

SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica

中国科学 物理学  
力学 天文学

第44卷 第11期 2014年11月 1127-1250 ISSN 1674-7275 CN 11-5848/N

中国科学院 主办  
国家自然科学基金委员会

# 《中国科学》《科学通报》

荣誉总主编：周光召      总主编：朱作言

## 《中国科学：物理学 力学 天文学》编辑委员会

主 编：王鼎盛 中国科学院物理研究所

张 杰 上海交通大学

常务副主编：龚旗煌 北京大学物理学院

副 主 编：

龙桂鲁 清华大学物理系

李树深 中国科学院半导体研究所

张肇西 中国科学院理论物理研究所

季向东 上海交通大学物理与天文系

金晓峰 复旦大学物理系

胡更开 北京理工大学宇航学院

洪友士 中国科学院力学研究所

徐仁新 北京大学物理学院

符 松 清华大学航天航空学院

景益鹏 上海交通大学物理与天文系

廖新浩 中国科学院上海天文台

编 委：

### 物理 I：凝聚态物理、原子分子物理、光物理和声学等

---

王力军 清华大学物理系

王 炜 南京大学物理学院

吕正红 加拿大多伦多大学材料科学与工程学院

刘 明 中国科学院微电子研究所

杨金龙 中国科学技术大学化学物理系

汪卫华 中国科学院物理研究所

张仁和 中国科学院声学研究所

张海澜 中国科学院声学研究所

张淑仪 南京大学物理学院声学研究所

张 靖 山西大学光电研究所

陈难光 清华大学凝聚态物理中心

金奎娟 中国科学院物理研究所

施 靖 美国加利福尼亚大学河滨分校物理和天文系

闻海虎 南京大学物理学院

洪明辉 新加坡国立大学工学院电器和计算机工程系

袁建民 国防科学技术大学理学院物理系

蒋红兵 北京大学物理学院

谢心澄 北京大学物理学院

戴 宁 中国科学院上海技术物理研究所

### 物理 II：理论物理、粒子物理、核物理等

---

王新年 美国劳伦斯伯克利实验室

左 维 中国科学院近代物理研究所

叶沿林 北京大学物理学院

任中洲 南京大学物理学院

庄鹏飞 清华大学物理系

许 怒 美国劳伦斯伯克利实验室

孙昌璞 中国工程物理研究院北京计算科学研究中心

李 森 中国科学院理论物理研究所

陈晓松 中国科学院理论物理研究所

罗民兴 浙江大学物理系 浙江近代物理中心

周善贵 中国科学院理论物理研究所

赵 鸿 厦门大学物理系

胡红波 中国科学院高能物理研究所

柳卫平 中国原子能科学研究院

费少明 首都师范大学数学科学学院

姚为民 美国劳伦斯伯克利实验室

贺贤土 北京应用物理与计算数学研究所

唐孝威 浙江大学物理系

黄超光 中国科学院高能物理研究所

盛政明 上海交通大学物理与天文系

## 力学

---

- |                                     |                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| <b>龙 勉</b> 中国科学院力学研究所               | <b>仲 政</b> 同济大学航空航天与力学学院         |
| <b>李少凡</b> 美国加州大学伯克利分校城市与环境工程系      | <b>李俊峰</b> 清华大学航天航空学院            |
| <b>李家春</b> 中国科学院力学研究所               | <b>杨基明</b> 中国科学技术大学近代力学系         |
| <b>吴锤结</b> 大连理工大学航空航天学院             | <b>邱志平</b> 北京航空航天大学固体力学研究所       |
| <b>余振苏</b> 北京大学工学院                  | <b>罗 宏</b> 美国北卡罗莱纳州立大学机械和航空航天工程系 |
| <b>金栋平</b> 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 | <b>郑晓静</b> 西安电子科技大学              |
| <b>赵亚溥</b> 中国科学院力学研究所               | <b>胡 晖</b> 美国爱荷华州立大学航空航天工程系      |
| <b>茹重庆</b> 加拿大阿尔伯特大学机械工程系           | <b>廖世俊</b> 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院     |

## 天文学

---

- |                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| <b>毛淑德</b> 中国科学院国家天文台        | <b>朱 紫</b> 南京大学天文与空间科学学院       |
| <b>汲培文</b> 国家自然科学基金委员会       | <b>严隽琛</b> 美国密苏里大学哥伦比亚分校物理与天文系 |
| <b>李立新</b> 北京大学科维理天文与天体物理研究所 | <b>李爱根</b> 美国密苏里大学哥伦比亚分校物理与天文系 |
| <b>肖 龙</b> 中国地质大学(武汉)地球科学学院  | <b>邹振隆</b> 中国科学院国家天文台          |
| <b>张双南</b> 中国科学院高能物理研究所      | <b>张思炯</b> 中国科学院南京天文光学技术研究所    |
| <b>陈鹏飞</b> 南京大学天文与空间科学学院     | <b>周又元</b> 中国科学院国家天文台          |
| <b>钱永忠</b> 美国明尼苏达大学物理与天文系    | <b>高 煜</b> 中国科学院紫金山天文台         |
| <b>葛 健</b> 美国佛罗里达大学天文系       | <b>韩占文</b> 中国科学院云南天文台          |

