

二维拉格朗日坐标系下气粒混合双向耦合对激波流场影响的计算

陈大伟 孙海权 王裴 蔚喜军 马东军

Numerical investigation on the influence of gas-particle two-way coupling to the shock fluid in the two-dimensional Lagrangian framework

Chen Da-Wei Sun Hai-Quan Wang Pei Yu Xi-Jun Ma Dong-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 084703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.084703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

凝聚炸药爆轰波在高声速材料界面上的折射现象分析

[Refraction of detonation wave at interface between condensed explosives and high sound-speed material](#)

物理学报.2016, 65(2): 024702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024702>

爆轰波在炸药-金属界面上的折射分析

[Analysis on refraction of detonation wave at the explosive-metal interface](#)

物理学报.2015, 64(11): 114702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114702>

混合物状态方程的计算

[Calculation of equation of state of a material mixture](#)

物理学报.2015, 64(6): 064702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064702>

炸药爆轰的连续介质本构模型和数值计算方法

[A continuum constitutive model and computational method of explosive detonation](#)

物理学报.2014, 63(22): 224702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224702>

来流边界层效应下斜坡诱导的斜爆轰波

[Ramp-induced oblique detonation wave with an incoming boundary layer effect](#)

物理学报.2014, 63(20): 204701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.204701>

二维拉格朗日坐标系下气粒混合双向耦合 对激波流场影响的计算*

陈大伟¹⁾²⁾ 孙海权¹⁾ 王裴^{1)†} 蔚喜军¹⁾ 马东军¹⁾

1)(北京应用物理与计算数学研究所, 计算物理国家重点实验室, 北京 100094)

2)(中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

(2015年11月16日收到; 2016年1月4日收到修改稿)

喷射颗粒与气体混合是内爆压缩领域的热点和难点. 针对喷射混合中的气粒双向耦合问题, 开展了理论建模、离散算法以及颗粒反馈对激波流场的影响研究. 建立了拉格朗日计算框架下的数学模型; 给出了耦合源项的离散算法; 开展了平面及汇聚构型条件下, 气粒双向耦合的数值模拟研究; 发现了颗粒反馈导致气体激波提速现象以及气区流场物理量分布形态的改变, 初步获得了量化分析结果. 本文建立的数学模型、计算方法和获得的新的物理认识, 为深入理解喷射混合现象、解决相关工程应用问题提供了重要理论支撑.

关键词: 内爆混合, 拉格朗日坐标系, 颗粒轨道模型, 双向耦合

PACS: 47.40.Rs, 47.61.Jd, 47.40.-x, 42.50.Wk

DOI: 10.7498/aps.65.084703

1 引言

冲击波在材料表面卸载时, 将产生高速颗粒态物质脱离材料主体, 进入气体诱发多相混合^[1,2], 称为喷射混合. 喷射混合是内爆压缩工程领域的重要问题, 同时也是冲击动力学、多相流体力学、计算数学等多学科交叉研究的前沿课题^[3-6].

由于喷射混合具有重要的工程应用背景以及基础科学研究价值, 因此引起了人们的广泛关注, 国内外均大力开展相关研究. 实验方面, 文献^[7-10]通过Asay膜、X光照相、高分辨全息等技术, 研究了喷射的物理信息. 文献^[11-14]采用高速摄影、质子照相、光子多普勒速度测量等技术, 获取了喷射物质在气体中的演化特征. 近年来, Rousculp等^[15]利用磁加载手段, 在汇聚构型装置上研究了喷射颗粒的时空分布. 理论方面, 由于内爆压缩过

程以及气粒多相流动本身的复杂性^[16], 数值模拟及物理分析的研究成果还不多. 本课题组采用颗粒轨道模型研究了喷射颗粒与气体的混合过程^[2,6]. Fung等^[5]基于FLAG流体动力学程序, 初步实现了喷射源项及颗粒输运建模.

综合国内外研究分析, 目前关于喷射混合的研究主要集中在气粒单向耦合效应, 即获得喷射颗粒在气体中的输运特性. 而大量颗粒进入气体后, 物理上气粒相间必然发生相互作用, 因此有必要开展颗粒对气体的反馈, 即双向耦合效应研究. 已有的气粒双向耦合理论研究成果多基于欧拉框架^[17,18], 对于内爆压缩问题, 由于涉及多介质相互作用、运动边界等, 采用拉格朗日(拉氏)计算具有天然优势^[19], 而拉氏计算条件下的气粒双向耦合相关研究尚未见到公开报道. 本文以此为出发点, 开展内爆拉氏框架下气粒双向耦合的物理建模及离散算法研究, 并设计平面及圆柱构型计算模型开展数值

* 国家自然科学基金(批准号: U1530261, 11571002)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2015B0101021, 2015B0201043, 2013A0202011)、国防基础科研计划(批准号: B1520133015)和计算物理重点实验室基金(批准号: 42601-03-02)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn

模拟, 获得了颗粒反馈对激波流场影响的一些新的物理认识.

2 拉氏坐标系下气粒双向耦合建模及算法

我们从欧拉坐标系下的气粒双向耦合数学模型出发, 通过引入随体导数推导拉氏坐标系下的控制方程组, 揭示耦合源项的物理含义, 给出气粒相互作用建模. 进一步结合内爆拉氏流体动力学程序计算方法, 设计耦合源项离散算法. 最后给出多介质-多相流模拟程序的流程框架.

