文章编号:1000-5773(2009)03-0223-06

空间碎片超高速撞击压力容器碎片云特性数值模拟研究*

盖芳芳,庞宝君,管公顺

(哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心,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问题,应用非线性动力学分析软件 AUTODYN-2D,采用 SPH 方法对碎片云在高压气体中的运动特性进行了数值模拟研究。在建模过程中,分析比较了材料状态方程对数值模拟结果的影响,并通过与实验结果的比较,选取了适合该问题的状态方程,验证了数值模拟方法的有效性。结果表明:由于容器内压气体的存在,碎片云运动发生减速,并且碎片云的轴向扩展速度相对于碎片云的径向扩展速度减速较慢;高速撞击产生的碎片云与容器内的高压气体发生了强烈的相互作用,碎片云尖端产生的钉状物及高压气体中产生的冲击波是控制容器在撞击后发生进一步破坏的两个重要因素。

关键词:空间碎片;高速撞击;压力容器;数值模拟;碎片云

中图分类号:V423.42;O347 **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来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,在一定条件下这些二次碎片有可能导致容器发生灾难性的破坏,致使航天器过早失效,因此有必要对超高速撞击压力容器产生的二次碎片在容器内的运动特性进行研究。数值模拟是研究该问题的有效手段之一,数值模拟不仅在时间和空间上获取的物理量信息更全面;而且需求条件相对简单、费用低廉,还可突破发射技术达不到的速度范围等。近年来,国外对碎片云在压力容器内的运动及其对容器的损伤已经开展研究[1-8],例如欧空局以 4.9~6.0 km/s 速度的铝球弹丸撞击铝合金材料的压力容器,通过高速摄影和压力传感器等测量手段对气体与碎片云的相互作用[5]进行了分析并开展了数值模拟[8];在国内,哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心张伟等人[9-10]采用圆柱形铝弹丸以 3 km/s 速度撞击充气铝罐,研究了容器失效情况,然而针对在高压气体中碎片云的运动特性的实验和数值模拟研究国内尚无公开报道。本研究应用世纪动力学公司开发的非线性动力学分析软件 AUTODYN-2D,采用 SPH 方法,对碎片云在高压气体中的运动特性进行了数值模拟研究;在建模过程中考虑了材料状态方程的影响,并通过与实验结果的比较验证数值模拟方法的有效性。

2 计算模型的建立

2.1 SPH 方法

光滑质点流体动力学法[11](Smoothed Particle Hydrodynamics,简称 SPH)被认为是到目前为止用

* **收稿日期**:2008-08-09;**修回日期**:2008-12-03
基金项目:国家空间碎片专题研究资助项目
作者简介:盖芳芳(1981—),女,博士研究生,主要从事空间碎片高速撞击压力容器破损研究. E-mail:fang19811119@yahoo.com.cn

于模拟超高速撞击的最有前途的无网格方法。该方法不再有 Lagrange 网格畸变的问题，同时又继承了 Euler 方法中的大部分优点。研究表明[6]，SPH 方法不仅可以很好地模拟超高速碰撞产生的碎片云情况，而且还能够对高密度梯度变化以及高速撞击产生的碎片云与气体之间复杂的相互作用进行模拟分析；但相对 Lagrange、Euler 方法而言，SPH 方法花费的计算时间较长[12-13]。

2.2 材料模型选择

超高速撞击数值模拟的有效性，很大程度上取决于材料模型的选取。容器的内充气体可采用理想气体状态方程；对于金属材料，由于强度模型对碎片云的膨胀和速度影响不大[14]，因此可采用常用的 Johnson-Cook 强度模型；而状态方程[15]是描述处于热力学平衡态物质系统中压强、温度和密度等状态参量之间的关系式。压力容器在受到高速撞击过程中，物质的温度、压强及密度等都会因撞击产生的碎片云在高压气体中高速运动而发生剧烈的变化，因此对高速运动的碎片云与高压气体之间的相互作用进行描述时，如果材料状态方程不同，数值模拟结果可能会存在很大差异，即必须选取能正确对该问题进行描述的状态方程。常用的状态方程主要包括 Shock 和 Tilloston 状态方程[16]，首先分别采用两种状态方程对文献[5]中的实验工况建立计算模型并进行计算；然后将得到的计算结果与文献[5]中 EMI 实验结果进行比较，以此来选取适合该问题的材料状态方程。文献[5]中的实验工况为直径 5 mm 的球形铝弹丸以 5.2 km/s 的撞击速度正撞击由 Al5754 制成的壁厚 1.5 mm、直径为 150 mm 的圆柱形充气压力容器的封头中心，如图 1 所示；压力容器内充气体为氮气，气体压力为 1.05 MPa。针对上述实验工况应用 AUTODYN-2D 轴对称、采用 SPH 方法建立的初始计算模型如图 2 所示。为了提高计算速度，弹丸、容器的被撞击截面与气体采用 SPH 方法，而容器的其它部分采用壳体单元；SPH 质点的光滑长度为 0.15 mm。