## 《中国科学：物理学 力学 天文学》编辑部

- 地 址：** 北京东黄城根北街16号 《中国科学》杂志社, 100717
- 网 址：** www.scichina.com phys.scichina.com
- 电 话：** (010) 64015835 (编辑部)      **电子信箱：** physics@scichina.org (编辑部)  
(010) 64019709 (发行部)      sales@scichina.org (发行部)  
(010) 64008316 (广告部)      ads@scichina.org (广告部)
- 传 真：** (010) 64016350
- 主 任：** 黄延红
- 责任编辑：** 王 维 朱全斌 侯修洲 郭媛媛
- 封面设计：** 胡 煜



第 44 卷 第 11 期 2014 年 11 月

目 次

评述

光学

- 表面等离激元光学力研究进展 ..... 1127  
杨翠, 魏少鹏, 童廉明

凝聚态物理学

- “1111”型稀磁半导体的研究进展 ..... 1140  
丁翠, 宁凡龙

等离子体物理学

- 大气压介质阻挡放电等离子体射流源研究进展 ..... 1157  
聂秋月, 张晓菲, 李和平, 包成玉

论文

光学

- 部分相干径向偏振光束在自由空间中的传输 ..... 1170  
陈顺意, 丁攀峰, 蒲继雄

凝聚态物理学

- $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$  纳米颗粒的铁磁相变临界行为研究 ..... 1181  
张莉, 刘果红, 唐震, 邓燕, 李义宝, 余江应, 朱雪斌

---

**封面说明** 封面取自国画“无尽无极”，是著名画家吴作人先生为李政道先生所作。它体现了深奥的中国传统的自然观：宇宙产生于似乎是静态的阴阳两极对峙——似静欲动的太极结构孕育着巨大的能量，展现出人与自然的和谐统一。现在它已成为北京正负电子对撞机的徽标。非常感谢李政道先生和中国科学院高能物理研究所同意我们将“无尽无极”用作本刊的封面。

---

## 量子物理学

- 利用部分纠缠的量子信道确定性地实现  $N-1$  和  $1-N$  的受控量子远程旋转..... 1187  
陈立冰, 路洪

## 固体力学

- 基于振动的亚微米阵列薄膜弹性参数辨识..... 1196  
方辉, 澄川贵志, 北村隆行

## 流体力学

- 绕射激波和反射激波冲击下的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性..... 1203  
刘金宏, 邹立勇, 廖深飞, 曹仁义, 王彦平, 谭多望

## 爆炸力学

- 分裂算法对准爆轰波数值模拟的影响..... 1213  
刘云峰, 姜宗林

## 计算力学

- 一种不依赖失效路径的结构体系可靠度分析方法..... 1220  
杨绿峰, 吴文龙, 余波

## 射电天文学

- TM65 m 射电望远镜副面随动模型及性能评估..... 1232  
王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 董健, 左秀婷, 苟伟, 刘庆会, 范庆元

## 星系与宇宙学

- M87 的 TeV 辐射光变..... 1241  
袁业飞, 王亚轲, 李彦荣, 王建民

## 快报

## 光学

- 用斜入射光反射差法检测和研究美拉德反应..... 1247  
王旭, 戴俊, 孔艳, 朱焯炜, 吕惠宾



## 论文

## 分裂算法对准爆轰波数值模拟的影响

刘云峰\*, 姜宗林

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190

\*联系人, E-mail: liuyunfeng@imech.ac.cn

收稿日期: 2013-11-17; 接受日期: 2014-05-27

国家自然科学基金资助项目(批准号: 909016028)

**摘要** 本文分析了数值模拟中的分裂算法的特性及其对燃烧模拟结果的影响. 跟理论结果相比, 分裂算法会造成系统动量的不守恒. 提出了对数值结果进行修正的模型, 利用该模型, 模拟得到了准爆轰波. 分析了准爆轰波的热力学特性, 表明准爆轰波是热壅塞的, 是声速附近的加热流动. 模拟得到的准爆轰波特性跟实验结果吻合得很好, 表明本文所讨论的物理问题及所提出的模型是准确的.