2.1 气相控制方程组

对于气相而言, 颗粒的存在可以看成体系内部存在分布的热源、分布的质量源和分布的动量源, 因此两相间的相互作用体现在控制方程组的右端, 即通过源项实现反馈. 带颗粒源项的气相欧拉方程组如下^[17]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = S_{px}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} = S_{py}, \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E + p)u}{\partial x} + \frac{\partial (\rho E + p)v}{\partial y} \\ & = S_{px}u_p + S_{py}v_p - Q_p, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 ρ, u, v, E, p 分别为气体密度、 x 和 y 方向速度、单位质量总能、压力; S_{px}, S_{py} 分别为颗粒与气体间 x 和 y 方向动量源项; u_p, v_p 分别为颗粒 x 和 y 方向速度, Q_p 为颗粒和气体间的热量源项.

引入随体导数:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla,$$

其中 $\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$. 方程(1)两边乘以 u, v , 分别与(2), (3)式相减, 经过推导得到拉氏坐标系下含颗粒源项的动量方程组如下:

$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} = -\nabla p + \mathbf{S}_p, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{S}_p = \begin{pmatrix} S_{px} \\ S_{py} \end{pmatrix}$. 方程(5)的物理含义为: 气体质团的动量变化率由表面力和体力共同确定. 根据量纲分析, $\mathbf{S}_p$ 为单位体积内颗粒对气体的作用力.

方程(1)两边乘以 E , 与(4)相减:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \mathbf{U} \cdot \nabla E + \text{div } p\mathbf{U} = \mathbf{S}_p \cdot \mathbf{U}_p - Q_p, \quad (6)$$

其中 $\mathbf{U}_p = \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \end{pmatrix}$. 方程(5)点乘 $\mathbf{U}$ 后与(6)式相减, 并将 $E = e + \frac{1}{2}|\mathbf{U}|^2$ 代入, 整理可得

$$\rho \frac{de}{dt} + p \text{div} \mathbf{U} = \mathbf{S}_p \cdot (\mathbf{U}_p - \mathbf{U}) - Q_p, \quad (7)$$

其中 e 为单位质量内能. 由(1)式:

$$\text{div} \mathbf{U} = \frac{1}{w} \frac{dw}{dt},$$

其中 $w = \frac{1}{\rho}$ 为比容. 代入(7)式可得拉氏坐标系下单位质量内能控制方程如下:

$$\frac{de}{dt} + p \frac{dw}{dt} = [\mathbf{S}_p \cdot (\mathbf{U}_p - \mathbf{U}) - Q_p]w. \quad (8)$$

由于内爆流体动力学程序中, 对质团单元内能控制方程进行离散, 为了统一形式, 我们进一步将(8)式两边同时乘以气体质团的质量, 得到拉氏坐标系下含颗粒源项的质团单元内能 e_c 的控制方程

$$\frac{de_c}{dt} + p \frac{dV}{dt} = [\mathbf{S}_p \cdot (\mathbf{U}_p - \mathbf{U}) - Q_p]V, \quad (9)$$

其中, V 为气体质团的体积. 方程(9)的物理含义为: 相间力做功以及相间传热产生的热量, 一部分用于增加气体质团的内能, 一部分用于气体质团向外膨胀做功. 根据量纲分析, $-Q_p$ 为单位体积内的颗粒在单位时间内通过表面传给气体的热量.

拉氏坐标系下质量守恒自然满足, 至此我们建立了内爆拉氏计算条件下含颗粒反馈效应的气相控制方程组(5)和(9).

2.2 颗粒控制方程组

采用牛顿型常微分方程描述颗粒受力和运动, 并考虑颗粒温度的变化, 控制方程组如下.

颗粒动力方程组:

$$m_p \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = \mathbf{F}_p, m_p = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6}, \quad (10)$$

其中 m_p 为颗粒质量, $\mathbf{F}_p$ 为气体对颗粒的作用力, ρ_p 为颗粒材料物质密度, d_p 为球形颗粒直径.

颗粒运动方程组:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{U}_p, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ 为颗粒空间位置坐标.

颗粒能量方程:

$$m_p c \frac{dT_p}{dt} = Q, \quad (12)$$

其中 c 为颗粒材料的定容比热, T_p 为颗粒温度, Q 为气体传给颗粒的热量.

2.3 相间力、热作用建模

从 2.1 和 2.2 节可以看到, 气粒相间存在力、热耦合效应. 颗粒在气体中运动将受多种力作用, 包括阻力、压强梯度力、热泳力、Basset 力、Magnus 力和 Saffman 力等. 我们分析了内爆压缩流场特征参量变化范围, 对比了颗粒受力量级, 确定本文相间力采用阻力建模, 即

$$\mathbf{F}_p \approx \mathbf{f}_d = C_D \frac{1}{2} \rho |\mathbf{U} - \mathbf{U}_p| (\mathbf{U} - \mathbf{U}_p) S,$$

其中 $\mathbf{f}_d$ 为阻力, C_D 为阻力系数, $S = \pi d_p^2/4$ 为颗粒的迎风面积. 阻力系数取为如下形式 [2]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re}, & Re < 0.2, \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), & 0.2 \leq Re \leq 800, \\ 0.5, & Re > 800, \end{cases}$$

其中, 雷诺数 $Re = \rho d_p |\mathbf{U} - \mathbf{U}_p| / \mu$, μ 为气体的动力黏性系数.

颗粒在气体中运动, 若与周围气体存在温度差, 必然引起两相间的热量传递. 热量传递的方式包括热传导、对流传热和辐射传热. 通过分析本文仅考虑相间对流传热, 则有

$$Q \approx \frac{\mu c_{pg}}{Pr} Nu_p \pi d_p (T_g - T_p),$$

其中, c_{pg} 为气体的定压比热, $Pr = \frac{4\gamma}{9\gamma - 5}$, γ 为气体的比热容比, T_g 为气体温度, Nu_p 取为如下形式 [20]:

$$Nu_p = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33}.$$

2.4 耦合源项离散算法及多介质-多相流程序流程

采用与内爆程序中流场计算方法 (交错型拉氏方法) 相容的算法, 对耦合源项进行离散, 即动量方程离散时, 将单元内颗粒反馈的合力均分给单元四个角点, 而能量方程离散时, 统计单元内颗粒做功

及传热的总和. 我们设计的算法在数值上表现了良好的稳定性.

