

超高速碰撞电磁效应数值模拟

栗建桥, 宋卫东

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 采用理论分析和数值模拟结合的方法对超高速碰撞产生等离子体问题进行研究. 通过 SPH 方法, 建立二维轴对称模型, 针对不同碰撞速度进行数值模拟, 对比不同时刻碎片云的形状以及膨胀速度, 验证数值模拟的正确性; 利用 Thomas-Fermi 模型, 计算超高速碰撞过程中 SPH 粒子的温度, 对于发生汽化的部分考虑其产生的等离子体参数; 以统计物理学为基础, 基于化学反应动力学原理, 建立了非热平衡等离子体电子数密度、电子温度、宏观温度以及内能之间的关系, 用以计算超高速碰撞过程中产生等离子体的参数. 给出不同时刻碰撞产生的总电荷数随时间的变化, 将数值模拟结果与文献中经验公式结果进行对比, 验证了本文中计算超高速碰撞产生等离子体方法的正确性.

关键词: 超高速碰撞; SPH; 等离子体; 非热平衡电离; 碎片云

中图分类号: O 414; O 531 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2014)增刊 1-0147-04

Numerical Simulation of Hypervelocity-Induced Electromagnetic Effect

LI Jian-qiao, SONG Wei-dong

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Hypervelocity impact generated plasma (HVIGP) was investigated through both theoretical analysis and numerical simulation. The 2-D axially symmetric model was established based on the smoothed particle hydrodynamic method, to numerically simulate the impacts of different velocities and verified by comparing to the debris clouds and expansion velocity. The SPH particle temperatures at different hypervelocity were calculated by the Thomas-Fermi model and considering the plasma parameters as the vaporized parts. In addition, the relationships between the electron density of the thermal non-equilibrium plasma, the electron temperature, the macro-temperature, and the internal energy were given based on statistical physics and chemical reaction dynamics to calculate the parameters of HVIGP. Total charges of HVIGP at different times were simulated. The simulated results are compared with the calculated results by the empirical formula, indicating that the method used to calculate HVIGP in this paper is correct.

Key words: hypervelocity impact generated plasma; smoothed particle hydrodynamic; thermal non-equilibrium ionization; debris cloud

航天器遭受这种碎片的碰撞很有可能会造成航天器外墙的穿透, 使压力容器发生泄漏, 或者造成航

天器结构上的破坏, 国内外在这方面进行了大量的理论、实验和数值模拟研究, 从而发展出有效的防护

收稿日期: 2014-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91016013, 11221202)

作者简介: 栗建桥(1987—), 男, 博士生, E-mail: 10902067@bit.edu.cn.

通信作者: 宋卫东(1975—), 男, 博士, 教授, E-mail: swdgh@bit.edu.cn.