**关键词** 爆轰波, 准爆轰波, 燃烧, 分裂算法

**PACS:** 47.70.Fw, 47.40.-x, 02.60.Cb

**doi:** 10.1360/SSPMA2013-00031

## 1 引言

在爆轰波的实验研究中, 除了 CJ 爆轰波外, 人们经常会发现一种奇怪的现象, 就是以大约 50% CJ 爆速传播的准定常波, 被叫做准爆轰波<sup>[1-6]</sup>. 实验结果表明, 准爆轰波的波面结构与 CJ 爆轰波的波面结构完全不同, 激波面与火焰面之间的距离很长, 呈现出双间断结构, 具有准一维特性. 而且, 准爆轰波与 CJ 爆轰波的转变是突变的, 二者之间不存在其他类型的传播状态.

人们对准爆轰波的机理进行了深入的实验研究, 并对其特征有了深刻的认识. Wagner 通过光学方法发现, 准爆轰波波面的传播轨迹与燃烧产物的  $c_+$  特征线几乎是平行的, 而且其传播速度非常接近于燃烧产物的声速<sup>[7]</sup>. 朱雨建等人<sup>[8]</sup>通过热力学分析后发现, 准爆轰波面的热力学状态不是激波后的理论状态,

受前导激波和燃烧产物的共同影响, 其传播机理无法用经典的 ZND 理论解释. Lee 认为, 准爆轰波的热力学状态应该是热壅塞的<sup>[9]</sup>.

虽然对准爆轰波有很多实验研究结果, 但是, 现在还没有数值模拟结果能够模拟得到准爆轰波, 并准确解释其传播机理. Gordon 和 Sivashinsky<sup>[10]</sup>认为, 准爆轰波是由于管壁阻力造成的, 需要在动量方程中引入阻力源项. 因此, 他们构造了这样一个模型. 但是, 如果是阻力引起的, 那么准爆轰波可以得到任意的传播速度, 不会在 50% CJ 爆速与 CJ 爆速之间突变. 后来, 他们又引入了能量耗散项<sup>[11]</sup>, 但是, 只能用于简化的理论分析, 无法直接用于数值模拟研究.

本文认为, 准爆轰波的物理机理是热壅塞, 而数值模拟无法得到准爆轰的关键在于数值方法的问题. 在流动燃烧的控制方程中, 热量的释放是通过在 N-S

**引用格式:** 刘云峰, 姜宗林. 分裂算法对准爆轰波数值模拟的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 1213-1219

Liu Y F, Jiang Z L. Influence of operator-splitting algorithm on numerical simulation of quasi-detonation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 1213-1219, doi: 10.1360/SSPMA2013-00031

方程或 Euler 方程的能量守恒方程中增加源项的方法实现的. 能量守恒方程要与质量守恒和动量守恒方程同时耦合求解, 这样就可以求得燃烧放热后的流场状态. 这一控制方程是由钱学森等人<sup>[12]</sup>在 1949 年首先提出的, 当时提出该方程的目的是用来研究超声速燃烧. 在此之后, 很多学者对该方程的性质进行了研究, 并发展了等截面加热管流理论<sup>[13]</sup>.

而现在的数值模拟却采用了分裂算法. 所谓分裂算法, 就是将流动过程和加热过程解耦. 第一步, 先让无化学反应的流体流动, 得到流体的密度和速度; 第二步, 让流体保持密度和速度不变, 将热量加进去, 提高了流体的压力和温度. 在这一步中, 流体的密度和速度不变, 实际上就是等容燃烧过程.

本文认为, 分裂算法模拟得到的数值结果跟等截面加热管流的理论结果是有差别的, 分裂算法会造成系统动量的不守恒. 动量不守恒对最终结果的影响根据初始状态的不同而不同, 在声速流动附近最明显, 会导致定性不准. 本文根据等截面加热管流理论对数值结果进行了修正, 提出了一个新的准爆轰波模型, 通过一维数值模拟得到了准爆轰波, 其热力学特性跟实验结果吻合得很好.

## 2 控制方程和物理模型

一维控制方程是 Euler 方程, 化学反应采用 Arrhenius 形式的总包一步有限速率的化学反应模型, 忽略了黏性、扩散和热传导过程.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S, \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e \\ \rho Z \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (\rho e + p)u \\ \rho u Z \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$e = \frac{p}{(\gamma-1)\rho} + \frac{u^2}{2} + Zq, \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = -K\rho Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (4)$$

其中,  $\rho, u, e, Z, q$  分别是密度、速度、总焓、反应物的质量分数和单位质量放热量.  $\dot{\omega}$  是燃烧产物的质量生成率,  $K$  是指前系数,  $T$  是温度,  $E_a$  是活化能.

在数值模拟中, 由于是采用分裂算法, 首先根据质量守恒方程计算得到密度, 再根据动量守恒方程计算得到速度, 最后, 保持密度和速度不变, 根据能量守恒方程计算得到压力和温度. 前两步是没有化学反应的流动, 燃烧放热就是在第三步完成的.