考虑从内爆压缩多介质到材料破坏诱发多相混合, 整个程序流程如图 1 所示. 当喷射条件满足时, 进入混合计算流程. 首先确定喷射源项, 即给出喷射量、质量速度分布、颗粒尺寸分布等信息, 结合内爆流体动力学计算传递的流场空间分布、密度、温度、速度等信息, 计算下一时刻颗粒速度、位置、温度等. 根据最新得到的气粒信息, 计算颗粒产生的动量及能量源项, 反馈给气区流场进行下一轮计算, 如此反复循环直至达到终止计算时刻.

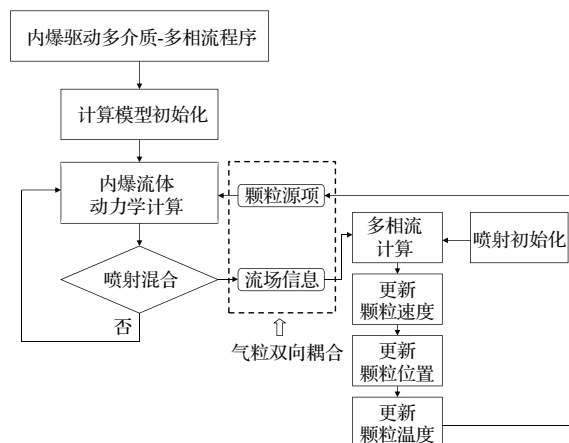


图 1 多介质-多相程序流程图

Fig. 1. Flow chart for multimaterial-multiphase code.

3 颗粒对激波流场反馈效应数值模拟研究

本文设计平面与圆柱两种不同的几何构型, 研究颗粒反馈效应对气体激波的传播以及气区流场物理量分布的影响.

3.1 计算模型及喷射设置

计算模型如图 2 所示, 分别给出平面模型正视图与圆柱模型俯视图. JOB-9003 炸药驱动钢 (Fe)、铅 (Pb) 飞层, 密封的气体为标准状态的氦气 (He), 具体结构尺寸见表 1. 炸药起爆后形成爆轰波, 爆轰波与钢飞层作用产生透射激波, 钢飞层中的透射激波又将向铅飞层中传递激波, 致使铅飞层经历冲击加载.

图 3 给出了铅飞层所经历的加卸载历史, 结果显示铅飞层经受高压加载, 其中平面模型冲击压力

峰值约 43 GPa, 圆柱模型冲击压力峰值约 51 GPa. 当激波从铅飞层表面卸载时将喷射颗粒引入, 即平面模型 5.1 μs 引入, 圆柱模型 2.9 μs 引入. 喷射颗粒的初始设置如下: 喷射量取为 25 mg/cm^2 [5], 温度取为冲击波后气体温度; 最快喷射颗粒速度取为铅自由面速度峰值的 1.5 倍, 最慢喷射颗粒速度取为自由面峰值速度; 喷射颗粒的质量-速度分布、尺寸分布设置参考文献 [2, 6, 10]. 需要说明的是, 由于压力峰值不同等因素, 平面模型与圆柱模型的实际喷射状态可能有所差异. 这里我们重点研究单向耦合与双向耦合的差别, 上述设置不影响本文的理论分析.

表 1 计算模型尺寸
Table 1. Sizes of computing models.

材料	平面模型		圆柱模型	
	R/cm	Z/cm	内半径/cm	外半径/cm
JOB-9003 炸药	[-2.0, 2.0]	[0, 3.5]	2.5	4.0
钢	[-5.0, 5.0]	[3.5, 3.8]	2.2	2.5
铅	[-3.0, 3.0]	[3.8, 4.0]	2.0	2.2
氦气	[-5.0, -3.0]	[3.8, 4.0]	0	2.0
	[3.0, 5.0]	[3.8, 4.0]		
	[-5.0, 5.0]	[4.0, 10.0]		

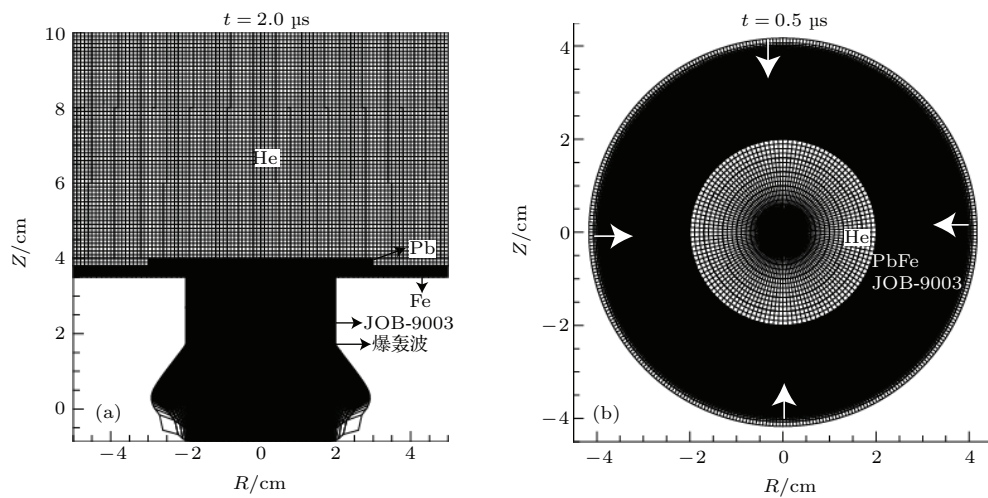


图 2 计算模型 (a) 平面; (b) 圆柱

Fig. 2. Computing models: (a) Plane configuration; (b) column configuration.

