

火箭蒙皮在岩石颗粒撞击下的变形与破坏

沈晖航, 谢建, 李良, 权辉

(火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点实验室, 西安, 710025)

摘要 火箭井式发射过程中,发射场坪上的岩石颗粒在高速引流的作用下会向井口运动并有可能撞击到正在出井的火箭。为了预测火箭蒙皮在岩石颗粒撞击下的损伤情况,利用非线性显式动力学分析程序 LS-DYNA 建立了岩石颗粒垂直撞击薄靶板的三维模型,分析了火箭蒙皮在岩石颗粒撞击下的动态响应。研究了岩石颗粒的速度、体积及其形状和桁条结构对蒙皮变形破坏的影响。研究表明:在岩石颗粒撞击下,火箭蒙皮主要发生弹性变形,局部区域发生塑性变形并产生 1~5 mm 不等的永久凹陷。在撞击过程中,蒙皮的变形位移与岩石颗粒的撞击速度和体积近似成正比关系,且长方体岩石颗粒对蒙皮造成的变形破坏要小于球体岩石颗粒。此外,桁条结构在一定程度上可以提高蒙皮的抗冲击性能。

关键词 火箭蒙皮;岩石颗粒;碰撞;弹塑性变形;数值仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.02.004

中图分类号 V55;O347 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)02-0021-07

Damage of Rocket Skin under the Impact of Rock Particle

SHEN Huihang, XIE Jian, LI Liang, QUAN Hui

(National Key Laboratory for Armament Launch Theory & Technology,

Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In the process of the rocket silo launching, the rock particles on launching site move toward the silo and may impact the rocket having out just in time under the action of high-speed airflow. In order to predict the damage of rocket skin, the model of vertically impact of rock particle on a thin plate is established by LS-DYNA, and the dynamic response of the skin is analyzed. The effects of stringer structures and rock particle velocity, volume and shape on the deformation of the skin are discussed. The results show that under the impact of rock particle, the elastic deformation of the rocket skin mainly occurs and the plastic deformation occurs in local areas, and the depth of the permanent depression is from 1 mm to 5 mm. The deformation displacement of the rocket skin is approximately proportional to the impact velocity and volume of the rock particle, and the damage caused by the cuboid rock particle is less than that of the sphere particle. The stringer structures can improve the impact resistance of the skin in a certain extent.

Key words: rocket skin; rock particle; impact; elastic-plastic deformation; numerical simulation

火箭井式发射过程中,受燃气引射作用影响井口会产生负压^[1-2],导致井口周围的大气以较高的速

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(51475462)

作者简介: 沈晖航(1993—),男,浙江嘉兴人,硕士,主要从事兵器发射理论研究。E-mail: 1458008827@qq.com

引用格式: 沈晖航, 谢建, 李良, 等. 火箭蒙皮在岩石颗粒撞击下的变形与破坏[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(2): 21-27.
SHEN Huihang, XIE Jian, LI Liang, et al. Damage of Rocket Skin under the Impact of Rock Particle[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(2): 21-27.

度流向井内。在高速气流的作用下,发射场坪上的岩石颗粒会向井口运动并有可能撞击到正在出井的火箭薄壳表面,使壳体发生变形与破坏。铝合金蒙皮是火箭箭体外壳的典型材料^[3-4],研究火箭蒙皮受到岩石颗粒的撞击过程并预测蒙皮的损伤程度,可以为发射前的场坪清理和防护工作提供重要依据。

针对薄靶板的撞击动力学问题,国内外有很多研究。N. Levy 和 W. Goldsmith^[5-6]进行了球头弹丸正冲击薄金属靶板的试验,对撞击力和靶板的变形进行了测量并分析了靶板的不同变形形态。陈长海等^[7]结合弹道冲击试验,对球头弹丸低速冲击下薄板的变形模式进行了分析并建立了球头弹丸低速冲击下薄板塑性大变形的理论计算模型。展全伟等^[8]进行了飞机加强蒙皮的模拟弹击试验,研究了弹丸速度对靶板变形区有效直径和变形深度的影响。黄晶和许希武^[9]利用有限元分析软件 MSC Dytran 模拟了在不同的射弹碰撞速度下薄靶板的侵彻击穿过程,讨论了带加强筋薄靶板和具有初始应力的薄靶板的破坏损伤情况。