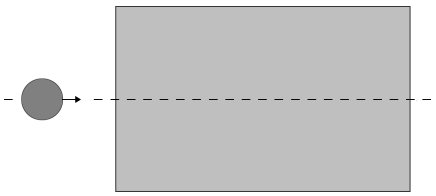


图 1 实验工况示意图

Fig. 1 Sketch map of test case

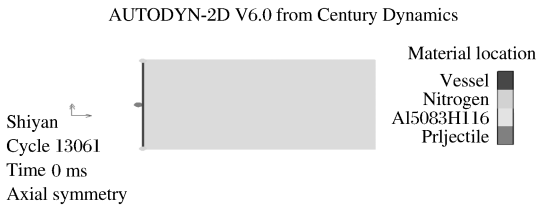


图 2 初始的几何模型

Fig. 2 Initial geometry model

采用不同状态方程建立模型得到的计算结果与实验结果的比较，如图 3 所示。由实验图片中可以清晰地观察到，由于撞击产生的碎片云在高压气体中的高速运动，气体中产生了冲击波，而两种状态方程都能很好地对压力气体中冲击波的产生和传播进行描述。另一方面，采用以上两种状态方程进行计算时，在撞击轴上都存在一个“真空柱”，如图 3 所示。该“真空柱”内部没有任何材料存在，在越靠近撞击孔的位置其轴截面直径越大，且“真空柱”皆随着时间的增加而逐渐变细。因此可以假设，如果计算时间足够长，“真空柱”将会消失，即容器内的气体材料可以通过撞击孔向容器外部运动，即容器发生气体泄漏。

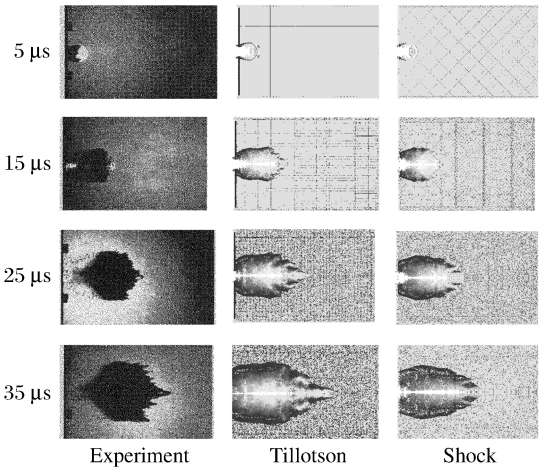


图 3 不同状态方程与实验结果[5]的比较

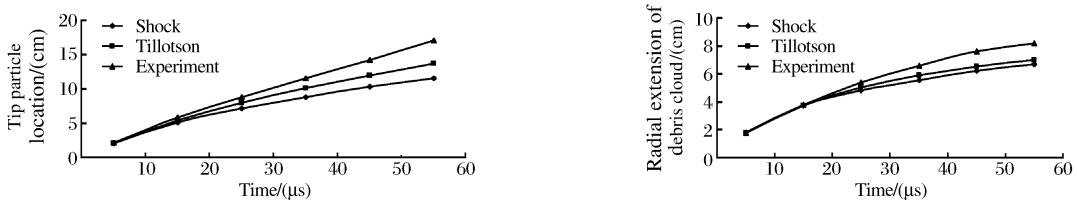
Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results[5]

文献[5]中实验结果显示，在撞击后 35 μs 时气体并没有发生泄漏。而由图 3 可见，在撞击后 35 μs

时,分别采用两种状态方程进行计算时"真空柱"皆未消失,即气体没有发生泄漏。因此对判断在计算过程中气体是否发生泄漏而言,两种状态方程的计算结果与实验结果也是吻合的。

而对碎片云外形特征进行描述而言,由图 3 可见,Tillotson 状态方程的计算结果与实验结果吻合得较好,特别是在碎片云尖端形成了类似钉子形的尖端与实验结果相一致;而采用 Shock 状态方程得到的计算结果并没有描述出与实验结果相一致的碎片云的基本外形特征。另一方面,将采用两种状态方程碎片云轴向及径向扩展的计算结果与实验结果也进行了比较[5],如图 4 所示。虽然两种状态方程的计算结果与实验结果相比皆偏低,但使用 Tillotson 状态方程得到的结果与实验结果更为接近。并且由图 5 可见,采用 Tillotson 状态方程进行计算得到的碎片云扩展速度与实验结果吻合得也是比较好的。

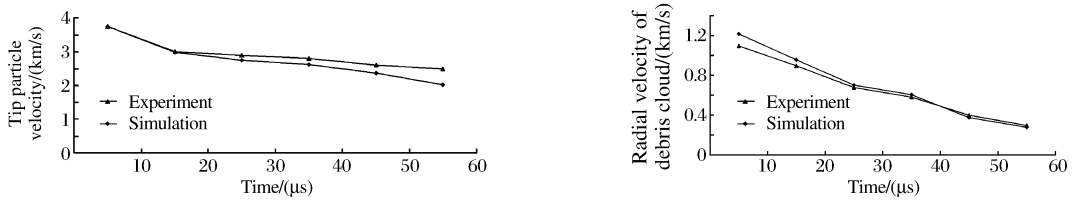
综上所述,针对高速撞击充气压力容器碎片云运动特性分析问题,采用 SPH 方法、材料应用 Tillotson状态方程可以给出较好的计算结果,并通过与实验结果的比较,验证了数值模拟方法的有效性。



(a) Tip particle location　　(b) Radial extension of debris cloud

图 4　碎片云扩展数值模拟结果与实验结果[5]比较

Fig. 4　Comparison of numerical and experimental results[5]



(a) Tip particle velocity　　(b) Radial velocity of debris cloud

图 5　碎片云扩展速度模拟结果与实验结果[5]比较

Fig. 5　Comparison of different numerical and experimental results[5] of debris velocities

3　数值模拟结果及其分析

3.1　碎片云减速现象及其分析

当容器有内充气体时,由图 5 可见,碎片云在运动过程中发生了减速现象。为了分析碎片云的这种减速现象,如图 6 所示,在相同的撞击条件及容器的结构参数(与文献[5]中的实验工况相同)下,将容器内充气体压力分别为 1.05、0 MPa 的碎片云膨胀半角[17]的数值模拟结果进行了比较。由图 6 可见,当容器空载时碎片云的膨胀半角保持不变;而当容器有内充气体时,碎片云膨胀半角变小,并且随着时间的增加逐渐减小。碎片云的膨胀半角的大小是评估碎片云对舱壁的损伤范围的重要参数,即在容器前后壁间距不变时,膨胀半角越大,碎片云对容器后壁的损伤范围越大。因此,在本研究中,由于气体对碎片云的减速作用使碎片云的膨胀半角减小,即减小了碎片云对后壁的损伤范围。另一方面由膨胀半角的定义可以得出,随着时间的增加碎片云膨胀半角减小,表明在碎片云运动过程中,碎片云的径向扩展速度,相对于轴向扩展速度减速较快,即气体对碎片云径向膨胀影响较大。

3.2　气体与碎片云的相互作用分析

图 7 给出了容器受撞击后 35 μs 时产生的碎片云在高压气体中运动的速度分布图。由图中可以清

晰地观察到,高速运动的碎片云只与其周围附近的气体发生作用,其余气体未受其扰动;并且存在一个明显的分界面,即碎片云与未受干扰气体的作用面。图 8 中给出了该作用面上产生的最高温度与最大压力随时间的变化趋势,产生该最高温度及最大压力的位置位于碎片云尖端与气体的作用面上。由图 8可见,碎片云与气体之间相互作用的温度最高可达几十万开尔文,压力也可达数百兆帕斯卡,碎片云与气体发生了强烈的相互作用,这样的温度及压力皆可使铝合金发生熔化,甚至汽化[18];并且随着时间的增加,虽然曲线斜率减小,但温度及压力仍皆随着时间的增加而增大。因此,在本研究的计算时间范围内,虽然由于气体的存在,碎片云发生减速,但是碎片与气体的相互作用却在增强。而这种高速运动的碎片云与气体的强烈相互作用直接导致了在气体中产生冲击波。