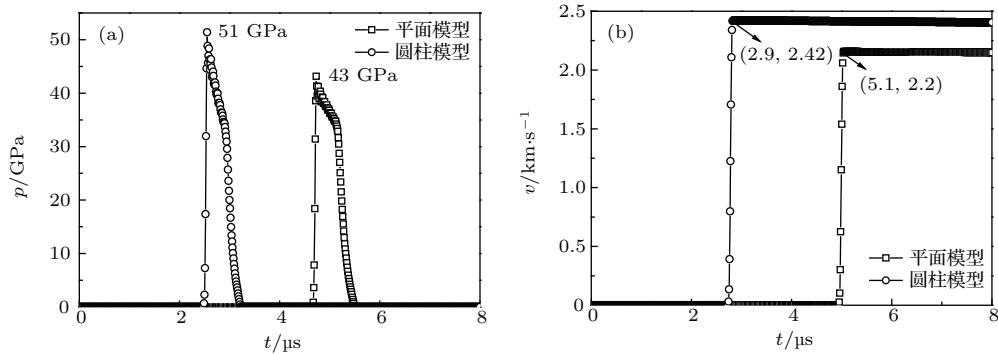


图 3 铅飞层加载状态 (a) 中间元压力历史; (b) 自由面速度历史

Fig. 3. Loading states of Pb: (a) Pressure history in the middle cell; (b) velocity history of the free surface.

3.2 结果与分析

平面模型计算得到的气体激波传播过程见图 4. 为了方便对比分析, 将单向耦合与双向耦

合结果在同一张图中给出, 其中 $R = 0$ 左边为双向耦合计算结果, 右边为单向耦合计算结果. 从图 4 可以看到, 喷射颗粒位于铅飞层之前、气体激波之后, 即喷射颗粒与气体发生局域混合现象. 以

下我们将喷射颗粒与气体发生混合的局部区域定义为混合区. 进一步对比不同时刻的数值模拟图像发现, 12 μs 以内, 两种计算条件下气体激波位置未观察到明显差异. 14 μs 时刻, 双向耦合计算

的气体激波位置出现超前现象, 说明颗粒反馈效应导致气体激波提速. 从定量计算结果分析可以知道, 速度增加的相对幅值较小, 平均提速在 2% 以内.

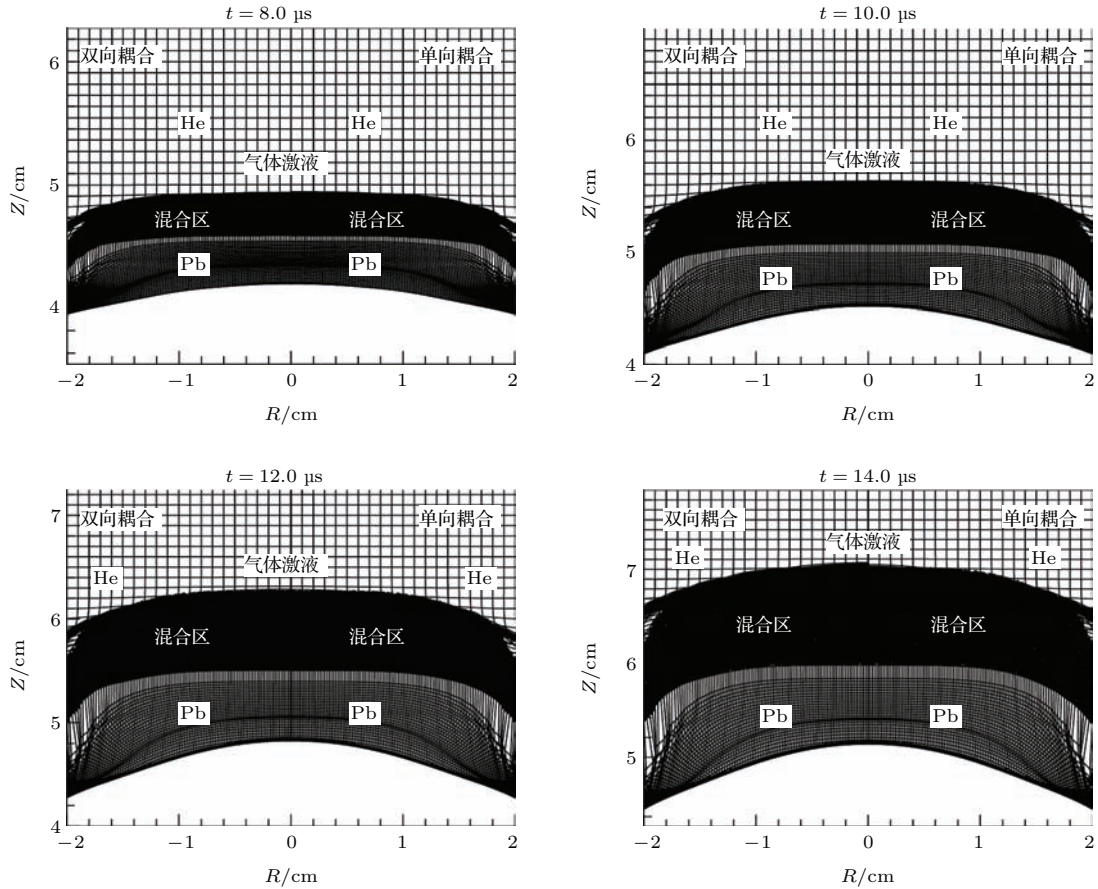


图4 平面模型气体激波传播的数值图像

Fig. 4. Numerical images of gas shock wave moving in the plane model.

