

由于在塑性变形区地面只能提供极限应力 p_s ,式(9)表示的接触应力分布不再适用,而在弹性变形区,接触应力的分布依然满足式(9)的表达式,故而弹性变形区产生的接触力 P_t 可以表示为:

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_s}^a \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ a_0 + a_1 \frac{1}{2} \left[3 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) - 1 \right] \right\} r dr \\ &= P_t = P - \pi r_s^2 p_s \end{aligned} \quad (17)$$

从而可以得到以下关系式:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{P_t a}{2\pi \left(a^2 - r_s^2\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a_1 = \frac{P_t a}{\pi \left(a^2 - r_s^2\right)^{\frac{3}{2}}} \\ P_t = \frac{8 \left(a^2 - r_s^2\right)^{\frac{3}{2}}}{3kR} \end{cases} \quad (18)$$

不难看出,在 $r_s \rightarrow 0$ 的情况下,上式与式(14)是等价的。要求解接触力 P , 需要首先得到塑性变形区的半径 r_s 和接触圆的半径 a 。 r_s 可以通过以下公式求得

$$p(r_s) = \left(1 - \frac{r_s^2}{a^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ a_0 + a_1 \frac{1}{2} \left[3 \left(1 - \frac{r_s^2}{a^2}\right) - 1 \right] \right\} = p_s, \quad r_s \leq a \quad (19)$$

化简后可得

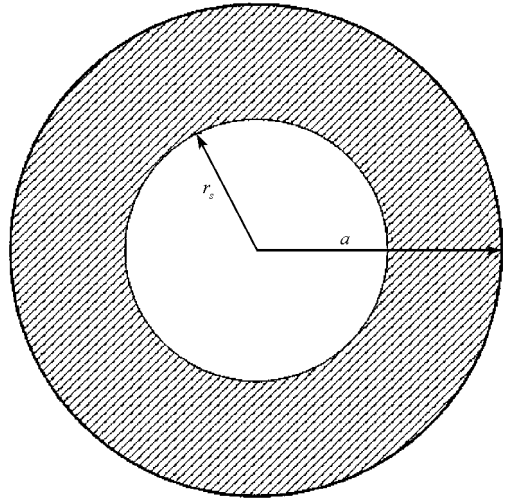


图4 塑性变形区与弹性变形区
Fig. 4 Distribution of plastic and elastic domain

$$r_s^2 = d_0 R - \frac{(p_s \pi k R)^2}{16} \quad (20)$$

而接触区半径 a 可由式(11)得到

$$a = \sqrt{d_0 R}$$

代入 P_t 的表达式中,可得

$$P_t = \frac{8(d_0 R - r_s^2)^{\frac{3}{2}}}{3kR} = \frac{8(zR - r_s^2)^{\frac{3}{2}}}{3kR} \quad (21)$$

从而得到总的接触力 P 的大小为

$$P = \frac{8(zR - r_s^2)^{\frac{3}{2}}}{3kR} + \pi r_s^2 p_s \quad (22)$$

2.3 恢复阶段

在恢复阶段,地面土层中被压缩的部分进行弹性恢复,恢复曲线的斜率与弹性压缩曲线斜率相同。其中,在边缘部分仅发生弹性变形的部分可以恢复原状,塑性变形区则在恢复阶段结束后仍保留一部分变形。

若记塑性变形区的最大半径为 $r_{s\max}$,则在恢复阶段弹性变形区提供的恢复力 P_1 为

$$\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_{s\max}}^a \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ a_0 + a_1 \frac{1}{2} \left[3 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) - 1 \right] \right\} r dr = P_1 \quad (23)$$

而塑性变形区所受的接触应力始终与 $r = r_{s\max}$ 处所受接触应力大小一致,故其提供的恢复力 P_2 大小可表示为

$$\pi r_{s\max}^2 3a_0 \left(1 - \frac{r_{s\max}^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} = P_2 \quad (24)$$

式中的 a 与 a_0 均可通过式(14)得到。总的恢复力大小即为 P_1 与 P_2 之和。

3 数值分析

当返回舱着陆过程的动力学模型建立之后,即可以采用数值方法进行求解。取初始条件为 $z=2m/s$, $z_0=0m$,通过式(16)、(22)及(24)求解某一瞬时对应的接触力,对返回舱的动力学方程进行数值积分,即可得到着陆过程任意时刻返回舱的状态。由于地面土壤参数在动载荷作用下与在静载荷作用下有很大不同^[13],本文参考文献[7]提供的着陆场地表资料,采用割线法求得地面的变形系数为57.9,泊松比为0.25,分别计算地面土体极限应力为7MPa、17MPa以及完全弹性(极限应力为无穷大)情况下返回舱的着陆过程,得到返回舱速度、位移、过载及塑性变形区大小随时间变化的曲线如图5所示。

