

# 激光驱动高速金属颗粒与气体相互作用\*

韩 雪<sup>1</sup>, 张 黎<sup>1,2</sup>, 张永强<sup>1</sup>, 吴冀川<sup>1</sup>, 谭福利<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 采用激光驱动技术模拟高速运动金属颗粒与气体相互作用过程, 研究高速气固两相流输运过程。采用驱动靶优化设计、激光参数调节等方法对颗粒加速过程进行控制, 利用高时空分辨率、高精度瞬态实验诊断技术获取高速颗粒瞬态物理图像。通过求解三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程和刚体飞行六自由度动力学方程数值模拟高速单颗粒与气体混合过程, 方程采用高斯-赛德尔隐式方法进行时间推进求解。研究表明, 激光驱动方法能够有效地发射金属颗粒, 阴影照相技术能够有效获取高速颗粒物理图像。数值模拟给出了高速颗粒与气体作用的流场参数。

**关键词:** 激光驱动; 高速金属颗粒; 发射技术; 气固两相流; 数值模拟

**中图分类号:** O532.25; O521.3

**文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190265

## Interaction between laser-driven high-velocity metal granule and gas

Han Xue<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1,2</sup>, Zhang Yongqiang<sup>1</sup>, Wu Jichuan<sup>1</sup>, Tan Fuli<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-113, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of High Energy Laser Science and Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** We apply laser-driven launching technique to the interaction between high-velocity metal granule and gas to investigate high speed gas-solid two-phase flow transport. Optimization of target design and adjustment of laser parameters were used to control the laser-driven process. Diagnostic tools with high resolving power of space and time as well as high accuracy were set up to capture the high-velocity granule. The unsteady flow field of the granule was simulated by solving the the 3-D Reynolds averaged Navier-Stokes equations and six degree of freedom ballistic equation. With the implicit Gauss-Seidel scheme, the code was advanced in time. The results indicated that the laser-driven launching technique was effective and the shadow photographs of high-velocity granule were taken successfully. The aerodynamic drag of high-velocity granule was computed with numerical simulation.

**Key words:** laser-driven; high-velocity metal granule; launching technique; gas-solid two-phase flow; numerical simulation

微喷射现象研究在武器物理中具有重要意义, 同时也是冲击波物理和材料科学的重要基础课题。在内爆压缩科学和工程领域, 微喷射物质成为引发界面混合现象的一个主要来源, 对后期的混合状态和压缩效果产生直接影响。因此, 微喷射的产生及其与内部气体的混合过程已成为冲击波物理研究中十分重要的热点和难点问题。近年来, 美、俄、法等国均开展了充气条件下微喷混合现象的实验研究, 获得了微喷混合过程的一些基本图像认识。Elias 等<sup>[1]</sup>用高速摄影、X 光照相等方法研究了平面充气条件下金属锡平面样品的微喷混合过程, 实验发现, 微喷射物将与气体形成一定厚度的混合层; Ogorodnikov 等<sup>[2]</sup>用高速纹影照相方法观测了铅材料微喷射物与气体混合的局部图像, 观察到颗粒态的微喷射物以及气体波; Oro 等<sup>[3]</sup>用质子照相等技术对金属锡充气微喷在氢气和氙气中的输运特性进行了观测。国内孙海权、王裴等<sup>[4-5]</sup>对微喷颗粒与气体混合过程也开展了数值模拟研究。然而, 以上研究大多着眼于对微喷射物质与气体混合的宏观现象观测, 针对单个颗粒与气体作用过程中的动力学过程研究涉及较少, 相关实验研究鲜有报导。另外, 超燃发动机混合、火山喷发、工业粉尘爆炸、粉末灭火和超声速冷喷涂等技术研发和工程应用中存在大量的高速气相流场中的气固两相流现象。研究人员大多通过对激波管内激波与固体颗粒群的相互作用过程的观察分析来研究固体颗粒与气体的相互作用<sup>[5-7]</sup>, 且研究重点多为颗粒群与气流的作用过

\* 收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772310)

作者简介: 韩 雪(1989—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光与物质相互作用方面研究; hanxue0807@163.com。

通信作者: 张 黎(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光与物质相互作用方面研究; zhangli8037@sina.com。