图5是圆柱计算模型不同时刻的气体激波传播情况, 同样将单向耦合与双向耦合结果放到一起比较. 喷射颗粒引入 2.1 μs 后即可观察到气体激波位置超前, 并且随着时间的发展这种超前现象越来越明显. 6 μs 时刻气体激波位置超前约 0.4 mm, 7.3 μs 时刻超前可达 0.8 mm. 数值结果表明气体激波提前 0.2 μs 聚心反弹. 圆柱模型与平面模型相比, 激波位置超前现象更加显著的原因在于, 汇聚构型的几何收缩放大了颗粒对气体激波提速的反馈效应. 喷射混合引起激波传播时序过程的改变, 将对内爆压缩性能产生重要影响. 理论研究发现的这一新现象, 非常值得实验研究的关注和验证.

下面我们分析双向耦合效应对气区流场速度、压力、密度、温度的 Z 向空间分布 ($R = 0$ cm) 的影响及其原因. 图6和图7所示分别为平面计算模型

14 μs 时刻以及圆柱计算模型 7 μs 时刻气区流场物理量的分布情况. 总的来说, 颗粒对激波流场的反馈效应, 致使激波速度及其附近气区流场物理量增加. 为了理解双向耦合产生影响的物理机理, 我们选取两个典型的颗粒尺度: 直径分别为 4.5 μm (最小颗粒尺度) 和 7.5 μm (约为平均颗粒尺度), 再对每个尺度的颗粒选择三个典型的初始喷射速度: 分别约为铅自由面速度峰值的 1.12, 1.24, 1.4 倍, 给出所选颗粒的速度变化历史信息以及相对应的颗粒所处气区流场的速度信息, 如图8所示. 可以看到, 在本文关心的时间区间内, 喷射颗粒的速度始终高于气体速度, 因此相间力以及相间力做功必将对气体产生正反馈作用, 物理上必然引起气区流场物理量相应增加. 但由于喷射颗粒在气体中输运时, 速度下降的幅值较小, 因此正反馈效应需要一定时间

积累才能逐渐显现. 正如图6中结果所示, 对于平面模型喷射颗粒引入9 μs 后, 才可观察到随时间累积的颗粒反馈效应. 对于圆柱模型, 综合图8与

图7结果可以看到, 几何收缩将放大颗粒反馈的作用, 在喷射颗粒引入4 μs 后就可明显可见的激波位置超前、强度增加的效应.