从图5(a)所示的速度曲线可以看出,地面的极限应力越大,返回舱速度衰减越快,接触过程结束后返回舱脱离地面时的剩余速度越大,整个着陆过程中能量损失越小。在完全弹性的情况下,返回舱的剩余速度与初始速度大小相同,整个着陆过程无能量损失,返回舱会出现明显的“跳跃”现象。图6即为几种不同极限应力条件下返回舱与地面反复接触3次过程中Z向坐标变化情况,从图中可以看出,在完全弹性条件下,如果不考虑着陆过程中摩擦导致的能量损失,返回舱的回弹高度可以达到0.2m左右,随着土壤极限应力减小,返回舱回弹高度越来越低,当地面土壤的极限应力为7MPa时,返回舱基本不会发生“跳跃”。

从图5(b)所示的过载曲线可以看出,地面极限应力越大,则舱体在着陆过程中所受过载的最大值越大,压缩阶段持续时间越短,而恢复阶段持续时间越长。数值仿真表明,在速度为2m/s的情况下,返回舱与地面单次接触的时间在30~120ms。表1为通过数值仿真得到的返回舱速度分别为2m/s、3m/s、4m/s、5m/s时返回舱与地面发生单次接触的时间与过载峰值的范围。

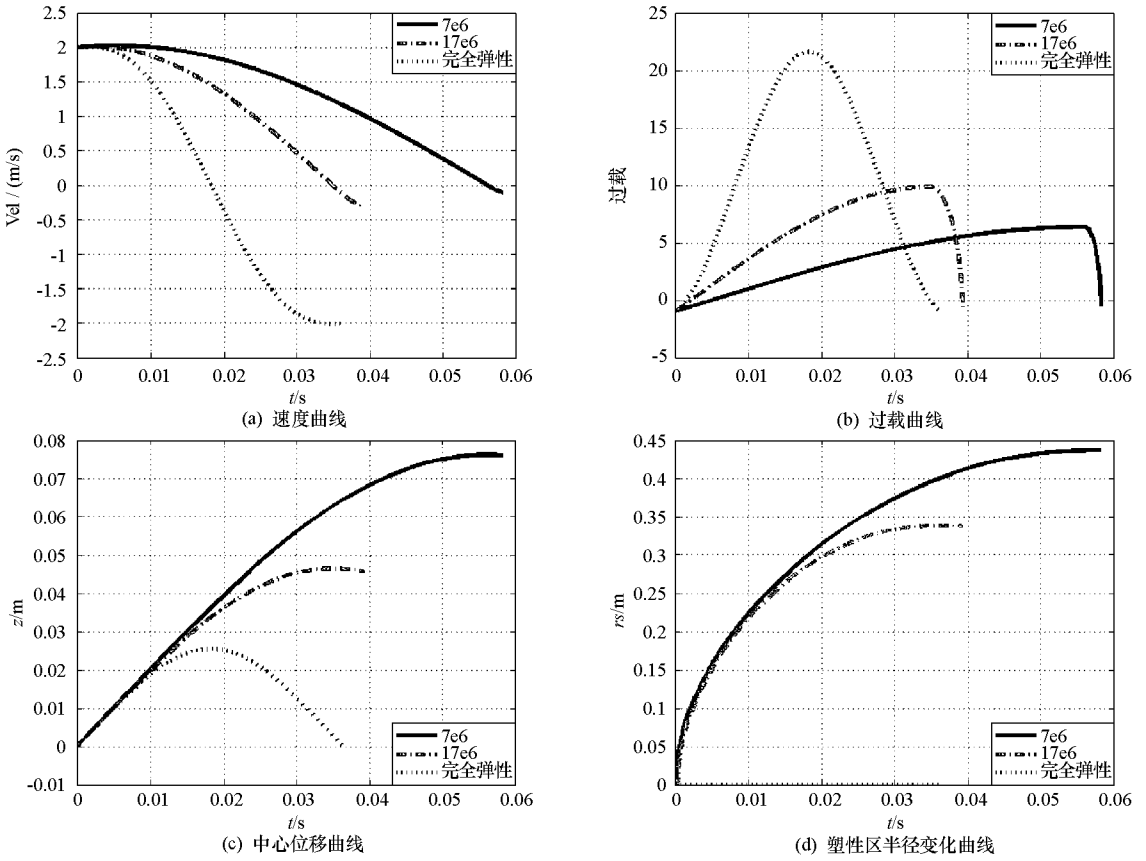


图5 不同极限应力条件下数值计算结果

Fig. 5 Comparison of simulating curves in different bearing capability

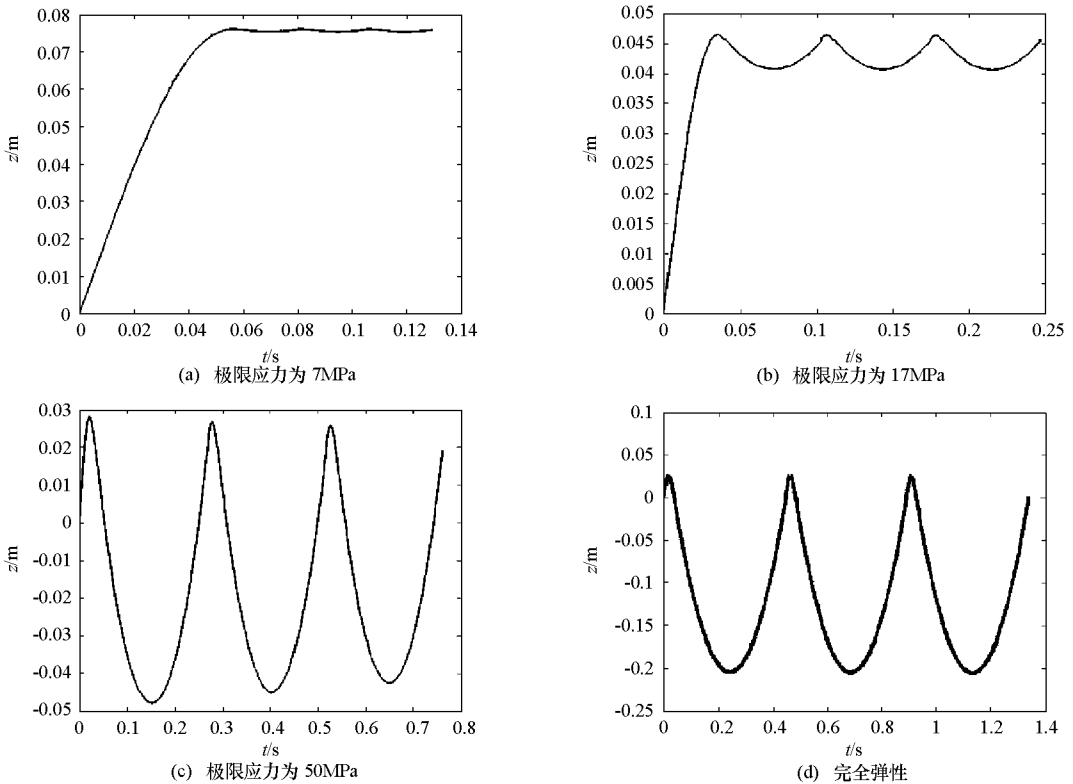


图6 不同极限应力情况下返回舱 z 向坐标变化曲线

Fig. 6 Comparison of z-displacement curves in different bearing capability

表 1 返回舱着陆过程时间及过载峰值范围

Tab. 1 The range of contact time and maximum load in different velocity

速度/(m/s)	最大接触时间/ms	最小接触时间/ms	最大过载峰值	最小过载峰值
2	120	36	21.6	3.3
3	76	33	34.8	7.0
4	56	31	48.9	12.4
5	46	30	63.8	19.4

从图 5(c) 所示的返回舱中心的位移曲线可以看出, 地面极限应力越大, 则位移的最大值越小。接触结束后地面存在残余变形越小。

从图 5(d) 所示的塑性区变化曲线可以看出, 在考虑地面塑性的情况下, 塑性区增长速度呈现出越来越慢的趋势, 直至最后保持为恒定值。

4 结论

本文从弹塑性力学的角度研究了返回舱着陆过程, 建立了基于位移控制的返回舱着陆过程的动力学模型, 所建立的分析模型对于其他弹塑性压模问题同样具有意义。在此基础上对着陆场地面进行弹性-理想塑性的假设下对返回舱的着陆过程进行数值分析, 分析结果表明, 地面的极限应力是影响着陆过程中返回舱动力学特性的重要参数, 选取极限应力较小的地面作为着陆场有利于降低返回舱着陆过程中的最大冲击过载, 并可以避免返回舱在着陆过程中出现“跳跃”。

然而, 本文的数值分析是基于地面的弹性模量和极限载荷为定值, 试验证明, 在受到冲击载荷作用时, 土体的弹性模量和极限载荷往往会随着加载时间以及冲击载荷加载速度发生变化, 土体的应力应变关系也相当复杂, 目前冲击载荷作用下土壤模型还不够成熟, 因此, 要得到返回舱着陆过程较为精确的模型, 还有待于对着陆场的地面模型进行进一步研究。

参考文献:

- [1] Herold E B. Landing Impact of the Apollo Command Module[R]. AIAA- 70- 1165, 1970.
- [2] Jean F V. Soft Landing Impact Attenuation Technologies Review[R]. AIAA- 95- 1535, 1995.
- [3] Karen E J, Edw in L F. A Survey of Research Performed at NASA Langley Research Center's Impact Dynamics Research Facility[R]. AIAA- 2003- 1896, 2003.
- [4] 郭叔伟, 秦子增, 宋旭民, 等. 载人飞船返回舱着陆撞击分析[J]. 湖北航天科技, 2005(6): 55- 59.
- [5] 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): 37- 45.
- [6] 杜汇良, 黄世霖, 张金换. 航天飞船座椅着陆缓冲系统的力学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(5): 717- 720.
- [7] 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.
- [8] 杜汇良. 飞船返回舱故障着陆冲击缓冲系统改进设计计算分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [9] 戚发轫, 朱仁璋, 李颐黎. 载人航天器技术(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [10] Gladwell G M L. 经典弹性理论中的接触问题[M]. 范天佑, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 1991.
- [11] 孔祥安, 江晓禹, 金学松. 固体接触力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [12] 程昌钧, 朱媛媛. 弹性力学[M]. 上海: 上海大学出版社, 2005.
- [13] 杨桂通. 土动力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.