结构. 柳森和李毅^[1]针对 Whipple 防护屏弹道极限参数进行实验研究, 弹丸为 LY12 铝球, 撞击角度为 0° , 结果表明, 速度为 4.5 km/s 时, 弹丸临界直径为 0.35 cm . 丁莉和庞宝君等^[2]分析了 Whipple 防护结构超高速碰撞极限, 建立撞击极限方程, 得到相关参数以及参数之间的关系, 为实验提供基础. 柳森和李毅等^[3]进行了 Whipple 防护屏超高速碰撞实验研究, 针对不同的碰撞速度和碰撞角度, 给出了碰撞后碎片云不同时刻激光阴影照片、弹孔尺寸和后板毁伤情况. 贾光辉等^[4]提出碎片临界穿透靶板的比动能概念, 获得了极限穿透条件下的真是比动能与速度无关的结论. 除此之外, 张伟等^[5]针对非球形弹丸的超高速碰撞问题进行了数值模拟研究, 给出了二维及三维模拟结果. 对于特殊材质的靶板也有人进行了相应的研究, 贾光辉等^[6]对蜂窝夹层板进行超高速碰撞数值模拟研究, 建立了蜂窝芯层的 SPH 集合模型, 采用 LS-DYNA 的 SPH 功能进行仿真研究. 这些实验、理论和数值模拟研究都是针对了超高速碰撞造成的结构破坏进行的, 而在超高速碰撞产生的电磁效应方面, 国内外的相关报道较少, 而且主要集中在实验研究方面. 唐恩凌等^[7]在二级轻气炮上进行了一系列的实验研究, 得到了一些超高速碰撞产生的等离子体参数时间的变化. 这种碰撞产生的等离子体其特征参数以及空间分布没有表现出很明显的时间规律, 很难说明其某一时刻的值具有怎样的意义, 因此针对这种等离子体参量进行某一段时间内的统计对分析碰撞参数对产生等离子体的影响较为有意义. Crawford 等^[8]对超高速碰撞产生等离子体进行了实验研究并且收集碰撞过程中产生的电荷, 统计得到超高速碰撞产生等离子体的总电量随碰撞速度和弹丸质量的变化, 得到了一个描述等离子体电量与碰撞质量和速度之间关系的经验公式. 近年来在这方面进行的研究多数集中在实验研究上, 同时也有少量的理论研究, 但是对于数值模拟研究则很少报道. Li 等^[9]在超高速碰撞产生等离子体数值模拟方面进行了研究, 采用 Saha 方程计算了超高速碰撞产生的碎片云中的等离子体参数, 给出了热平衡假设下空间某一处在碰撞后某一时刻的等离子体温度和电导率, 与实验得到的结果比较符合. 但是所进行的研究是认为提取数值模拟结果然后代入公式计算, 在超高速碰撞电磁效应方面仍然缺乏有效的直接模拟研究.

本文中需要建立非热平衡等离子体模型, 并且

将其耦合到自行编写的 SPH 程序中, 通过模拟超高速碰撞过程, 能直接给出碰撞后产生的等离子体的空间分布, 并且统计得到碰撞产生的总电量, 与文献中给出的经验公式对比, 用以验证程序和等离子体模型的有效性; 对比不同碰撞速度下, SPH 粒子的温度和电子温度, 来确定建立非热平衡等离子体模型代替 Saha 方程计算超高速碰撞产生等离子体参数的必要性.

1 二维轴对称 SPH 程序接触力

SPH 方法模拟多体碰撞问题时, 会发生粒子之间的非物理穿透, 从而引发计算错误. 本文中, 基于粒子碰撞之后的动量变化施加接触力并保证计算过程中总能量守恒.

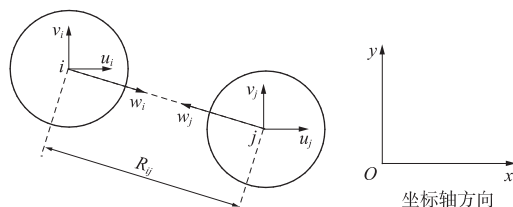


图1 接触力示意图

Fig. 1 Schematic of the contact force

如图1所示, 粒子沿球心连线方向的速度为 w , 同时 y 方向即为 r 方向, x 方向即为 z 方向, 下标 i 、 j 表示粒子编号, 两粒子间距为 R_{ij} , 当 R_{ij} 小于光滑长度时, 认为两粒子开始接触, 计算接触力. 计算两粒子中心连线方向上的相对速度为 $w_i - w_j$, 根据量纲分析, 接触力表示为

$$\begin{cases} F_z = \frac{(\rho_i + \rho_j)B}{2AR_{ij}dt} |z_j - z_i| \left(\frac{h}{R_{ij}} - 1\right), \\ F_r = \frac{(\rho_i + \rho_j)B}{2AR_{ij}dt} |r_j - r_i| \left(\frac{h}{R_{ij}} - 1\right), \\ B = (u_i - u_j)(z_j - z_i) + (v_i - v_j)(r_j - r_i). \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为 x 方向速度; v 为 y 方向速度; A 为系数.

2 超高速碰撞数值模拟

2.1 SPH 程序验证

针对速度为 5000 m/s 的铝球超高速碰撞铝板的问题, 进行了数值模拟, 对碎片云轴向膨胀速度和某一时刻碎片云的形状与实验^[10]进行了对比, 如图2和图3所示.