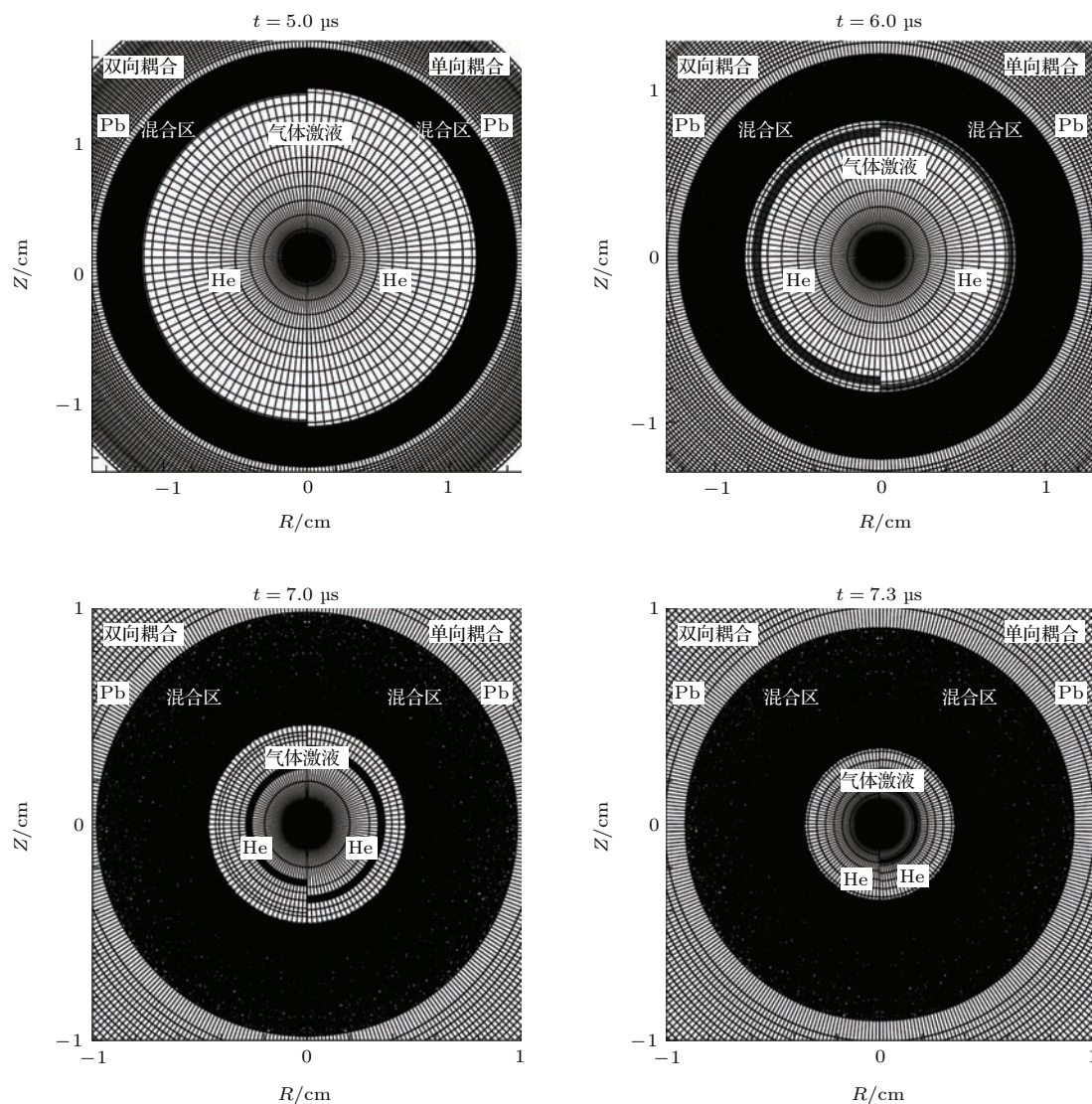


图5 圆柱模型气体激波传播的数值图像

Fig. 5. Numerical images of gas shock wave moving in the column model.

进一步从图6和图7中分析颗粒对气区流场反馈的定量影响. 结果表明, 对于我们关心的典型时刻, 双向耦合导致平面模型流场物理量增加的幅值不大, 流场速度增加幅值在4%以下, 压力增加幅值在6%以下, 密度增加幅值在3%以下, 温度增加幅值在4%以下; 圆柱模型增加的幅值较大, 流场速度增加幅度约9%, 压力增加幅度约18%, 密度增加幅度约6%, 温度增加幅度约16%. 由于气粒相间力作用, 产生了明显的压降效应, 流场

的均匀性变差, 特别对于圆柱模型, 压降可以达到0.0020 GPa/cm. 另外, 图7密度分布在 $Z = 0.6$ cm处出现下降趋势, $Z = 0.67$ cm时开始小于单向耦合时气区波后流场密度. 初步分析认为, 双向耦合使得混合区尾部附近温度较单向耦合时增加约13%, 而压力相差不大, 必然引起体积膨胀, 导致密度下降. 总之, 颗粒反馈效应将改变气区流场物理量的分布形态, 特别对于汇聚几何构型效应更加明显.

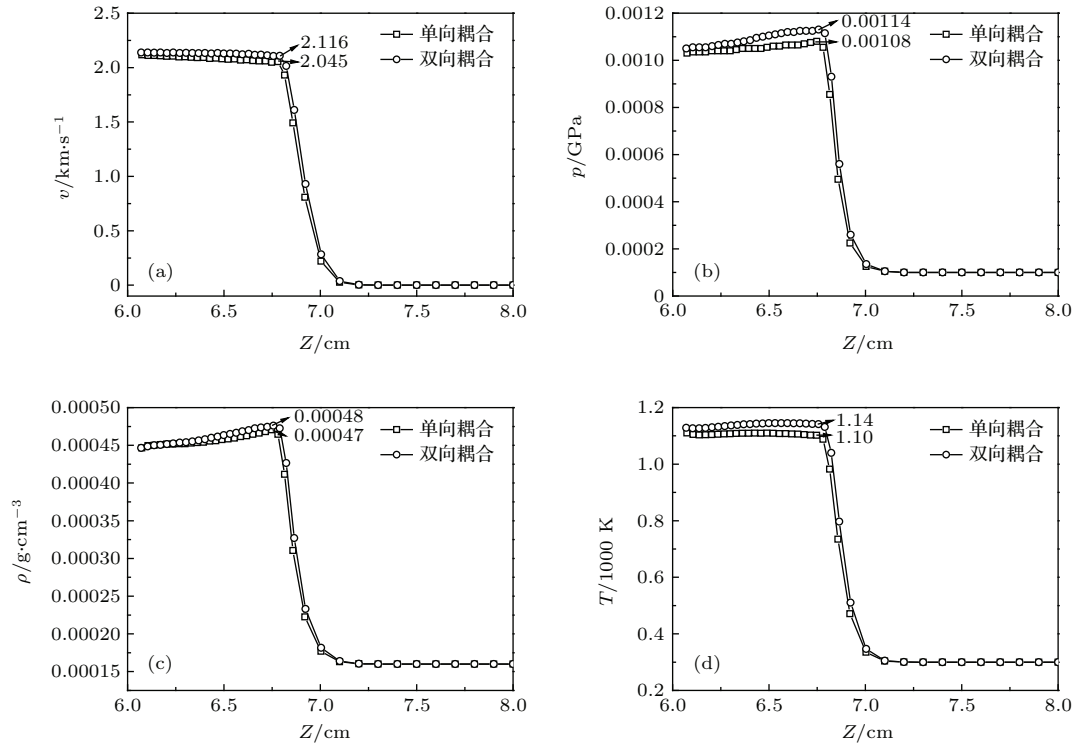


图6 平面模型气区流场物理量分布 (a) 速度; (b) 压力; (c) 密度; (d) 温度

Fig. 6. Physical distributions of gas in the plane model: (a) Velocity; (b) pressure; (c) density; (d) temperature.