上述研究从试验、理论计算和仿真模拟的角度对薄靶板的撞击问题进行了研究,但在研究的过程中都将薄板简化为平板模型,没有考虑板的具体外在形状。本文结合火箭蒙皮的圆柱壳结构,利用非线性显式动力学分析程序 LS-DYNA 建立了岩石颗粒垂直撞击火箭蒙皮的三维模型,模拟了铝合金蒙皮在岩石颗粒撞击下发生变形破坏的过程。研究了岩石颗粒速度、体积及其形状对铝合金蒙皮变形破坏的影响,并讨论了桁条对蒙皮抗冲击性能的影响。

1 数值仿真的基本理论

1.1 控制方程描述

在模拟固体碰撞行为时,LS-DYNA 程序采用的主要算法是 Lagrange 描述法^[10]。物体是由质点构成的,其形状由质点的空间位置决定。当物体发生变形时,实质上是构成物体的质点的空间位置发生了变化。在笛卡尔直角坐标系中,设质点 α 在 $t=0$ 时刻的位置坐标为 X_α ($\alpha=1,2,3$)。假设经过时间 t 物体发生变形,质点 α 的位置坐标变更为 x_i ($i=1,2,3$),它是坐标 X_α 和时间 t 的函数,即质点的运动方程为:

$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \quad (1)$$

根据连续介质力学理论,可以得到守恒方程如下:

1) 动量守恒方程:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为 Cauchy 应力分量; ρ 为当前质量密度; f_i

为单位质量体积力; \ddot{x}_i 为质点加速度。

2) 质量守恒方程:

$$\rho(x_i) = \rho_0(X_\alpha) \left| \frac{\partial X_\alpha}{\partial x_i} \right| \quad (3)$$

式中: ρ_0 为初始质量密度。

3) 能量守恒方程:

$$\dot{U} + \dot{K} = L^{(e)} \quad (4)$$

式中: \dot{U} 为系统总内能的时间变率; \dot{K} 为系统总动能的时间变率; $L^{(e)}$ 为施加于系统的外功率。

1.2 虚功原理与显式时间积分法

在碰撞过程中,任意时刻都满足下式的虚功原理:

$$\int_V \rho \dot{v}_i \delta v_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta D_{ij} dV - \int_V \rho \hat{b}_i \delta v_i dV - \int_{\partial_s} \hat{t}_i \delta v_i dV = 0 \quad (5)$$

式中: \dot{v}_i 为加速度分量; v_i 为速度分量; D_{ij} 为变形率张量分量; b_i 为体积力分量; ∂_s 为接触边界; t_i 为接触力分量; V 为碰撞系统在当前时间所占据的空间。

利用有限单元离散化并引入虚功位移场,式(5)可转化为二阶常微分方程组^[11]:

$$\mathbf{F}^{\text{ext}} - \mathbf{F}^{\text{int}} + \mathbf{F}^c = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} \quad (6)$$

式中: \mathbf{F}^{ext} 为节点外力矢量; \mathbf{F}^{int} 为节点内力矢量; \mathbf{F}^c 为接触力及分布力矢量; \mathbf{M} 为质量矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}$ 为节点加速度矢量。

利用显式时间积分法中的中心差分法进行求解,即通过已知时刻 $0, t_1, \dots, t_n$ 的解去求解下一时刻 t_{n+1} 的解。

由式(6)得 t_n 时刻的加速度为:

$$\ddot{\mathbf{u}}(t_n) = \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{F}^{\text{ext}}(t_n) - \mathbf{F}^{\text{int}}(t_n) + \mathbf{F}^c(t_n)] \quad (7)$$

t_{n+1} 时刻的速度 $\dot{\mathbf{u}}_{n+\frac{1}{2}}$ 和位移 \mathbf{u}_{n+1} 由中心差分法求出:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{n+1} &= \mathbf{u}_n + \dot{\mathbf{u}}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t_{n+\frac{1}{2}} \\ \dot{\mathbf{u}}_{n+\frac{1}{2}} &= \dot{\mathbf{u}}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{\mathbf{u}}(t_n) \Delta t_n \\ \Delta t_{n+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \end{aligned} \quad (8)$$