由图1结果可以看出, 稳定时, 实验的轴向膨胀速度为 3000 m/s , 数值模拟取平均之后得到一个膨

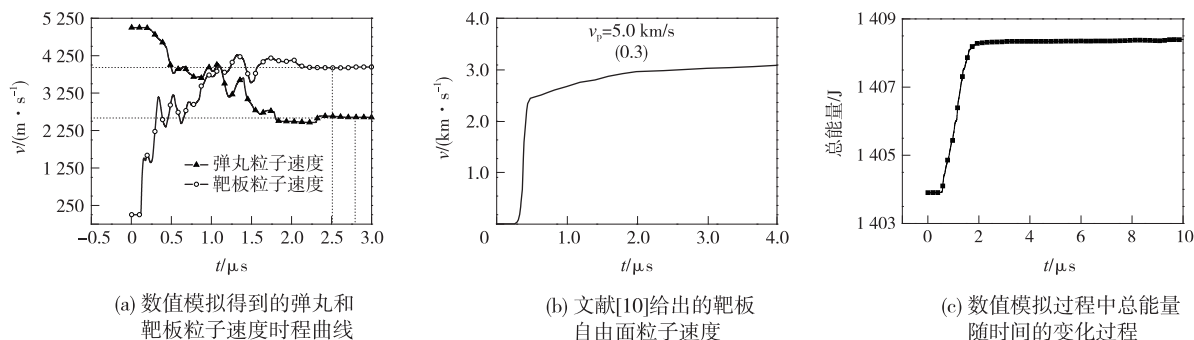


图 2 轴向膨胀速度对比
Fig. 2 Comparison of axial expansion velocity

胀速度约为 3 250 m/s. 图中方点表示的是模拟过程中总能量随时间的变化,可以看出从开始到平衡阶段所产生的能量变化很小,不超过 0.36%,图 3 给出了某一时刻碎片云形状对比.

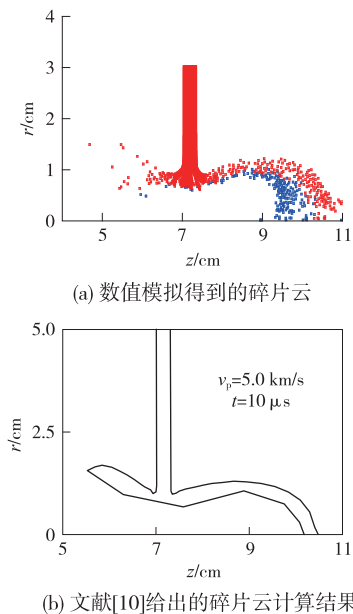


图 3 碎片云形状对比
Fig. 3 Comparison of the debris shape

从对比结果可以看出,相对误差不超过 5%.

从图 2 和图 3 的对比可以看出,所采用的数值模拟方法对超高速碰撞问题能够给出较好的结果,所造成的误差很小,不会对产生等离子体问题的研究产生影响,可以作为研究超高速碰撞产生等离子体特性研究的基础.

2.2 超高速碰撞产生的等离子体

模拟超高速碰撞的过程,碰撞的速度为 5,6,7,8,9 和 10 km/s. 基于非热平衡电离关系,可以给出在原子和电子之间处于非热平衡状态下,超高速碰撞产生的等离子体的总电量以及等离子体参数的空

间分布情况,通过统计所有粒子产生电荷总量. 根据总电量的峰值可得到超高速碰撞过程中能够收集到的总电荷数.

将结果与文献[9]中的经验公式对比如图 4 所示. 从对比中可以看出,除了速度为 5 km/s 时得到的总电量小于经验公式得到的下限值,其余 5 个速度计算得到的总电量都处于经验公式给出的上限和下限之间,并且逐步由下限附近增加到上限附近.

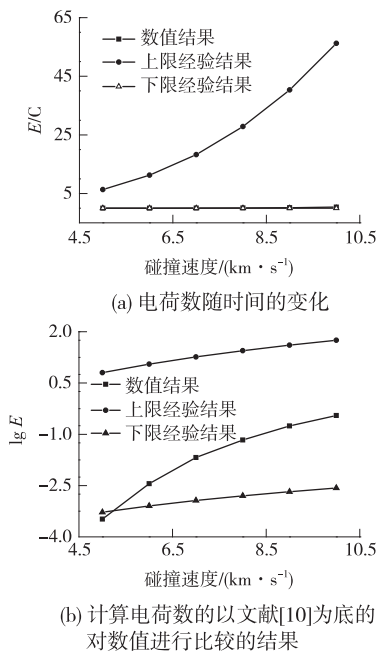


图 4 等离子体总电量与经验公式结果对比
Fig. 4 Comparison between the results of simulations and that of the empirical formula

3 结 论

本文通过 SPH 方法模拟超高速碰撞问题,结合了热力学推导得出的原子和电子处于非平衡状态下的等离子体电子密度随温度变化的关系,模拟了超

高速碰撞过程产生的等离子体总电量随时间的变化,并且将结果与文献中实验得到的经验公式进行对比,得到如下结论:① 本文程序可有效模拟超高速碰撞过程;② 从温度云图可以看出,局部粒子温度远远超过了铝的汽化温度,能够满足产生等离子体的条件;③ 直接模拟得到了超高速碰撞过程中产生等离子体总电量随时间的变化。

参考文献:

- [1] 柳森,李毅. Whipple 防护屏弹道极限参数试验[J]. 宇航学报, 2004, 25(2): 205 - 207.
Liu Sen, Li Yi. Ballistic limit parameter tests of the Whipple shield[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(2): 205 - 207. (in Chinese)
- [2] 丁莉,庞宝君,张伟. Whipple 防护结构超高速撞击极限分析[J]. 强度与环境, 2006, 33(2): 12 - 16.
Ding Li, Pang Baojun, Zhang Wei. Limit analysis for hypervelocity impact on the Whipple shields [J]. Structure and Environment Engineering, 2006, 33(2): 12 - 16. (in Chinese)
- [3] 柳森,李毅,黄洁,等. 用于验证仿真的 Whipple 屏超高速撞击试验结果[J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 505 - 508.
Liu Sen, Li Yi, Huang Jie, et al. Hypervelocity impact test results of whipple shield for the validation of numerical simulation [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 505 - 508. (in Chinese)
- [4] 贾光辉,黄海,胡震东,等. 空间碎片超高速撞击极限穿透比动能研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(5): 1000 - 1003.
Jia Guanghui, Huang Hai, Hu Zhendong, et al. Research on debris kinetic energy per unit area in hypervelocity impacting[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(5): 1000 - 1003. (in Chinese)
- [5] 张伟,马文来,管公顺,等. 非球弹丸超高速撞击航天器防护结构数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(3): 240 - 245.
Zhang Wei, Ma Wenlai, Guan Gongshun, et al. Numerical simulation of non-spherical projectiles hypervelocity impact on spacecraft shield configuration [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(3): 240 - 245. (in Chinese)
- [6] 贾光辉,黄海. 蜂窝夹层板超高速撞击 SPH 仿真初探[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(4): 145 - 147.
Jia Guanghui, Huang Hai. Hypervelocity impact SPH simulation on honeycomb type plate [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2004, 24(4): 145 - 147. (in Chinese)
- [7] 唐恩凌. 超高速碰撞 LY12 铝靶产生等离子体实验研究[D]. 北京:北京理工大学, 2007.
Tang Enling. Experimental study on plasma generated by hypervelocity impact LY12-Al target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] Crawford D A, Schultz P H. Electromagnetic properties of impact-generated vapor and debris[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1 - 12): 169 - 180.
- [9] Li Jianqiao, Song Weidong, Ning Jianguo. A preliminary study of the characteristics of an impact-generated plasma[J]. Physica Scripta, 2013, 87(5): 1 - 7.
- [10] 张庆明. 超高速冲击铝双层板的熔化效应[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 1993.
Zhang Qingming. Melting effects of aluminum dual-sheet structure in hypervelocity impact [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1993. (in Chinese)

(责任编辑:刘芳)