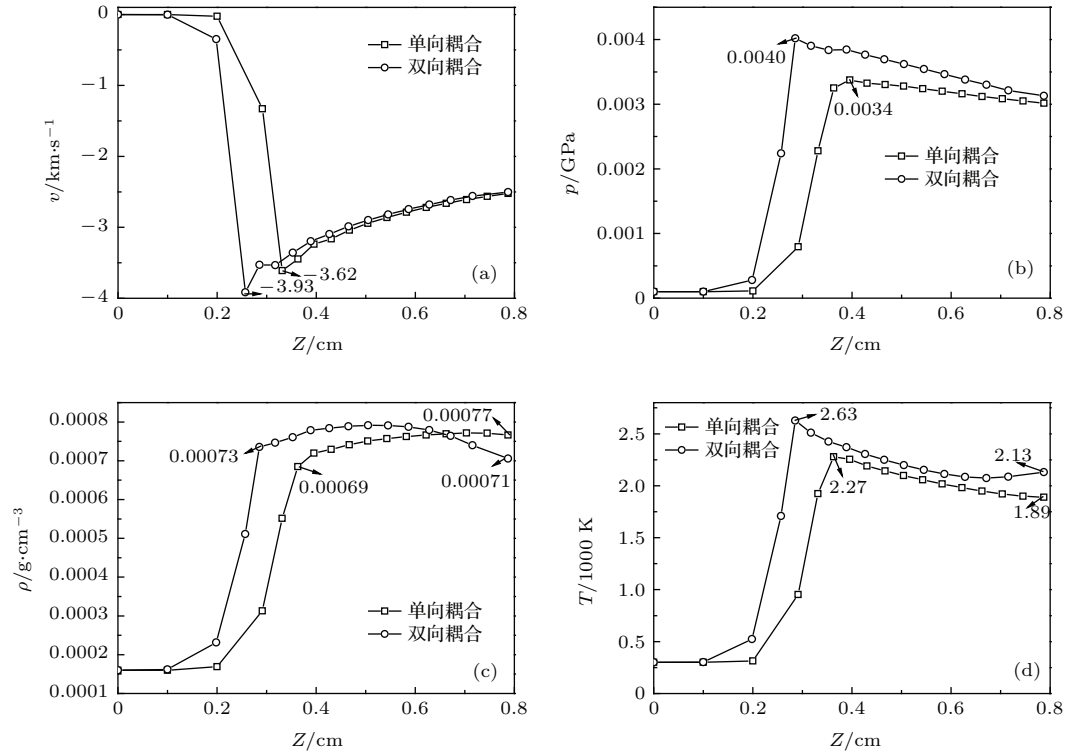


图7 圆柱模型气区流场物理量分布 (a) 速度; (b) 压力; (c) 密度; (d) 温度

Fig. 7. Physical distributions of gas in the column model: (a) Velocity; (b) pressure; (c) density; (d) temperature.

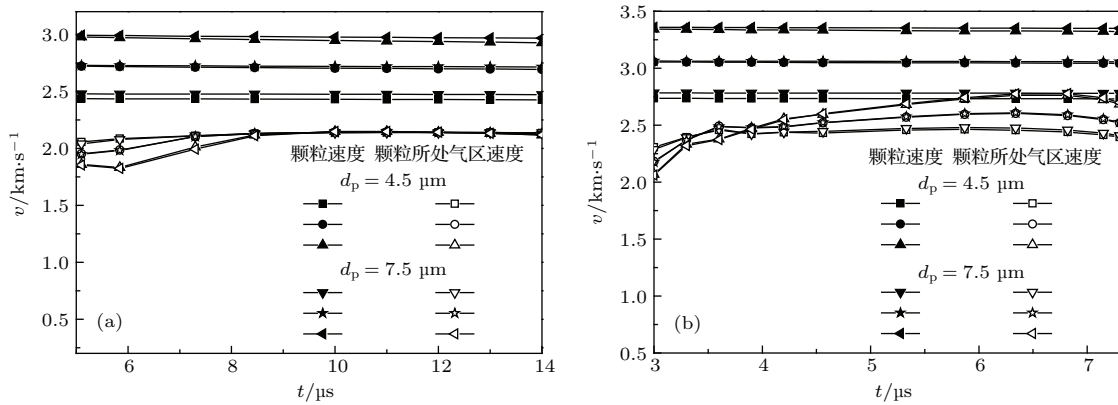


图8 典型颗粒速度以及相应位置处的气体速度历史 (a) 平面模型; (b) 圆柱模型

Fig. 8. Velocity histories of typical particles and the corresponding gas: (a) Plane model; (b) column model.

4 结 论

针对喷射混合研究中的气粒双向耦合问题, 开展理论建模及数值模拟研究. 建立了拉氏坐标系下的气粒双向耦合数学模型, 推导了控制方程组, 获得了耦合源项的物理含义, 给出了相应的离散算法和内爆驱动多介质-多相流程序框架; 通过对平面及圆柱模型的数值模拟, 发现了颗粒反馈导致气体激波提速的现象, 以及引起气区流场物理量分布形态发生改变; 特别对于汇聚构型装置, 几何收缩将放大颗粒的反馈效应, 可能对内爆压缩性能产生重要影响, 需要引起高度关注. 本文给出的模型适用于稀疏气粒两相流, 对于稠密气粒两相流以及实际工程应用问题, 颗粒碰撞、气动破碎等效应是后续要开展的工作.