程,很难捕捉到单个微小颗粒的运动图像,难以得到构建模型所需的诸如颗粒阻力等关键参数。本文尝试通过激光发射微小颗粒来模拟高速物体与气体的作用过程,利用高时空分辨率、高精度瞬态实验诊断技术与数值模拟工具,获取颗粒与环境气体相互作用过程的关键参数。与另外一种模拟方法,即激波管模拟方法相比,直接驱动颗粒的方式能够减小初始入射冲击波对颗粒流场的干扰。

## 1 激光驱动单颗粒发射及诊断技术

激光驱动颗粒技术是用高功率脉冲激光束辐照在安装于基底材料的金属颗粒上(基底通常选用高阻抗透明材料,如石英玻璃等),金属颗粒吸收入射的激光束能量后发生烧蚀、汽化,形成微型烧蚀面,并在其内表面产生高温高压等离子体,等离子体继续吸收激光束能量发生膨胀,最终将剩余未蒸发颗粒驱动出去,形成高速颗粒。金属颗粒制备采用气动式金属微滴按需喷射的方法<sup>[8]</sup>,利用均匀金属液滴喷射微制造技术制备了数十  $\mu\text{m}$ ~百  $\mu\text{m}$  量级的金属球。为了获取高速颗粒的同时保证颗粒的完整性,需要对颗粒的加载结构进行设计。颗粒安装在玻璃窗口上,窗口可对激光烧蚀产生的等离子体进行约束,提高颗粒发射速度。另外可引入发射腔(图1)对激光烧蚀发射气体和颗粒进行进一步约束,提高激光驱动的发射效率。

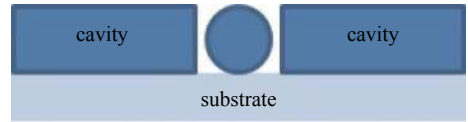


Fig. 1 Laser-driven target

图1 激光驱动靶

对高速微小颗粒进行追踪是一项挑战,需要建立高时空分辨率、高精度的瞬态诊断技术。实验测试诊断内容主要是瞬态空间图像采集系统,瞬态空间图像采集采用激光等高亮度光源作为探测光源,利用放大成像系统放大视场,通过精密调节探测光、加载激光以及相机的同步触发时间,获得高速单颗粒的物理图像。图2是实验系统示意图,利用高光束质量连续激光器(探测光波长 532 nm,激光器功率 100 mW)作为探测光源,探测光经准直扩束后直接照射颗粒靶,影像经透镜组放大成像后由超高速分幅相机记录。驱动加载光源为纳秒脉冲激光器(激光波长 1 064 nm,脉宽 10 ns,单脉冲能量 0.2~5 J),采用激光能量计实时监测加载光能量,加载光经透镜聚焦后作用于颗粒靶。实验通过 DG535 同步机来控制纳秒激光器的出光时间和超高速分幅相机的记录时间。超高速分幅相机最高摄影频率为  $2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ,最低曝光时间 5 ns,可记录 8 幅图像,图像最小间隔 5 ns。通过调整超高速分幅相机的延时参数可以精确获取不同时刻高速颗粒的多幅图像。

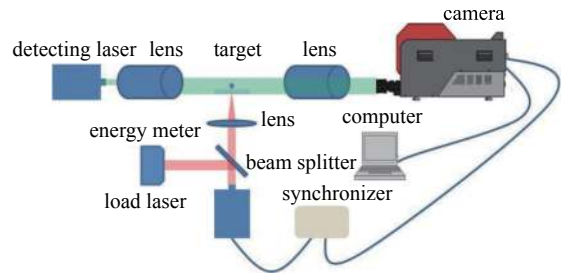


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

图2 实验系统示意图

通过调整超高速分幅相机的延时参数可以精确获取不同时刻高速颗粒的多幅图像。

## 2 高速颗粒与气体作用数值模拟

本文采用计算流体力学方法求解颗粒的高速绕流流场,通过对颗粒表面受力进行积分获取颗粒的升力、阻力等气动力参数,耦合刚体飞行六自由度动力学方程模拟颗粒的飞行轨迹,相比经验公式能更直接地获取颗粒的气动力参数,从而更准确地模拟颗粒的运动轨迹。