1.3 材料本构模型

岩石颗粒撞击火箭蒙皮的过程中,岩石颗粒的变形量很小,可以把岩石颗粒模型简化为刚体。而蒙皮在撞击过程中主要发生弹塑性变形,因此采用塑性随动模型 Plastic-Kinematic,其应变率由 Cowper-Symonds 模型来考虑^[12],用与应变率有关的因数表示屈服应力,见下式:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{n}} \right] (\sigma_0 + \beta E_P \epsilon_P^{\text{eff}}) \quad (9)$$

式中: σ_Y 为屈服应力; σ_0 为初始屈服应力; ϵ 为应变

率; C 和 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数; β 为硬化参数; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量。

2 薄靶板变形破坏的形态

一般而言,低速冲击的速度在 $25 \sim 500 \text{ m/s}$ ^[13]。通过对某型火箭出井过程中发射场坪上岩石颗粒的运动规律进行数值仿真研究^[14],得到在最强引流的作用下,能撞击到火箭的岩石颗粒其撞击速度不超过 40 m/s 。因此,岩石颗粒撞击火箭蒙皮属于低速冲击问题,在低速冲击范围内薄靶板将产生非穿孔特性破坏,即主要发生弹塑性弯曲变形。

在薄靶板的非穿孔特性破坏中,板的变形有 2 种:隆起,即板的形状变成和弹头形状一致;盘形凹陷,即从靶板和弹头接触处向外延伸的弯曲变形^[15]。如图 1 所示,薄靶板的最大变形位移为 w_{max} 。

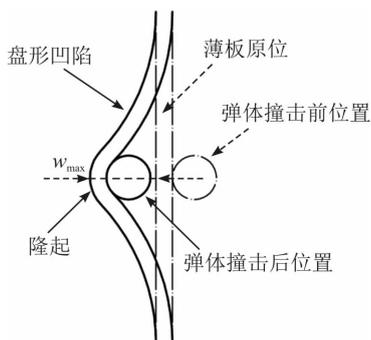


图 1 薄靶板受撞击后产生的塑性变形

3 仿真计算模型

3.1 蒙皮模型

火箭蒙皮的外形结构可以简化为一个薄圆柱壳,由于火箭外壳的尺寸远大于岩石颗粒的尺寸,所以计算时截取部分蒙皮作为碰撞研究对象。根据相关参考文献^[16~18],蒙皮的材料选取高强度硬铝 LY12-CZ,其密度为 2780 kg/m^3 ,弹性模量为 72 GPa ,屈服强度为 345 MPa ,泊松比为 0.3 ,切线模量为 690 MPa 。蒙皮模型的结构尺寸如图 2 所示,其中曲板轴向长度为 600 mm ,半径为 1675 mm ,壁厚为 1.5 mm 。

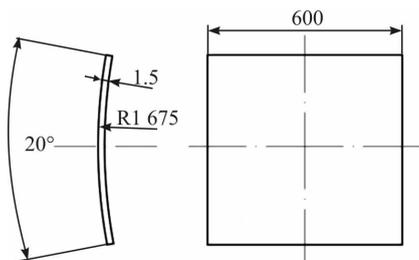


图 2 蒙皮模型结构尺寸

3.2 岩石颗粒模型

自然界中岩石颗粒的形状多种多样且绝大部分是不规则形状,为方便研究对岩石颗粒的形状做理想化处理。计算时采用的岩石颗粒形状有球体和长方体 2 种,长方体的长宽高比值取 $2:1:1$,其模型见图 3。此外,不同类型的岩石具有不同的力学性能,根据参考文献^[19],计算时岩石颗粒的材料参数设置为密度为 2600 kg/m^3 ,弹性模量为 80 GPa ,屈服强度为 200 MPa ,泊松比为 0.25 。

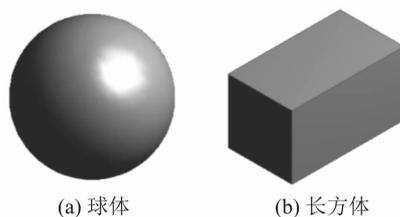


图 3 岩石颗粒模型

4 仿真过程及分析

4.1 撞击动态响应分析

为分析蒙皮在遭受岩石颗粒撞击后的动态响应过程,将岩石颗粒的形状设定为球体,取直径为 40 mm ,并对其加载 35 m/s 的垂直撞击速度,撞击三维模型见图 4。在观察蒙皮变形过程时,用一平面将模型切割,即图 4 中过撞击中心点的透明平面,取截面曲线(变形过程见图 5)为观察对象。

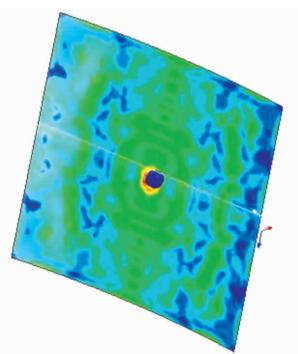


图 4 撞击三维模型示意图

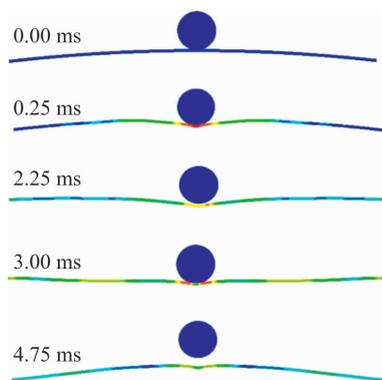


图 5 截面曲线的变形过程

从图5可以看出,在遭受岩石颗粒撞击后,蒙皮将沿着撞击速度方向产生变形位移,当变形位移达到最大值 w_{\max} 时开始反弹。截面曲线的变形过程证明蒙皮的变形特性与理论相吻合,其变形形态为隆起与盘形凹陷。此外,由于岩石颗粒的撞击速度较低,蒙皮的变形量较小。

为进一步了解撞击过程中蒙皮上应力和位移变化情况,记录了撞击中心单元 Element-22925 上的等效应力和撞击中心节点 Node-23862 上的位移,见图6和图7。

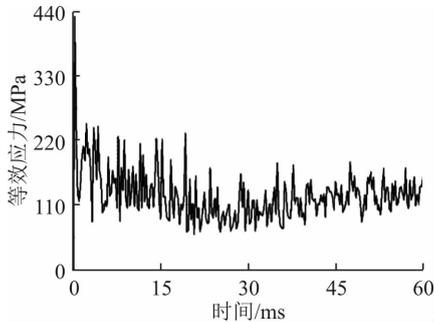


图6 撞击中心单元的等效应力时程曲线

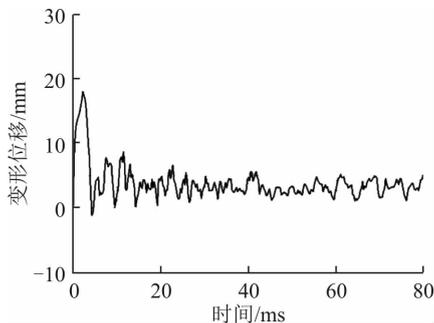


图7 撞击中心节点的位移时程曲线

从图6和图7可以看出,在撞击过程中,蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 为430.73 MPa,已经超过蒙皮材料的屈服应力,最大变形位移 w_{\max} 为18.01 mm。当撞击结束后,蒙皮为了释放能量近似在平衡位置发生振动,平衡位置处的等效应力 p_b 近似为150.75 MPa,变形位移 w_b 近似为3.33 mm。由于等效应力和变形位移的波动都趋向稳定,可以判断蒙皮在撞击过程中发生了局部塑性变形,最终蒙皮表面上将产生约3.33 mm的永久凹陷。

4.2 撞击速度对蒙皮变形破坏的影响

为分析撞击速度对蒙皮变形破坏的影响,将岩石颗粒的形状设定为球体,取球体直径为40 mm,分别模拟在25 m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s的垂直撞击速度下蒙皮的变形破坏情况。图8和图9给出了不同撞击速度下蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 和最大变形位移 w_{\max} 以及振动平衡位置的等效应力 p_b 和变形位移 w_b 。

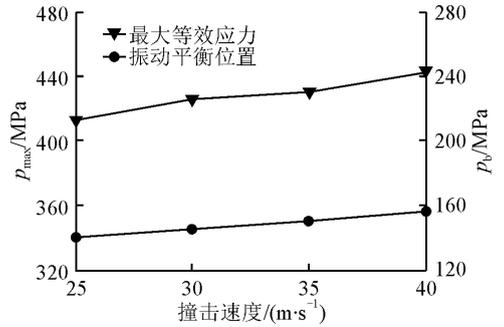


图8 不同撞击速度下的等效应力

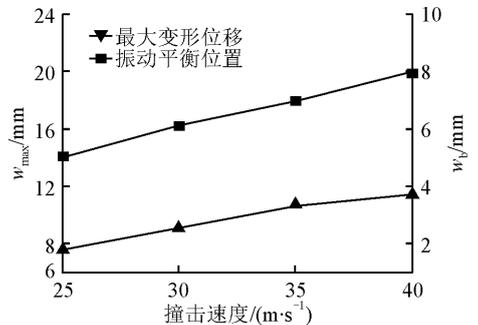


图9 不同撞击速度下的变形位移

从图8和图9可以看出,当撞击速度为25 m/s时,蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 为413.56 MPa,最大变形位移 w_{\max} 为14.06 mm,振动平衡位置的等效应力 p_b 为140.35 MPa,变形位移 w_b 为1.78 mm。当撞击速度增加到40 m/s时,蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 为442.97 MPa,最大变形位移 w_{\max} 为19.89 mm,振动平衡位置的等效应力 p_b 为156.26 MPa,变形位移 w_b 为3.73 mm。可见,蒙皮上的等效应力和变形位移与岩石颗粒的撞击速度近似成正比关系。即相同条件下,颗粒撞击速度越大,蒙皮产生的变形凹陷越大。原因在于撞击能量随着速度的增大而增大,从而导致蒙皮上的应变能变大。

4.3 颗粒体积对蒙皮变形破坏的影响

为分析颗粒体积对蒙皮变形破坏的影响,将岩石颗粒的形状设定为球体,取撞击速度为40 m/s,分别模拟在直径为30 mm、35 mm、40 mm、45 mm的岩石颗粒撞击下蒙皮的变形破坏情况。图10和图11给出了不同直径颗粒撞击下蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 和最大变形位移 w_{\max} 以及振动平衡位置的等效应力 p_b 和变形位移 w_b 。

从图10和图11可以看出,当颗粒直径为30 mm时,蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 为380.41 MPa,最大变形位移 w_{\max} 为13.09 mm,振动平衡位置的等效应力 p_b 为145.21 MPa,变形位移 w_b 为2.80 mm。当颗粒直径增加到45 mm时,蒙皮上的最大等效应力 p_{\max} 为457.46 MPa,最大变形位移 w_{\max} 为22.51 mm,振动平衡位置的等效应力 p_b 为

169.25 MPa, 变形位移 w_b 为 4.79 mm。可见, 蒙皮上的等效应力和变形位移与颗粒直径近似成正比关系, 即相同速度下, 大体积的岩石颗粒对蒙皮造成的变形破坏要大于小体积颗粒。

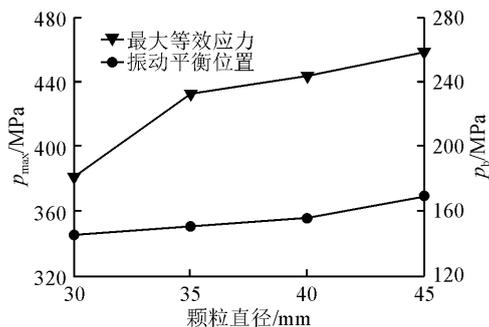


图10 不同直径颗粒撞击下的等效应力

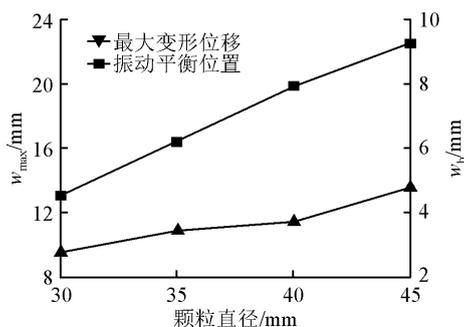


图11 不同直径颗粒撞击下的变形位移

4.4 颗粒形状对蒙皮变形破坏的影响

为分析颗粒形状对蒙皮变形破坏的影响, 首先将岩石颗粒的形状设定为球体, 取球体直径为 40 mm, 分别模拟在 25 m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s 的垂直撞击速度下蒙皮的变形破坏情况。然后再将颗粒的形状设定为长方体, 其体积与球体保持一致, 加载相同的垂直撞击速度进行对比计算, 结果见图 12 和图 13。

从图 12 和图 13 可以看出, 在相同的撞击速度下, 当颗粒形状为长方体时, 蒙皮上的最大等效应力 p_{max} 和最大变形位移 w_{max} 要明显小于球体。比如在 25 m/s 的撞击速度下, 当颗粒形状为长方体时, 蒙皮上的最大等效应力 p_{max} 为 326.69 MPa, 没有达到蒙皮材料的屈服应力, 最大变形位移 w_{max} 为 12.95 mm。而当颗粒形状为球体时, 蒙皮上的最大等效应力 p_{max} 为 413.56 MPa, 已经超过蒙皮材料的屈服应力, 最大变形位移 w_{max} 为 14.06 mm。可见, 长方体岩石颗粒对蒙皮造成的变形破坏要小于球体岩石颗粒。原因主要在于当岩石颗粒撞击蒙皮时, 球体岩石颗粒与蒙皮是点-点接触, 撞击区域应力较为集中, 蒙皮受压迅速发生变形破坏; 而长方体岩石颗粒与蒙皮是点-面接触, 撞击区域受力较为均匀, 蒙皮整体抗冲击性能更好。

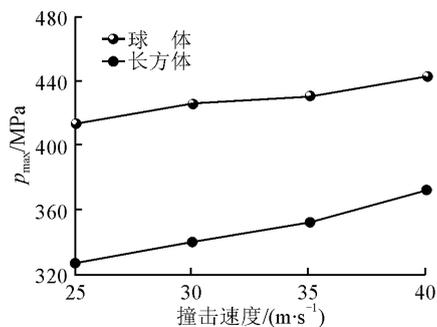


图12 不同形状颗粒撞击下的最大等效应力

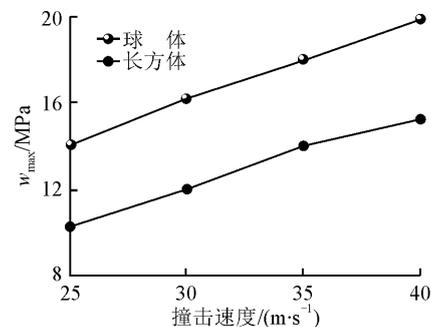


图13 不同形状颗粒撞击下的最大变形位移

4.5 桁条对蒙皮承载能力的影响

火箭外壳的实际结构是由隔框、桁条和铝合金蒙皮组成, 桁条与蒙皮采用铆钉连接^[20]。为了模拟岩石颗粒撞击带有桁条的蒙皮, 在蒙皮模型背面添加“ \perp ”型桁条。蒙皮结构和桁条尺寸见图 14, 每隔 4° 布置一根桁条, 桁条的材料与蒙皮相同。其中桁条与蒙皮的连接方式做简化处理, 模型中采用共节点连接。

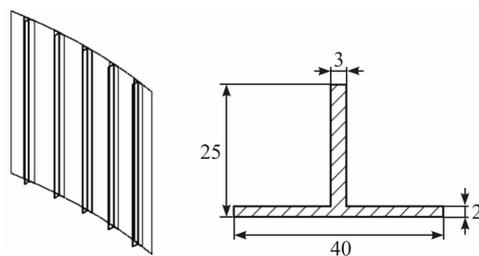


图14 蒙皮结构和桁条尺寸(mm)

计算时将岩石颗粒的形状设定为球体, 取球体直径为 40 mm, 并对其加载 35 m/s 的垂直撞击速度, 撞击点落在中间桁条上。图 15 给出了撞击过程中, 撞击中心单元的等效应力变化情况; 图 16 给出了撞击过程中, 撞击中心节点的变形位移变化情况。

从图 15 和图 16 可以看出, 在撞击过程中, 蒙皮上的最大等效应力 p_{max} 为 234.67 MPa, 没有达到蒙皮材料的屈服应力, 最大变形位移 w_{max} 为 3.11 mm。当撞击结束后, 蒙皮进入振动状态, 平衡位置处的等效应力 p_b 近似为 12.38 MPa, 变形位移 w_b 近似为 0 mm。对比 4.1 节中没有添加桁条的情

况,可以看出桁条在一定程度上提高了蒙皮的抗冲击性能,抑制了蒙皮的变形与破坏。

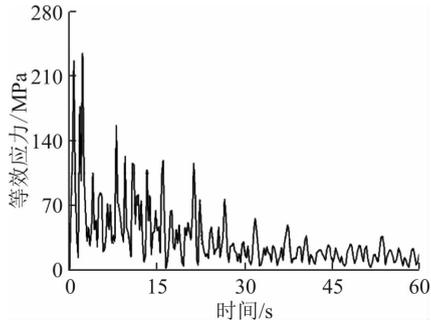


图 15 撞击中心单元处的等效应力时程曲线

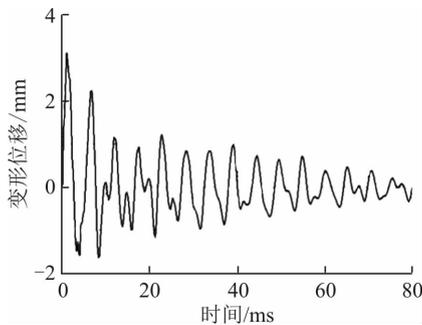


图 16 撞击中心节点的位移时程曲线

4.6 程序计算精确度验证

为验证程序计算的精确度,根据 C. A. Calder 和 W. Goldsmith 进行的弹丸冲击铝合金薄板试验^[21],选取其中一组试验进行程序仿真计算。试验内容为 1 个直径为 12.7 mm 的钢球以 60.7 m/s 的速度垂直撞击 1 块圆形铝合金薄板,薄板的直径为 362 mm,厚度为 1.27 mm,材质为 2024-O 铝合金,其中 2024 系列铝合金的机械性能和物理性能相当于 LY12-CZ。C. A Calder 和 W. Goldsmith 在试验中记录了薄板中心在 21 μs 、79 μs 、136 μs 、193 μs 、251 μs 、431 μs 时刻的变形位移。根据试验内容,建立仿真模型,薄板中心变形位移的试验值和计算值见表 1。从表 1 可以看出,计算值与试验值符合较好,最大相对误差为 5.5%,因此 LS-DYNA 程序在模拟铝合金薄板受低速冲击问题上具有较高的计算精确度。

表 1 试验值与计算值对比表

时间/ μs	验值/mm	计算值/mm	相对误差/%
21	1.27	1.20	5.5
79	4.33	4.16	3.9
136	6.16	6.28	1.9
193	7.86	7.52	4.3
251	8.71	8.27	5.1
431	9.75	9.32	4.4

5 结论

本文利用数值仿真方法,开展了火箭蒙皮在岩石颗粒撞击下发生变形破坏的仿真研究。分析计算结果,得到以下结论:

1) 火箭蒙皮在岩石颗粒撞击下,主要发生弹性变形,撞击区域局部发生塑性变形。蒙皮的变形形态为隆起和盘形凹陷,且由于岩石颗粒的撞击速度较小,相应产生的永久塑性凹陷也较小,凹陷深度为 1~5 mm 不等。

2) 在撞击过程中,蒙皮上的等效应力和变形位移与岩石颗粒的撞击速度和体积近似成正比关系。此外,长方体岩石颗粒对蒙皮造成的变形破坏要小于球体岩石颗粒。

3) 桁条结构可以提高蒙皮的局部刚度,在蒙皮遭受岩石颗粒撞击时可以一定程度上抑制蒙皮的变形与破坏。因此在设计蒙皮时,可采用高强度轻质材料及合理的桁条结构,以此提高蒙皮的整体抗冲击性能。

参考文献(References):

- [1] 王飞,杨树兴,徐勇,等. W型地下井发射环境数值模拟与分析[J]. 固体火箭技术,2007,30(6):466-469.
WANG F, YANG S X, XU Y, et al. Numerical Simulation and Analysis on W-Type Silo Launching Environment[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007,30(6):466-469. (in Chinese)
- [2] 姜毅,史少岩,牛钰森,等. 发射气体动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015.
JIANG Y, SHI S Y, NIU Y S, et al. Jet Gas Dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015. (in Chinese)
- [3] 田济民. 导弹及固体火箭的外防护材料[J]. 固体火箭技术,1998,21(3):55-59,65.
TIAN J M. External Protection for Missile and Solid Rocket[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1998, 21(3):55-59,65. (in Chinese)
- [4] 朱文海. 导弹弹体结构材料的分析研究[J]. 系统工程与电子技术,1992,14(11):73-80.
ZHU W H. A Research of Structural Material for Missile Body[J]. Systems Engineering and Electronics, 1992,14(11):73-80. (in Chinese)
- [5] LEVY N, GOLDSMITH W. Normal Impact and Perforation of Thin Plates by Hemispherically-Tipped Projectiles-I Analytical Considerations[J]. International Journal of Impact Engineering, 1984,2(3):209-229.
- [6] LEVY N, GOLDSMITH W. Normal Impact and Per-