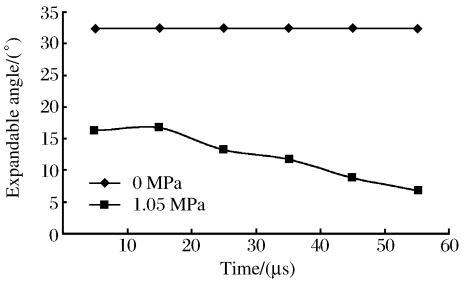


图 6 不同内充气体压力碎片云膨胀半角对比

Fig. 6 Comparison of expandable angle of debris cloud at different pressures

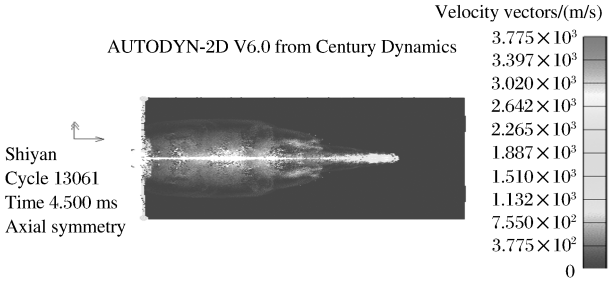
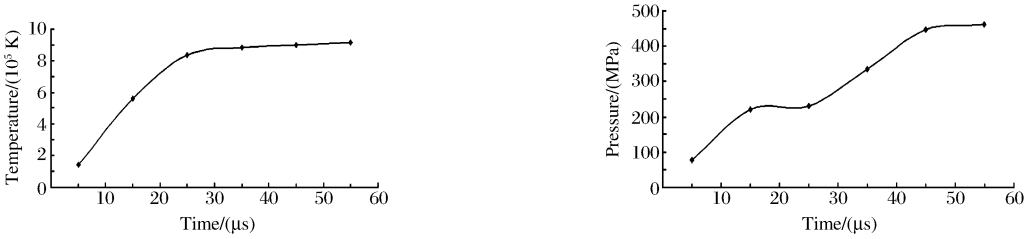


图 7 碎片云及冲击波速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of debris cloud and shock wave



(a) Temperature (b) Pressure

图 8 碎片云与气体作用面的温度及压力

Fig. 8 Temperature and pressure histories at the interface between the debris cloud and gas

由图 7 可以看出,产生的冲击波在撞击轴方向上与碎片云不分离,并与其一起运动;而径向冲击波与碎片云已经分离,并且如图 9 所示,在碎片云运动过程中,径向冲击波的速度高于碎片云径向扩展的速度。如果径向冲击波到达容器壁,则冲击波能够在容器壁上产生一个瞬时的压力加载脉冲[6];若容器本身存在缺陷,那么这个瞬时压力加载就可能使其裂纹失稳扩展而导致容器发生破坏。因此,即使撞击产生的碎片云由于气体的存在发生减速而不能对容器造成损伤的情况下,产生的气体冲击波同样可能导致容器发生破坏。在图 7 中还可以观察到,碎片云尖端的钉状物具有较高的速度,减速也最慢;而且碎片云大部分质量也都集中在碎片云尖端位置,因此它对容器后壁造成的损伤相对于碎片云团中的其它碎片也是最严重的。因此,由以上分析可见,碎片云尖端钉状物及气体冲击波是控制容器撞击后发生进一步破坏的重要因素。

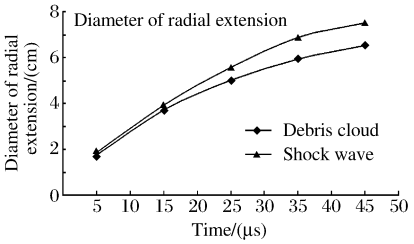


图 9 冲击波及碎片云的径向扩展比较

Fig. 9 Comparison of radial extension of the shock wave and debris cloud

4 结　论

应用 AUTOYON-2D 软件,采用 SPH 方法对超高速撞击压力容器产生的碎片云在高压气体中的运动特性进行了数值模拟研究,在建模过程中,考虑了状态方程对数值模拟结果的影响,并且通过与实验结果的比较,验证了采用 Tillotson 状态方程进行建模计算的正确性。研究表明:

(1) 由于容器内压气体的存在,碎片云运动发生减速,并且碎片云的轴向扩展速度相对于碎片云的径向扩展速度减速较慢;

(2) 撞击后碎片云与气体发生了强烈的相互作用,并在本研究的计算时间内,随着时间的增加相互作用增强;

(3) 碎片云尖端钉状物及气体冲击波是控制容器撞击后发生进一步破坏的重要因素。

关于弹丸超高速撞击压力容器问题,本工作只对撞击产生的碎片云与气体之间的相互作用进行了初步的数值模拟研究,尚需开展实验研究。针对数值模拟分析而言,不同容器的内充气体压力、弹丸撞击条件及容器的结构参数、弹丸和容器的材料等对碎片云运动特性的影响也需要进一步深入研究。

References:

[1] Piekutowski A J. Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact [R]. NASA 8-38856,1996.

[2] Whitney J P. Hypervelocity Impact Tests of Shielded and Unshielded Pressure Vessels [R]. NASA Johnson Space Center,JSC 32294,1993.

[3] Friesen L J. Hypervelocity Impact Tests of Shielded and Unshielded Pressure Vessels,Part Ⅱ [R]. NASA Johnson Space Center,JSC 27081,1995.

[4] Lambert M. Hypervelocity Impact Testing Impacts Pressure Vessels [R]. Second Extension to Contract 10556/93 YME/ML/2745,ESTEC,1997.

[5] 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.

[6] Schäfer F. Hypervelocity Impact Testing Impacts on Pressure Vessels Final Report [R]. EMI Report I-27/01, 2001.

[7] Christiansen E L,Kerr J H. Debris Cloud Ablation in Gas-Filled Pressure Vessels [J]. Int J Impact Eng,1997,20: 173-184.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Randles P W,Libersky L D. Smoothed Particle Hydrodynamics:Some Resent Improvements and Applications [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1996,139(1-4):375-408.

[12] Katayama M, Toda S, Kibe S. Numerical Simulation of Space Debris Impacts on the Whipple Shield [J]. Acta Astronautica,1997,40(12):859-869.

[13] Gordon R J,Robert A S,Stephen R B. SPH for High Velocity Impact Computations [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1996,139(1-4):347-373.

[14] Zhang W, Pang B J, Jia B, et al. Numerical Simulation of Debris Cloud Produced by Hypervelocity Impact of Projectile on Bumper [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(1): 47-52. (in Chinese)
张 伟, 庞宝君, 贾 斌, 等. 弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 47-52.

[15] Fortov V E, Kim V V, Lomonosov I V, et al. Numerical Modeling of Hypervelocity Impacts [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33: 244-253.

[16] Povarnisyn M E, Khishchenko K V, Levashov P R. Hypervelocity Impact Modeling with Different Equations of State [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33: 625-633.

[17] Zhang Y Q. Hypervelocity Impact Bumper Debris Cloud Modeling and Damage Prediction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005: 34-37. (in Chinese)
张永强. 超高速撞击防护屏碎片云特性建模及损伤预报 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005: 34-37.

[18] Zhang Q M, Huang F L. An Introduction to Hypervelocity Impact Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2000: 47-50. (in Chinese)
张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 47-50.

Numerical Investigation on the Characteristics of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact on Pressure Vessels

GAI Fang-Fang, PANG Bao-Jun, GUAN Gong-Shun

(*Hypervelocity Impact Research Center, HIT Aerospace Laboratory, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: SPH methods in AUTODYN-2D was used to investigate the characteristics of debris clouds propagation inside the gas-filled pressure vessels for hypervelocity impact on the pressure vessels. The effect of equation of state on debris cloud was examined. A better correlation between experimental and numerical results was obtained. The result shows a strong interaction between cloud debris and pressurized gas. The pressurized gas in vessel reduces strongly the radial and axial velocity of the debris cloud. "Spike" of the debris clouds and shock wave are shown to be important factors governing the damage of pressure vessel.

Key words: space debris; hypervelocity impact; pressure vessels; numerical simulation; debris clouds