三维非定常 N-S 方程<sup>[9]</sup>在直角坐标系中的积分守恒形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} Q dV + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{F}(Q) \cdot \mathbf{n} dS = \iint_{\partial\Omega} \mathbf{G}(Q) \cdot \mathbf{n} dS \quad (1)$$

式中:  $\Omega$  为控制体,  $Q$  为守恒变量,  $\partial\Omega$  表示控制体单元的边界,  $\mathbf{F}(Q)$  为无粘通量,  $\mathbf{G}(Q)$  为粘性通量,  $S$  是控制面。

层流粘性系数  $\mu$  可以简单地利用 Sutherland 公式计算得到

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + s}{T + s} \quad (2)$$

式中:  $T_0$  是参考温度,一般取  $T_0 = 288.15 \text{ K}$ ;  $\mu_0$  是参考温度下的粘性系数;  $s$  是常数,  $s = 110.4 \text{ K}$ 。湍流的数值模拟采用 Menter SST 模型。

刚体平移运动控制方程为

$$\dot{\mathbf{v}}_G = \frac{1}{m} \sum \mathbf{f}_G \quad (3)$$

式中:  $\dot{\mathbf{v}}_G$  是质心平移加速度矢量,  $m$  是刚体质量,  $\mathbf{f}_G$  是作用在物体上的外力。

物体的转动控制方程为

$$\dot{\omega}_B = L^{-1} \left( \sum M_B - \omega_B \times L \omega_B \right) \quad (4)$$

式中： $\dot{\omega}_B$ 是刚体动量矩； $L$ 是刚体的惯性张量， $M_B$ 是刚体的外力矩， $\omega_B$ 是刚体的角速度。

本文采用格心格式的有限体积法离散上述 N-S 方程，选用 AUSM+格式在二阶精度下进行计算。在用有限体积法对 N-S 方程空间离散的基础上，沿用 Batina 和 Tomaro 的思想，运用通量线性化假设和最大特征值方法进行雅可比矩阵分裂来实现隐式高斯-赛德尔时间推进<sup>[10-11]</sup>。与流动控制方程类似，湍流模型传输方程的求解采用中心有限体积格式进行离散，用高斯-赛德尔隐式方法进行时间推进。

高速单颗粒与气体作用数值模拟计算域为球形区域，为了保证在不同飞行时刻颗粒的远场边界，计算域直径取为颗粒直径的 200 倍。图 3 为计算网格，计算网格采用四面体单元和六面体单元混合网格，单元总数为 139 682 个。为了在保证计算精度的同时减少计算量，对颗粒附近网格进行了加密处理，加密网格在时间推进过程中跟随颗粒移动。为了准确模拟气流边界层流动情况，计算网格沿颗粒壁面法线方向网格线向壁面拉伸加密。本文计算边界条件给法为：远场给定无反射压力远场边界条件，给定总温、总压；固壁表面使用无滑移条件，并且设定为绝热壁面。

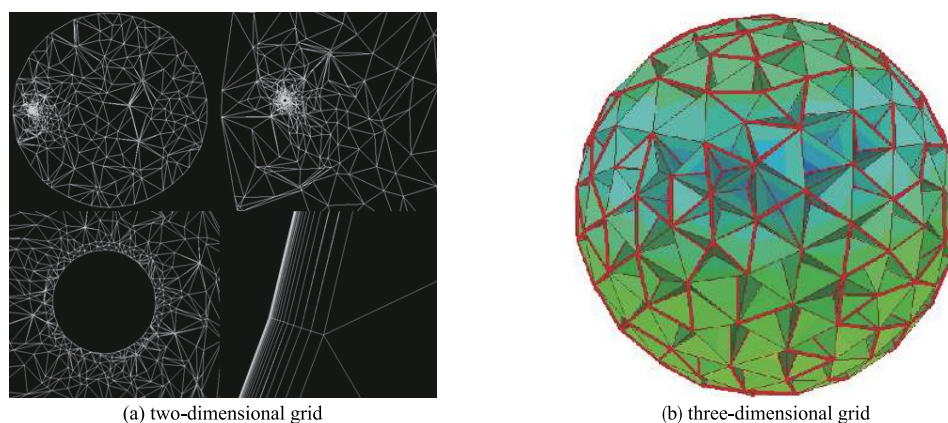


Fig. 3 Computational grids

图 3 计算网格

数值计算直接求解高速颗粒气流绕流的流场控制方程，可以直接获取颗粒表面各离散点的气流静压、剪切力等气体动力学参数，通过积分即可得到颗粒所受气动阻力，结合颗粒的实时速度、颗粒参考面积等参数进而可计算得到阻力系数

$$C_d = D/qS \quad (5)$$

式中： $D$ 是阻力， $q$ 是动压， $S$ 为参考面积。

### 3 结果及讨论

图 4 给出了激光加载初始阶段的阴影照片，激光能量 1 J。照片拍摄角度平行于激光驱动靶面，采用金属颗粒尺寸作为标尺，从而获取视场中尺寸、距离等参数。激光加载后烧蚀金属颗粒产生了物质喷射，并形成了强大的冲击波，使金属颗粒加速到较高的速度。从阴影照片可以看到，激光辐照结束后的金属球仍然保持完整的球形。图 5 是激光驱动颗粒的 8 幅连续阴影照片，激光能量 5 J，其时间间隔 1  $\mu$ s，测得平均发射速度约 200 m/s。根据阴影照片可求得不同时刻的颗粒速度、加速度，进而可获取颗粒与气体作用时的空气阻力与阻力系数(图 6)。

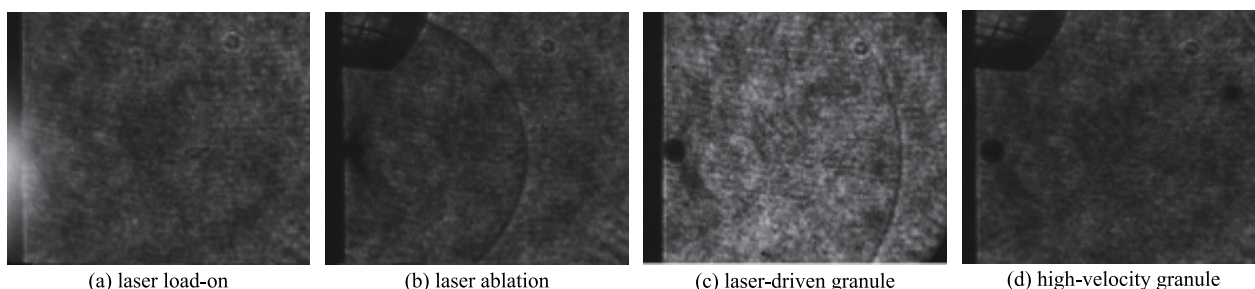


Fig. 4 Shadow photographs of laser-driven metal granule

图 4 激光加载初始时刻阴影照片



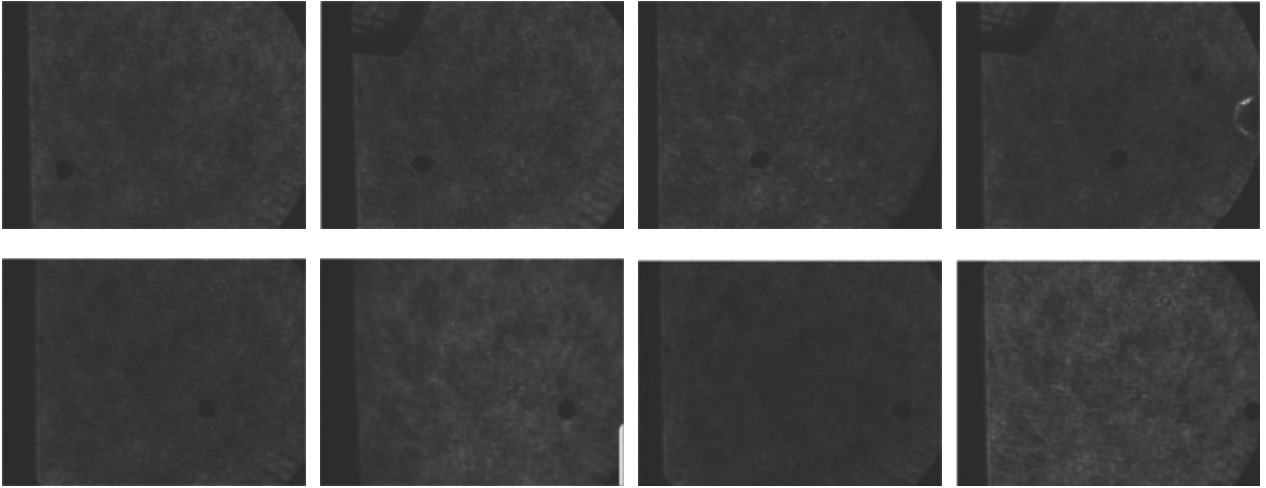


Fig. 5 Shadow photographs of high-velocity metal granule  
图 5 激光驱动单颗粒阴影照片

图 7 给出了高速颗粒与气体相互作用的压力云图, 高速颗粒迎风面挤压空气产生高压、高密度区, 气流绕过颗粒头部后产生分离涡, 在颗粒中后部形成上下对称的低压区。

计算得到的阻力系数(图 8)略小于实验值, 其原因可能是实验中激光驱动产生的冲击波首先扫过整个区域, 导致气流受到扰动, 增大了流场的湍流强度, 从而使扰流的雷诺数增加。为了说明流场初始湍流度对阻力系数的影响, 计算了不同初始湍流度气流中的颗粒阻力系数(图 9), 可见气流湍流度对颗粒所受气动力影响较大。

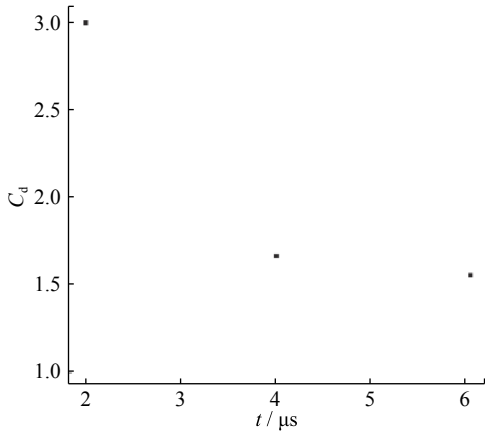


Fig. 6 Drag coefficient varies with time by experiment  
图 6 实验获得的阻力系数随时间变化历程

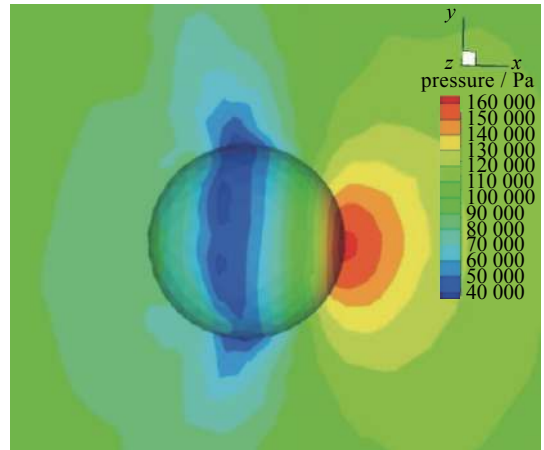


Fig. 7 Contour of prill's flow static pressure  
图 7 颗粒流场压力云图

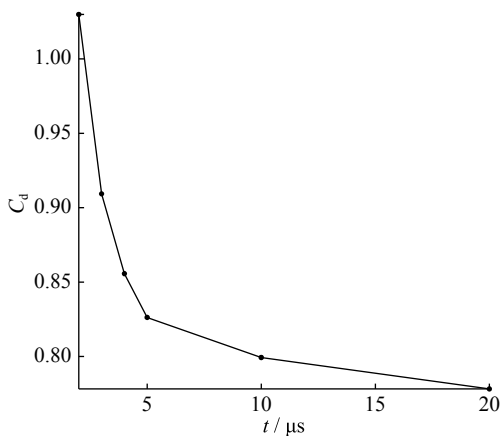


Fig. 8 Drag coefficient varies with time by simulation  
图 8 计算获得的阻力系数随时间变化历程

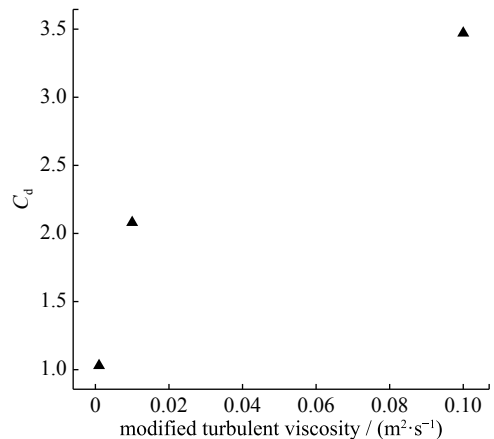


Fig. 9 Drag coefficient varies with turbulent viscosity  
图 9 初始湍流强度对阻力系数的影响

## 4 结 论

本文采用了激光驱动技术、颗粒优化设计以及高时空分辨率瞬态诊断技术,基于计算流体力学方法建立了高速颗粒在气体中飞行轨道数值模型,利用该实验和数值方法开展了激光驱动颗粒与气体相互作用初步研究。结果表明,本文激光驱动方法发射的金属颗粒速度较高、颗粒完整,可作为微喷混合等气固两相流研究、高速碰撞毁伤效应研究等的理想研究手段。高时空分辨率瞬态诊断平台获取了激光驱动高速颗粒不同时刻的多幅物理图像,结合数值模拟工具可开展高速颗粒与气体相互作用动力学研究,研究结果可为微喷大规模颗粒计算、发动机喷管气粒两相流模拟等提供参考。下一步计划改进激光驱动方法,开展更高速度的颗粒与气流相互作用研究。

### 参考文献:

- [1] Elias P, Chapron P, Mondot M. Experimental study of the slowing down of shock-induced matter ejection into argon gas[C]//Schmidt S C, Johnson J N, Davison L W. Shock Compression of Condensed Matter-1989. Amsterdam: North-Holland, 1990.
- [2] Ogorodnikov V A, Ivanov A G, Mikhailov A L, et al. Particle ejection from the shocked free surface of metals and diagnostic methods for these particles. Combustion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 34(6): 696-700.
- [3] 孙海权, 王裴. 微喷混合问题的初步研究[J]. 计算力学学报, 2011, 2828(S1): 90-92. (Sun Haiquan, Wang Pei. Research of shock induced matter ejection into gas[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 2828(S1): 90-92)
- [4] 王裴, 孙海权, 邵建立, 等. 微喷颗粒与气体混合过程的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2012, 61: 2347037. (Wang Pei, Sun Haiquan, Shao Jianli, et al. Numerical simulation on mixing process of ejecta and gas[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 2347037)
- [5] Shi Honghui, Kazuki Y. The interaction between shock waves and solid spheres arrays in a shock tube[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(3): 219-227.
- [6] 施红辉. 用激波管研究超音速气固两相流[J]. *应用力学学报*, 2003, 20(4): 41-45. (Shi Honghui. Using shock tube to investigate supersonic gas-solid two-phase flow[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2003, 20(4): 41-45)
- [7] 张晓娜, 岳树元, 章利特, 等. 激波驱动的气固两相流力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(5): 538-545. (Zhang Xiaona, Yue Shuyuan, Zhang Lite, et al. Study of the mechanics of gas-solid two-phase flow driven by shock waves[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008, 23(5): 538-545)
- [8] 黄菲, 杨方, 罗俊, 等. 均匀金属液滴喷射微制造技术的研究现状[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(1): 38-43. (Huang Fei, Yang Fang, Luo Jun, et al. Research status of uniform metal droplet spray for micro-manufacturing[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(1): 38-43)
- [9] 张黎, 贺佳, 谭福利. 激光加热金属板流固耦合数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 866-869. (Zhang Li, He Jia, Tan Fuli. Numerical simulation of metal plates under laser irradiation based on fluid-solid coupling[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 866-869)
- [10] Tomaro K F, Strang W, Sankar L N. An implicit algorithm for solving time dependent flows on unstructured grids[R]. AIAA 97-0333, 1997.
- [11] Batina J T. Implicit upwind solution algorithms for three-dimensional unstructured meshes[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(5): 801-805.