参考文献

- [1] Asay J, Mix L, Perry F 1976 *J. Appl. Phys.* **29** 284
- [2] Wang P, Sun H Q, Shao J L, Qin C S, Li X Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234703 (in Chinese) [王裴, 孙海权, 邵建立, 秦承森, 李欣竹 2012 物理学报 **61** 234703]
- [3] Zellner M B, McNeil W V, Hammerberg J E, Hixson R S, Obst A W, Olson R T, Payton J R, Rigg P A, Routley N, Stevens G D, Turley W D, Veaser L, Buttler W T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 123502
- [4] Buttler W T, Oró D M, Preston D L, Mikaelian K O, Cherne F J, Hixson R S, Mariam F G, Morris C, Stone J B, Terrones G, Tupa D 2012 *J. Fluid Mech.* **703** 60
- [5] Fung J, Harrison A K, Chitanvis S, Margulies J 2013 *Comput. Fluids* **83** 177
- [6] Sun H Q, Wang P, Chen D W, Qin C S 2014 *Explosion and Shock Waves* **34** 392 (in Chinese) [孙海权, 王裴, 陈大伟, 秦承森 2014 爆炸与冲击 **34** 392]
- [7] Zhao X W, Li X Z, Wang X J, Song P, Zhang H Z, Wu Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124701 (in Chinese) [赵信文, 李欣竹, 王学军, 宋萍, 张汉钊, 吴强 2015 物理学报 **64** 124701]
- [8] Ye Y, Li J, Zhu P F, Qian W X, Liu Z Q, Wang X, Li X Z, Li Z Y, Li Z R, Zhong J 2013 *Chin. J. High Pressure Phys.* **27** 398 (in Chinese) [叶雁, 李军, 朱鹏飞, 钱伟新, 刘振清, 王晓, 李欣竹, 李作友, 李泽仁, 钟杰 2013 高压物理学报 **27** 398]
- [9] Chen Y T, Hu H B, Tang T G, Ren G W, Li Q Z, Wang R B, Buttler W T 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 053509
- [10] Sorenson D S, Minich R W, Romero J L, Tunnell T W, Malone R M 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5830
- [11] Elias P, Chapron P, Mondot M 1989 *In Shock Compression of Condensed Matter* (Elsevier Science Publishers) p783
- [12] Ogorodnikov V A, Ivanov A G, Mikhailov A L 1998 *Combust. Explo. Shock* **34** 696
- [13] Oró D M, Hammerberg J E, Buttler W T, Mariam F G, Morris C, Rousculp C, Stone J B 2012 *AIP Conf. Proc.* **1426** 1351
- [14] Furnish M D 2012 *Sandia Laboratories* SAND2012-1552 C
- [15] Rousculp C L, Oro D M, Morris C, Saunders A, Reass W, Griego J R, Turchi P J, Reinovsky R E 2015 *Damaged Surface Hydrodynamics (DSH) Flash Report* LA-UR-15-22889
- [16] Hu M B, Dang S C, Ma Q, Xia W D 2015 *Chin. Phys. B* **24** 074502
- [17] Gu X 2004 *M. S. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [顾旋 2004 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [18] Xiong Q G, Aramideh S, Passalacqua A, Kong S C 2015 *J. Heat. Trans.* **137** 061008
- [19] Yu H 2003 *Explosion and Shock Waves* **23** 493 (in Chinese) [喻虹 2003 爆炸与冲击 **23** 493]
- [20] Moshfegh A, Shams M, Ebrahimi R, Farnia M A 2009 *Int. J. Heat Fluid Fl.* **30** 1142

Numerical investigation on the influence of gas-particle two-way coupling to the shock fluid in the two-dimensional Lagrangian framework*

Chen Da-Wei¹⁾²⁾ Sun Hai-Quan¹⁾ Wang Pei^{1)†} Yu Xi-Jun¹⁾ Ma Dong-Jun¹⁾

1) (National Key Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

2) (Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

(Received 16 November 2015; revised manuscript received 4 January 2016)

Abstract

When an extreme shock wave releases from the free surface of the material, some high speed particulate matters will be ejected from the material body and enter into the background gas. This induced multiphase mixing phenomenon is known as the ejecta mixing. Ejecta mixing is one of the most important problems in the scope of inner explosive compression engineering, and it is also a frontier research subject of the impact dynamics, multiphase fluid dynamics, computational mathematics, etc. The properties of ejecta mixing have been investigated experimentally and analytically for many years. However, the results of numerical simulation are very rare. At present, the ejecta mixing study mainly focuses on the gas particle one-way coupling, that is, the interests of existing works are in the characteristics of the ejected particulate matter transport in the gas. In fact, after a large number of particles entering into the gas, the gas and the particles will interact with each other. So it is necessary to consider the feedback of particles to the gas. In this paper, the theoretical modeling of gas particle two-way coupling, the discrete algorithm of the mathematical model and the particle phase feedback effects on the gas shock wave propagation are investigated in the framework of Lagrangian coordinates. In order to obtain the details of ejecta movement, the particle trajectory model is chosen as the basic model, and then the governing equations including interactions between gas phase and particle phase are derived. For giving the specific calculation formula, the physical meanings of the coupled interaction source terms in the Lagrangian framework are analyzed and a stable numerical scheme is given based on the staggered strategy. We also devise two different computing models of ejecta mixing, the planar and the column configurations, and then the numerical simulations are carried out. The phenomenon of gas shock speed acceleration caused by particle feedback is found, and the distributions of the physical quantities, such as density, velocity, specific internal energy, pressure, in the gas area are changed. Especially for the convergent configuration, the feedback effects will be amplified further by the geometrical shrinkage, which may have a significant influence on the performance of the inner explosion compression, owing to the obvious uniformity variation of the gas flow field and the gas shock rebound in advance. The mathematical model, the numerical method and the new physical findings in this paper, will provide an important theoretical support for the in-depth understanding of the ejecta mixing and also for the solving of the corresponding engineering application problems.

Keywords: inner explosion and mixing, Lagrangian coordinates, particle trajectory model, two-way coupling

PACS: 47.40.Rs, 47.61.Jd, 47.40.-x, 42.50.Wk

DOI: 10.7498/aps.65.084703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1530261, 11571002), the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant Nos. 2015B0101021, 2015B0201043, 2013A0202011), the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. B1520133015), and the Foundation of State Key Laboratory of Computational Physics, China (Grant No. 42601-03-02).

† Corresponding author. E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn