文章编号：1000-5773(2012)02-0177-08

超高速撞击充气压力容器二次碎片减速运动建模研究*

盖芳芳[1]，庞宝君[2]，管公顺[2]

(1. 黑龙江科技学院理学院，黑龙江哈尔滨 150027；
2. 哈尔滨工业大学高速撞击研究中心，黑龙江哈尔滨 150080)

摘要：针对空间碎片超高速撞击充气压力容器的二次碎片减速运动问题，首先根据弹丸撞击容器前壁后的破碎程度，将二次碎片分为弹丸未破碎、未完全破碎及完全破碎 3 种模式，分别建立了二次碎片未受气体扰动时的初始模型；然后采用理论分析手段，应用流体动力学、气-固两相流理论，对弹丸不同破碎模式下的二次碎片在容器内的运动过程进行分析，建立了二次碎片减速运动的计算模型，通过与数值模拟结果的比较，验证了计算模型的有效性。

关键词：空间碎片；超高速撞击；压力容器；二次碎片
中图分类号：O347；V423. 42 **文献标识码**：A

1 引 言

航天器上的各种压力容器是航天器用于储存液体或含能高压气体的部件，是受空间碎片/微流星体威胁最大的关键部件之一。压力容器类部件受到空间碎片/微流星体的超高速撞击将产生高速的二次碎片，二次碎片在气体中将发生减速运动。在不同的撞击条件下，弹丸撞击后的破碎程度不同，即产生的二次碎片特性不同，从而导致二次碎片在容器内的运动特性不同。在一定条件下，这些二次碎片对容器后壁的撞击有可能导致容器发生灾难性的破坏，致使航天器过早失效，因此有必要对不同撞击条件下产生的二次碎片在容器内的运动特性进行研究。然而，对于这一物理过程，由于理论研究难度较大，研究者往往仅采用实验或数值模拟方法定性地对二次碎片的减速运动现象进行分析，缺乏定量研究[1-9]，并且尚未讨论弹丸破碎程度对二次碎片在容器内运动特性的影响。

在不同撞击条件下，材料可能发生碎化、液化甚至汽化现象，本研究只限于对在撞击过程中材料发生碎化时产生的二次碎片在容器内的减速运动过程进行研究。二次碎片在气体介质中运动时可能发生减速、烧蚀等现象，为了简化问题，在二次碎片与气体的相互作用过程中，本研究仅考虑气体介质对二次碎片的减速作用，采用理论分析手段，对具有不同特性的二次碎片在容器内的运动过程进行分析，建立二次碎片减速运动的计算模型，并通过与数值模拟结果的比较，验证计算模型的有效性。

2 弹丸破碎状态分析

在本文研究范围内，假设弹丸撞击容器前壁产生的二次碎片特性不受容器壁曲率的影响，所形成的初始二次碎片，即未受气体介质影响时的二次碎片与弹丸撞击薄板时的情况相同。根据已有的实验结果[10-11]，在不同撞击条件下可将产生的二次碎片分为 3 种模式，分别为弹丸未破碎模式、未完全破碎模

* **收稿日期**：2010-08-11；**修回日期**：2011-03-28
作者简介：盖芳芳(1981—)，女，博士，讲师，主要从事空间碎片超高速撞击压力容器破损研究.
E-mail：fang19811119@yahoo.com.cn

式及完全破碎模式。

确定二次碎片 3 种模式的临界条件。文献[10]根据撞击实验结果给出了弹丸发生破碎时临界撞击速度 v_{ppf} 的表达式

$$v_{ppf}=\begin{cases}0.286\left(\dfrac{t}{d_p}\right)^{-0.365}c_p, & 0.0315\leqslant\dfrac{t}{d_p}\leqslant 0.169\\ 0.548c_p, & \dfrac{t}{d_p}>0.169\end{cases}\tag{1}$$

式中：c_p 为弹丸材料的声速(m/s)；t 为防护屏厚度(m)，在本文中 $t=t_v$(压力容器壁厚)；d_p 为弹丸直径(m)。

当弹丸发生破碎以后，形成的二次碎片可分为 3 个部分[11]：反溅碎片、外泡及内部结构，如图 1 所示。内部结构是二次碎片的主体部分，二次碎片内部结构又可分为 3 个部分，分别为前部、中部、后部。中部称为二次碎片的中心元素部分，二次碎片内部结构的较大碎片及大部分质量都集中在中心元素中[11]。因此，本研究只考虑中心元素与气体介质的相互作用过程，且下文中出现的二次碎片均指二次碎片的中心元素部分。

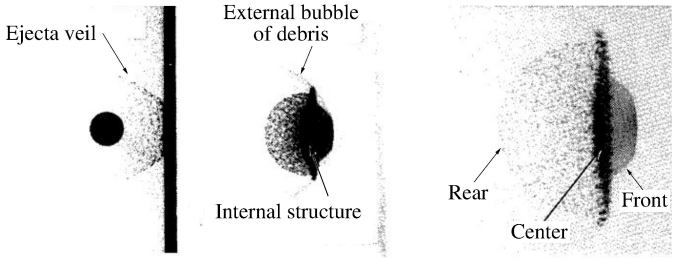


图 1 二次碎片结构[11]

Fig. 1 Structure of the secondary debris[11]

根据 Schäfer[12] 的研究结果，二次碎片的中心大碎片尺寸 d_F 可由下式确定

$$\frac{d_F}{d_p}\left(\frac{t_v}{d_p},v_p\right)=\left(A_0+A_1e^{(-t_v/d_p)(1/B_1)}+A_2e^{(-t_v/d_p)(1/B_2)}\right)\cdot v_p^{-2.24}\tag{2}$$

式中：d_F 为中心大碎片的直径(m)；v_p 为弹丸撞击速度(km/s)；A_0、A_1、A_2、B_1、B_2 为常数，$A_0=7.43781$，$A_1=408.63105$，$A_2=35.40239$，$B_1=0.00631$，$B_2=0.05159$。

二次碎片中其它小碎片的平均尺寸 d_a 可采用 Grady 破碎模型[13]进行估算

$$d_a=\left(1.2\frac{\sigma_{0.2}}{\rho_p\dot{\varepsilon}^2}\right)^{1/2}\tag{3}$$

式中：d_a 为小碎片的平均尺寸(m)；ρ_p 为弹丸材料密度(kg/m^3)；$\dot{\varepsilon}$ 为平均应变率(s^{-1})；$\sigma_{0.2}$ 为屈服极限(Pa)。

本文中认为，当 d_F 与二次碎片中其它小碎片的平均尺寸 d_a 相同时，弹丸发生完全破碎，即有

$$d_a=\left(A_0+A_1e^{(-t_v/d_p)(1/B_1)}+A_2e^{(-t_v/d_p)(1/B_2)}\right)\cdot v_p^{-2.24}\cdot d_p\tag{4}$$

将(4)式进行整理，可以得出当弹丸撞击速度 v_p 满足

$$v_p=\left[\left(A_0+A_1e^{(-t_v/d_p)(1/B_1)}+A_2e^{-(t_v/d_p)(1/B_2)}\right)\frac{d_p}{d_a}\right]^{1/2.24}\tag{5}$$

时，弹丸将发生完全破碎，定义此时弹丸的撞击速度为弹丸发生完全破碎的临界撞击速度，用 v_{pc} 表示。

综上所述，当 $v_p<v_{ppf}$ 时，弹丸未发生破碎；当 $v_{ppf}<v_p<v_{pc}$ 时，弹丸发生破碎，且二次碎片中包含一个中心大碎片，即弹丸未发生完全破碎；当 $v_p>v_{pc}$ 时，弹丸发生完全破碎。

3 二次碎片减速运动计算模型的建立

3.1 弹丸未破碎模式

在弹丸未破碎时形成的二次碎片由一个被压扁的球体构成，为了简化，将二次碎片假设为一个位于撞击轴上的刚性球体，其运动方向与弹丸的撞击轴方向相同。为了确定刚性球体半径，引入“当量球”概念[14]，即与非球体具有相同阻力的球体。在流体力学中，考虑颗粒阻力时通常采用基于体积的当量球，其当量球半径可表示为

$$r_{\mathrm{pv}}=\left(\frac{3V_{\mathrm{pv}}}{4\pi}\right)^{1/3} \tag{6}$$

式中:V_{pv}为二次碎片总体积(m^3)。

$$V_{\mathrm{pv}}=\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_{\mathrm{p}}}{2}\right)^3+\pi\left(\frac{D_{\mathrm{hole}}}{2}\right)^2 t_{\mathrm{v}} \tag{7}$$

式中:D_{hole}为穿孔直径(m),可应用常用的穿孔经验公式[15]进行估算

$$D_{\mathrm{hole}}=3.4d_{\mathrm{p}}(t_{\mathrm{v}}/d_{\mathrm{p}})^{1/3}(v_{\mathrm{p}}/c_{\mathrm{v}})^{1/3}(1.0-0.030\ 8\rho_{\mathrm{v}}/\rho_{\mathrm{p}}) \tag{8}$$

式中:c_{v}为容器材料声速(m/s);ρ_{v}为容器材料的密度($\mathrm{kg/m^3}$)。

容器壁上被冲塞的质量 m_{v} 可表示为

$$m_{\mathrm{v}}=\frac{1}{4}\rho_{\mathrm{v}}\pi D_{\mathrm{hole}}^2 t_{\mathrm{v}} \tag{9}$$

假设弹丸的动能全部转化为撞击后产生的二次碎片的轴向动能,则撞击后产生的二次碎片的初始轴向速度 v_{pv}可表示为

$$v_{\mathrm{pv}}=\sqrt{\frac{m_{\mathrm{p}}v_{\mathrm{p}}^2}{m_{\mathrm{p}}+m_{\mathrm{v}}}} \tag{10}$$

在气体介质阻力作用下,刚性球体发生减速运动,其运动速度与时间有关,用 $v_{\mathrm{pv}}(t)$表示。将刚性球体在高压气体中的运动简化为气体对静止球体的绕流运动,即气体的运动速度等于刚性球体的运动速度。若考虑流体粘性,习惯上把阻力 F_{d} 的表达式写成[14]

$$F_{\mathrm{d}}(t)=C_{\mathrm{d}}\rho_{\mathrm{mg}}\mid v_{\infty}-v_{\mathrm{s}}\mid(v_{\infty}-v_{\mathrm{s}})S_{\mathrm{d}} \tag{11}$$

式中:v_{∞}、ρ_{mg}分别为气体的速度(m/s)和密度($\mathrm{kg/m^3}$);v_{s} 为球体速度(m/s),在本文中,$v_{\mathrm{s}}=0$;S_{d}为球体迎风面积,$S_{\mathrm{d}}=\pi r_{\mathrm{pv}}^2$($\mathrm{m^2}$);$C_{\mathrm{d}}$为阻力系数。

若气体运动速度为超声速,球体的阻力系数可以应用文献[16]中关于气体冲击波绕流的阻力系数

$$C_{\mathrm{d}}(Re,Ma_{12})=\left[1+\exp\left(-\frac{0.43}{Ma_{12}^{4.67}}\right)\right]\left(0.38+\frac{24}{Re}+\frac{4}{\sqrt{Re}}\right) \tag{12}$$

式中:Re 为球体的雷诺数,$Re=\dfrac{2r_{\mathrm{pv}}\rho_{\mathrm{mg}}\mid v_{\infty}-v_{\mathrm{s}}\mid}{\mu}$;$Ma_{12}$为马赫数,$Ma_{12}=\dfrac{\mid v_{\infty}-v_{\mathrm{s}}\mid}{c_{\mathrm{g}}}$;$c_{\mathrm{g}}$ 为气体中的声速,$c_{\mathrm{g}}=\sqrt{\gamma p_{\mathrm{g}}/\rho_{\mathrm{mg}}}$(m/s);$\mu$ 为流体动力粘性系数,$\mu=0.118\ 46\mu_{\mathrm{g}}^{0.5}T_{\mathrm{g}}^{0.67}$($\mu\mathrm{Pa\cdot s}$);$\mu_{\mathrm{g}}$、$T_{\mathrm{g}}$ 分别为气体的相对分子量和温度(K)。

将(6)式、(12)式代入(11)式,则可以求得在不同时刻作用在刚性球体表面的阻力 $F_{\mathrm{d}}(t)$。假设刚性球体在气体介质中的运动符合牛顿第二定律,则刚性球体在气体介质中的运动可表示为如下形式

$$\begin{cases}m_{\mathrm{pv}}a(t)=F_{\mathrm{d}}(t)\\ v_{\mathrm{pv}}(t)=v_{\mathrm{pv}}-\displaystyle\int_0^t a(t)\mathrm{d}t\\ S_{\mathrm{pv}}(t)=\displaystyle\int_0^t v_{\mathrm{pv}}(t)\mathrm{d}t\end{cases} \tag{13}$$

式中:$a(t)$为 t 时刻刚性球体的加速度($\mathrm{m/s^2}$);$v_{\mathrm{pv}}(t)$为 t 时刻刚性球体的速度(m/s);$S_{\mathrm{pv}}(t)$为 t 时刻刚性球体的位移(m)。

应用迭代方法对公式(13)进行求解,其迭代格式如下

$$\begin{cases}m_{\mathrm{pv}}a(t_{i+1})=F_{\mathrm{d}}(t_i)\\ v_{\mathrm{pv}}(t_{i+1})=v_{\mathrm{pv}}-\displaystyle\sum_0^{i+1}a(t_i)\Delta t\\ S_{\mathrm{pv}}(t_{i+1})=\displaystyle\sum_0^{i+1}v_{\mathrm{pv}}(t_i)\Delta t\end{cases} \tag{14}$$

式中:Δt 为时间步长,$t_{i+1}=t_i+\Delta t$,$i=1,2,3,\cdots$。

3.2 弹丸完全破碎模式

为了对弹丸完全破碎模式下二次碎片在气体中的运动进行分析，需要对撞击后产生的初始二次碎片进行建模。二次碎片在气体介质中运动的初始阶段，由于运动速度较大，气体介质对其运动速度没有显著影响，因此在对弹丸完全破碎模式初始二次碎片进行建模时，将未受气体介质显著影响的二次碎片状态定义为二次碎片的初始状态。

由于二次碎片内部的较大碎片及大部分质量都集中在中心元素中[11]，因此在建立弹丸完全破碎模式初始二次碎片模型时，作以下假设：

(1) 只考虑二次碎片的中心元素部分，中心元素仅由弹丸材料组成，并且弹丸的所有材料都集中在中心元素中；

(2) 中心元素中的所有碎片均为直径相同的球体。

在以上假设的基础上，建立了弹丸完全破碎模式初始二次碎片模型，如图 2 所示。初始二次碎片模型由一个圆盘构成，圆盘半径为 r_c，厚度为 t_c；圆盘中包含着一定数目直径相同的小球体，球体直径为 d_a，并且小球体在圆盘中密实排列。

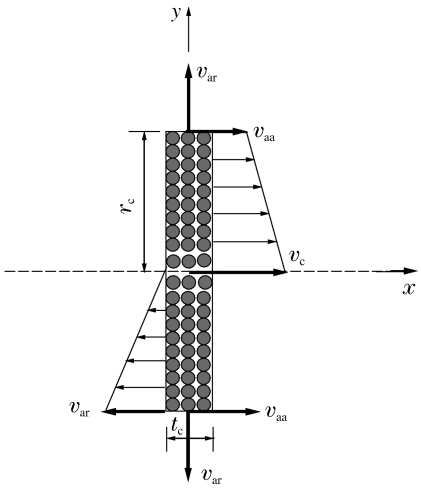


图 2 弹丸完全破碎模式二次碎片初始模型

Fig. 2 Initial model of the secondary debris in the case that the projectile is completely fragmentated

首先，确定圆盘的半径 r_c 及厚度 t_c。由于假设弹丸的质量全部集中在二次碎片的中心元素中，则中心元素中的碎片总数 n 可由下式计算得到

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_p}{2}\right)^3 = n \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_a}{2}\right)^3 \tag{15}$$

Schonberg 等人[17]根据实验结果给出了关于二次碎片扩散面积 A_{load} 的经验方程

$$\frac{A_{load}}{A_p} = 39.91\left(\frac{v_0}{c_v}\right)^{0.828}\left(\frac{t_v}{d_p}\right)^{0.294}\left(\frac{S_c}{d_p}\right)^{0.814}\cos^{0.127}\theta \tag{16}$$

式中：θ 为撞击角(°)；A_p 为弹丸的横截面积(m^2)；S_c 为二次碎片以撞击点为始点的位移(m)。

则由(16)式可求得初始二次碎片的扩展半径，即圆盘的半径 r_c

$$r_c = \left(\frac{A_{load}}{\pi}\right)^{1/2} \tag{17}$$

由于假设小碎片在圆盘中密实排列，则圆盘的厚度 t_c 可由下式确定

$$t_c = \frac{4n}{3} \cdot \frac{d_a^3}{r_c^2} \tag{18}$$

然后，确定圆盘的速度。文献[10]对二次碎片的速度特性进行了研究，研究结果表明，二次碎片中心元素的径向最外缘边界上的轴向速度最小，为 v_{aa}，径向速度最大，为 v_{ar}；中心元素在弹丸撞击轴方向的轴向速度最大，为 v_c，径向速度最小，为零，v_{aa}、v_c、v_{ar} 具体计算方法可见文献[10]。

假设圆盘的轴向速度及径向速度均沿着圆盘的半径方向线性分布，如图 2 所示，且沿着圆盘的厚度方向速度不变。那么弹丸完全破碎模式下二次碎片初始模型的 x 方向速度 v_{ax} 及 y 方向速度 v_{ary} 可表示为如下形式

$$\begin{cases} v_{ax} = v_c - \dfrac{y}{r_c} \cdot (v_c - v_{aa}) & 0 \leqslant y \leqslant r_c \\ v_{ary} = \dfrac{y}{r_c} \cdot v_{ar} & 0 \leqslant y \leqslant r_c \end{cases} \tag{19}$$

基于建立的二次碎片初始模型，可将二次碎片在气体介质中的减速运动问题简化为二维气-固两相流动问题进行求解，坐标系的选取如图 2 所示。二维气-固两相流流动的基本方程可表示为如下形式[14]

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\rho_g}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho_g u_g)}{\partial x}+\dfrac{\partial(\rho_g u_g)}{\partial y}=0\\ \dfrac{\partial\rho_s}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho_s u_s)}{\partial x}+\dfrac{\partial(\rho_s u_s)}{\partial y}=0\end{cases}\tag{20}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho_g u_g)}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}(p_g+\rho_g u_g^2)+\dfrac{\partial}{\partial y}(\rho_g u_g w_g)+\rho_s\dfrac{F_{ax}}{m_s}=0\\ \dfrac{\partial(\rho_g w_g)}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g w_g)+\dfrac{\partial}{\partial y}(p_g+\rho_g w_g^2)+\rho_s\dfrac{F_{ay}}{m_s}=0\\ \dfrac{\partial(\rho_s u_s)}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}(\rho_s u_s^2)+\dfrac{\partial}{\partial y}(\rho_s u_s w_s)-\rho_s\dfrac{F_{ax}}{m_s}=0\\ \dfrac{\partial(\rho_s w_s)}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}(\rho_s u_s w_s)+\dfrac{\partial}{\partial y}(\rho_s w_s^2)-\rho_s\dfrac{F_{ay}}{m_s}=0\end{cases}\tag{21}$$

$$\frac{\partial(\rho_g e_g)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{p_g}{\rho_g}+e_g\right)\rho_g u_g\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{p_g}{\rho_g}+e_g\right)\rho_g w_g\right]+\rho_s\frac{F_{ax}}{m_s}u_s+\rho_s\frac{F_{ax}}{m_s}w_s=0\tag{22}$$

式中:ρ_g 为气相分密度(kg/m^3),在计算中,忽略了颗粒相的体积,即 $\rho_g=\rho_{mg}$;ρ_s 为颗粒相分密度,$\rho_s=\varphi_s\rho_{ms}$(kg/m^3);$u_g$、$w_g$ 分别为气相粒子在 x 方向、y 方向的速度(m/s);u_s、w_s 分别为颗粒相在 x 方向、y 方向的速度(m/s);ρ_{mg}、ρ_{ms}分别为气相密度(kg/m^3)和颗粒密度(kg/m^3);p_g 为气相压力(Pa);m_s 为颗粒的质量(kg);φ_s 为颗粒相的体积浓度;e_g 为气相单位质量的能量,$e_g=c_v T_g+(u_g^2+w_g^2)/2$(J/kg);$F_{ax}$ 为颗粒在 x 方向的阻力,$F_{ax}=C_a\rho_g|u_g-u_s|(u_g-u_s)S_a$(N);$F_{ay}$为颗粒在 y 方向阻力,$F_{ay}=C_a\rho_g|w_g-w_s|(w_g-w_s)S_a$(N);$C_a$ 为颗粒阻力系数;S_a 为颗粒的迎风面积,$S_a=\pi(d_a/2)^2$(m^2)。其中,颗粒的初始速度 u_s、w_s 由(19)式确定,气相初始速度 $u_g=w_g=0$,气相初始压力 p_g 及密度 ρ_{mg}等于容器内充气体介质的压力 p_0 及密度 ρ_0。

对二维气-固两相流问题进行求解时,可应用计算流体动力学中的有限差分方法求其数值解。本研究采用效率较高、且较简单的 Mac-Cormack 二步显式差分格式[18]进行求解,具体计算方法见文献[18]。

3.3　弹丸未完全破碎模式

在弹丸未破碎模式及完全破碎模式二次碎片初始模型的基础上,根据弹丸未完全破碎时二次碎片的形态特点,建立弹丸未完全破碎模式二次碎片初始模型。

模型由一个大球体与一个圆盘构成。大球体位于模型的最前端,直径为 d_F,速度为 v_c;圆盘半径为 r_c,厚度为 t_c,圆盘由一定数量的直径相同的小球体构成,小球体直径为 d_a,圆盘的轴向速度及径向速度均沿圆盘的半径方向线性分布,且沿着圆盘的厚度方向速度不变,如图 3 所示。

确定圆盘的半径 r_c 及厚度 t_c。r_c 可由(19)式确定。在弹丸未完全破碎模式,二次碎片中的小碎片总数可根据下式计算得到

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_p}{2}\right)^3-\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_F}{2}\right)^3=n\cdot\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_a}{2}\right)^3\tag{23}$$

式中:n 为二次碎片中小碎片的数目,则二次碎片中的碎片总数为 $N=1+n$

$$N=1+\left[\left(\frac{d_p}{d_a}\right)^3-\left(\frac{d_F}{d_a}\right)^3\right]\tag{24}$$

将 n 代入(18)式中,可得到弹丸未完全破碎模式二次碎片的厚度 t_c。

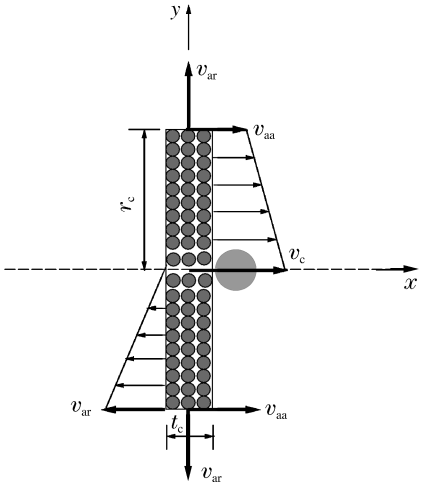


图 3　弹丸未完全破碎模式二次碎片初始模型

Fig. 3　Initial model of the secondary debris in the case that the projectile is not entirely fragmentated

弹丸未完全破碎模式二次碎片初始模型中圆盘的速度分布与弹丸完全破碎模式二次碎片初始模型中圆盘的速度分布

相同,见公式(19)。在弹丸未完全破碎模式情况下,对二次碎片在气体介质中的运动进行分析时,可分为两步进行:(1) 中心大碎片的减速运动分析,(2) 二次碎片中其它小碎片的减速运动分析。最终建立弹丸未完全破碎模式二次碎片减速运动计算模型。对中心大碎片的减速运动过程进行分析的方法与弹丸未破碎模式二次碎片的减速运动过程进行分析的方法相同。对圆盘的减速运动过程进行分析时,可应用气-固两相流理论对小碎片在气体介质中的运动进行分析,分析方法与弹丸完全破碎模式二次碎片减速运动的分析方法相同。需要注意的是,本研究建立的弹丸未完全破碎模式二次碎片减速运动计算模型,当中心大碎片尺寸是小碎片尺寸数倍时才适用;当中心大碎片的尺寸与小碎片的尺寸相差不大时,二次碎片的减速运动可采用弹丸完全破碎模式下二次碎片减速运动计算模型进行分析。

4 二次碎片减速运动计算模型的有效性验证

为了验证二次碎片减速运动计算模型的有效性,应用文献[19]针对二次碎片减速运动建立的数值模型,对 3 个数值模拟工况进行计算。文献[19]所述的数值模型为铝制球形弹丸撞击圆柱形充气压力容器封头中心,内充气体为氮气,容器材料为 Al5754。3 个数值模拟工况分别为:(1) 在弹丸未破碎模式情况下,弹丸直径为 6.0 mm,撞击速度为 2.0 km/s,压力容器壁厚为1.0 mm,压力为 2.0 MPa;(2) 在弹丸未完全破碎模式情况下,弹丸直径为 8.0 mm,撞击速度为 4.0 km/s,压力容器壁厚为 1.0 mm,压力为 2.0 MPa;(3) 在弹丸完全破碎模式情况下,弹丸直径为 5.0 mm,撞击速度为 5.2 km/s,压力容器壁厚为 1.5 mm,压力为 1.05 MPa。

在不同的弹丸破碎模式下,二次碎片在气体介质中运动速度的计算结果与数值模拟结果的比较分别如图 4～图 6 所示。由图 4～图 6 可见,模型的计算结果与数值模拟结果吻合较好,验证了本研究建立的二次碎片减速运动计算模型的有效性。

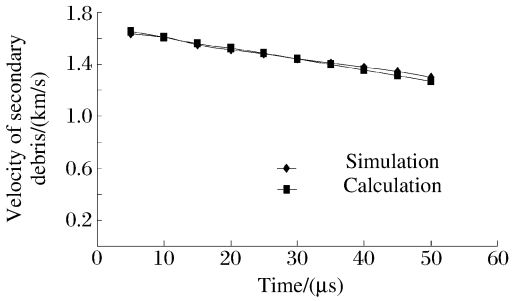
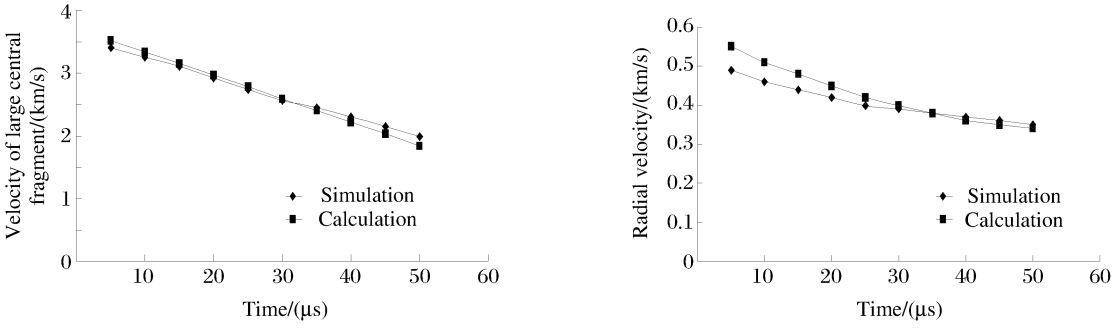


图 4 弹丸未破碎模式下二次碎片运动速度计算结果与数值模拟结果的比较

Fig. 4 Comparison of calculated and numerical results of secondary debris velocities in the case that the projectile is not fragmentated

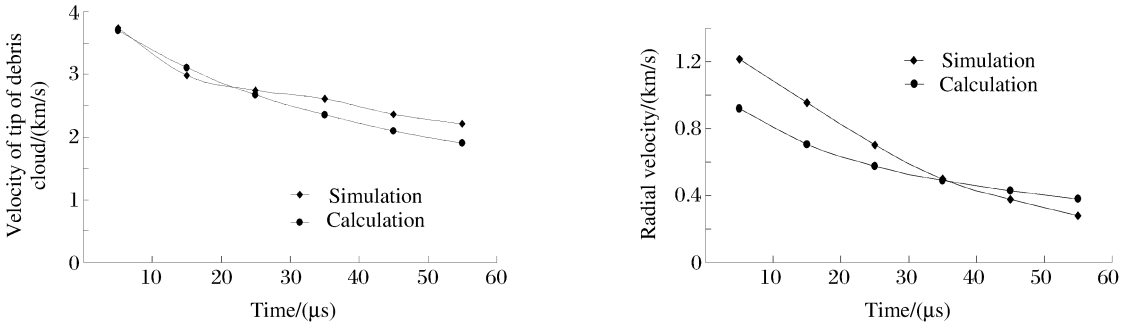
在二次碎片减速运动计算模型建立过程中,作了一些假设,比如将二次碎片简化为刚性的小球体等,并且只考虑气体介质对二次碎片的减速作用,未考虑气体介质对二次碎片的其它作用,如烧蚀、摩擦等,这些假设均可能导致计算模型的计算结果与数值模拟结果有所偏差;另一方面,数值模拟结果与实验结果也存在一定的偏差,因此仍需要进行大量的超高速撞击实验,对计算模型进行进一步的验证及改进。虽然计算模型有一定的适用范围,但分析方法值得借鉴。



(a) Velocity of the large central fragment (b) Radial velocity of the secondary debris

图 5 弹丸未完全破碎模式下二次碎片减速运动计算模型的计算结果与模拟结果的比较

Fig. 5 Comparison of calculated and numerical results of secondary debris velocities in the case that the projectile is not entirely fragmentated



(a) Velocity of tip particle of the secondary debris　　(b) Radial velocity of the secondary debris

图 6　弹丸完全破碎模式下二次碎片减速运动计算模型的计算结果与模拟结果的比较

Fig. 6　Comparison of calculated and numerical results of secondary debris velocities in the case that the the projectile is entirely fragmentated

5　结　论

在考虑气体介质对二次碎片仅有减速作用的基础上,采用理论分析手段,对弹丸不同破碎模式下二次碎片减速运动的过程进行了分析,主要得到以下几点结论。

(1) 基于二次碎片仅包含固体小碎片的假设,建立了弹丸在不同破碎模式下初始二次碎片的模型。在弹丸未破碎模式,将二次碎片等效为球体;在弹丸未完全破碎模式,二次碎片由球形的中心大碎片及一个由等直径小球体构成的圆盘组成;在弹丸的完全破碎模式,二次碎片为一个由等直径小球体构成的圆盘。

(2) 建立了弹丸在不同破碎模式下二次碎片减速运动的计算模型,并通过与数值模拟结果的比较,验证了计算模型的有效性。弹丸未破碎模式的二次碎片及未完全破碎模式的中心大碎片的运动问题,可简化为对冲击波球体绕流问题的求解;未完全破碎模式二次碎片中的小碎片及完全破碎模式的二次碎片在气体介质中的运动问题,可简化为对二维气-固两相流运动问题的求解。

由于计算模型中只考虑了气体介质对二次碎片的减速作用,未考虑气体介质对二次碎片的其它作用,如烧蚀、摩擦等,因此该模型要求容器内的气体介质必须是惰性气体或化学性质比较稳定的气体,如氦气、氮气等。

References:

[1] Whitney J P. Hypervelocity impact tests of shielded and unshielded pressure vessels, JSC 32294 [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 1993.

[2] Friesen L J. Hypervelocity impact tests of shielded and unshielded pressure vessels, part Ⅱ, JSC 27081 [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 1995.

[3] Lambert M. Hypervelocity impact testing impacts pressure vessels, 10556/93 YME/ML/2745 [R]. France: ESTEC, Second Extension to Contract, 1997.

[4] Hiermaier S, Schäfer F. Hypervelocity impact fragment clouds in high pressure gas numerical and experimental investigtions [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23: 391-400.

[5] Schäfer F. Hypervelocity impact testing impacts on pressure vessels final report, EMI report I-27/01 [R]. Germany: Ernst-Mach-Institut, 2001.

[6] Christiansen E L, Kerr J H. Debris cloud ablation in gas-filled pressure vessels [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20: 173-184.

[7] Telitchev I Y, Eskin D. Engineering model for simulation of debris cloud propagation inside gas-filled pressure vessels [J]. Int J Impact Eng, 2003, 29: 703-712.

[8] Zhang W, Pang B J, Zhou J X. Experimental investigation of velocity impact on gas filled pressure vessels [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 353-358. (in Chinese)
张 伟, 庞宝君, 邹经湘. 充气压力容器超高速撞击实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 353-358.

[9] Zhang W, Guan G S, Ha Y, et al. Experimental investigation of high velocity projectile impact damage on pressure vessels [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(2): 229-235. (in Chinese)
张 伟, 管公顺, 哈 跃, 等. 弹丸超高速撞击压力容器损伤实验研究 [J]. 实验力学, 2004, 19(2): 229-235.

[10] Chi R Q. Research and modeling of debris cloud produced by hypervelocity impact of projectile with thin plate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 47-91. (in Chinese)
迟润强. 弹丸超高速撞击薄板碎片云建模研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 47-91.

[11] Piekutowski A J. Formation and description of debris clouds produced by hypervelocity impact [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 1996.

[12] Schäfer F. An engineering fragmentation model for the impact of spherical projectiles on thin metallic plates [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33: 1-12.

[13] Kipp M E, Grady D E, Swegle J W. Numerical and experimental studies of high impact fragmentation [J]. Int J Impact Eng, 1993, 16: 427-438.

[14] Fang D Y. Two-Phase Flow Dynamics [M]. Changsha: Defense Science University Press, 1988: 10-326. (in Chinese)
方丁酉. 两相流动力学 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1988: 10-326.

[15] Christiansen E L. Design and perforation equation for advanced meteoroid and debris shields [J]. Int J Impact Eng, 1992, 14: 145-156.

[16] Carlson D J, Hoglund R F. Particle drag and heat transfer in rocket nozzles [J]. AIAA, 1970, 2(11): 1980-1984.

[17] Schonberg W P, Bean A J, Darzi K. Hypervelocity impact physics [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 1991.

[18] Zhang D M. Computational Fluid Dynamics [M]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1991: 82-144. (in Chinese)
张涤明. 计算流体力学 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1991: 82-144.

[19] Gai F F, Pang B J, Guang G S. Numerical investigation on the characteristics of debris clouds produced by hypervelocity impact on pressure vessels [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(3): 223-228. (in Chinese)
盖芳芳, 庞宝君, 管公顺. 空间碎片超高速撞击压力容器碎片云特性数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(3): 223-228.

Model for the Deceleration of Secondary Debris Produced by Hypervelocity Impact on Pressure Vessels

GAI Fang-Fang[1], PANG Bao-Jun[2], GUAN Gong-Shun[2]

(1. *Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin* 150027, *China*;
2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: According to characteristic of secondary debris, initial models of secondary debris are built. The models of secondary debris are classified as three patterns. The first patten is that the projectile is not fragmentated. The second patten is that the projectile is not entirely fragmentated. The third patten is that the projectile is entirely fragmentated. The secondary debris deceleration process is analyzed based on hydrodynamics theory and gas-solid two phase flow theory. The computational model of secondary debris deceleration is built. The computational results are consistent with numerical results very well. The model of secondary debris deceleration is validated.

Key words: space debris; hypervelocity impact; pressure vessels; secondary debris