- foration of Thin Plates by Hemispherically-Tipped Projectiles-II Experimental Results [J]. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(4): 299-324.
- [7] 陈长海,朱锡,侯海量,等. 球头弹丸低速冲击下薄板大变形的理论计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 88-93.
CHEN C H, ZHU X, HOU H L, et al. Theoretical Calculation of Large Deformation for Thin Plate Impacted by Hemispherical-Nosed Projectile with Low-velocity[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 40(12): 88-93. (in Chinese)
- [8] 展全伟,郭伟国,李玉龙,等. 飞机加强蒙皮在 12.7 mm 弹丸撞击下的变形与破坏[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 228-233.
ZHAN Q W, GUO W G, LI Y L, et al. Study on Damage of A Reinforced Aircraft Skin Subjected to 12.7 mm Projectile Impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 228-233. (in Chinese)
- [9] 黄晶,许希武. 飞机壁板结构击穿的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(2): 17-22.
HUANG J, XU X W. Numerical Simulation for Perforation of Aircraft Thin Plate Structures[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(2): 17-22. (in Chinese)
- [10] BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures [M]. Hoboken USA: John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [11] 栾兰. 汽车碰撞与前保险杠缓冲装置性能研究[D]. 沈阳:东北大学, 2011.
LUAN L. Study on Automobile Collision Simulation and Endergonic Device Property of Front Bumper[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)
- [12] HALLQUIST J O. LS-DYNA Theoretical Manual[Z]. Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [13] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1992.
MA X Q. Impact Dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [14] 沈晖航,谢建,李良,等. 井式火箭发射场井口岩石颗粒运动规律研究[J/OL]. 计算机仿真: 1-6 [2018-03-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20180108.0732.016.html>.
- SHEN H H, XIE J, LI L, et al. The Characteristic of Rock Particle Movement on Launching Site During Rocket Launching [J/OL]. Computer Simulation: 1-6 [2018-03-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20180108.0732.016.html>. (in Chinese)
- [15] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1984.
QIAN W C. Mechanics of Perforation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [16] 靳爱国,朱宝银. 载人航天产品材料的选用及制造工艺[J]. 载人航天, 2004(2): 5-10, 21.
JIN A G, ZHU B Y. Selection and Manugacturing Technology of Manned Space Products [J]. Manned Spaceflight, 2004(2): 5-10, 21. (in Chinese)
- [17] 陈景威,随欣,张乃夫,等. 载人航天器下行细菌对 LY12 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 载人航天, 2017, 23(2): 252-257, 284.
CHEN J W, SUI X, ZHANG N F, et al. Corrosion Behavior of LY12 Aluminum Alloy Influenced by Bacteria Isolated from Manned Spacecraft [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(2): 252-257, 284. (in Chinese)
- [18] 周平,张建华,侯日立. 射弹侵彻飞机 LY-12CZ 板材的实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, 5(1): 27-30.
ZHOU P, ZHAN J H, HOU R L. Study of Battle-Damage Prediction Mode of Aircraft Structure Material LY-12 CZ with Projectile [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2004, 5(1): 27-30. (in Chinese)
- [19] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
XU Z Y. Rock Mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1993. (in Chinese)
- [20] 叶顺坚,梁莹,石正波,等. 自动钻铆技术在某运载火箭助推模块箱间段研制中的应用[J]. 上海航天, 2014, 31(S1): 15-19.
YE S J, LIANG Y, SHI Z B, et al. Application of Automatic Drilling and Riveting Technology in Inter-Tank Section of Some Rocket Booster [J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(S1): 15-19. (in Chinese)
- [21] CALDER C A, GOLDSMITH W. Plastic Deformation and Perforation of Thin Plates Resulting from Projectile Impact [J]. International Journal of Solids & Structures, 1971, 7(7): 863-881.

(编辑:姚树峰)