本文认为, 根据等截面加热管流理论对流动燃烧的解释, 这时候计算出来的状态是不准确的, 包括压力、温度、速度、密度、马赫数等所有参数都要变化. 这时候, 就需要提出一个物理模型, 来对流场参数进行修正. 假设  $\rho, u, p$  是分裂算法计算得到的密度、速度和压力, 而设  $\rho', u', p'$  是物理值,  $C$  是常数, 那么根据质量守恒定理

$$\rho' = \frac{1}{C}\rho, \quad (5)$$

$$u' = Cu, \quad (6)$$

将式(5)和(6)带入到能量方程(3)中, 得到新的能量方程(7), 最终简化后得方程(8)

$$e' = \frac{p'}{(\gamma-1)\rho'} + \frac{u'^2}{2} = \frac{Cp'}{(\gamma-1)\rho} + \frac{C^2u^2}{2}, \quad (7)$$

$$e = \frac{e'}{C} = \frac{p'}{(\gamma-1)\rho} + \frac{Cu^2}{2} + Zq. \quad (8)$$

本文就是使用新的能量方程(8)来模拟得到准爆轰波. 与传统控制方程不同之处在于, 将方程(8)带入到控制方程(2)中, 线性化分解后, 就会得到如下两个方程(9)和(10):

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho e + p)u}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho \left[ \frac{(C-1)u^2}{2} \right]}{\partial t} + \frac{\partial \rho \left[ \frac{(C-1)u^2}{2} \right] u}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

可见, 方程(9)就是控制方程(2)中的能量守恒方程, 而方程(10)是一个附加的能量对流方程. 它同能量守恒方程的本质区别在于, 原来的方程本质上是压力驱动流动, 而方程(10)中则没有压力项. 这表明, 在修正模型中, 有一个动能的对流过程, 这是分裂算法的等容燃烧假设造成的.

进一步解释分裂算法对整个系统造成的影响. 文献[2]给出了详细的理论分析, 包括微分形式的控



制方程和积分形式的控制方程. 无论哪种控制方程, 能量方程只表明系统的总焓是增加的, 没有其他任何假设. 为了对系统进行求解, 在微分方程中, 是通过联立求解8个线性方程组得到结果的. 在积分方程中, 是从动量守恒方程出发, 以动量守恒方程作为约束条件, 得到燃烧后的各个物理量的. 也就是说, 理论结果是严格保证动量守恒的. 而在CFD中, 由于采用了分裂算法, 采用了“等容燃烧”的假设, 必然导致系统的动量不守恒.

动量不守恒对结果的影响根据初始状态的不同而不同, 在声速点附近的偏差最大. 对CJ爆轰波影响小, 因为CJ爆轰波接近于等容燃烧. 对亚声速燃烧波的影响也小, 因为气体的速度很低. 换言之, 加热量是一个过程量, 而不是状态量. 而在CFD中, 忽略了加热过程, 把加热量当成状态量来简单处理, 必然会带来误差. 本文提出的模型就是从理论出发, 对数值结果造成的系统动量不守恒的一个定性的修正.

### 3 数值格式和初边值条件

对准爆轰波进行了一维数值模拟研究. 计算域是一维管道, 左端是封闭的. 空间方向上采用了三阶ENO格式离散, 对矢量通量进行了Steger-Warming分解. 时间方向上采用三阶TVD Runge-Kutta法. 壁面采用反射边界条件. 爆轰气体为满足化学反应当量比的氢气/空气预混气体, 初始压力是1 atm, 初始温度是300 K. 爆轰波是通过高温高压气体在左端点燃的, 形成过驱爆轰波, 并一直发展到稳定状态. 开展了网格分辨率研究, 网格尺度分别为0.1和0.05 mm. 混合气体的参数见式(11).

$$\begin{cases} Z = 1.0, \\ \gamma = 1.29, \\ R = 368.9 \text{ J/(kg K)}, \\ q = 2.72 \times 10^6 \text{ J/kg}, \\ E_a = 4.794 \times 10^6 \text{ J/kg}, \\ K = 7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}. \end{cases} \quad (11)$$

### 4 结果与讨论

公式(8)中参数C的准确表达式目前还没有办法给出. 在计算中, 假设C为常数, 来定性研究流场

的变化. 图1给出了不同参数下的爆轰波传播速度. 计算网格为0.1 mm. 可以看出, 当C=1时, 爆轰波的传播速度为1950 m/s, 就是混合气体的CJ爆速. 也就是说, 用分裂算法可以模拟出CJ爆轰波. 这和等截面加热管流理论预测是一致的. 随着C继续增大, 直到C=2.7, 爆速基本保持在1800 m/s左右, 约为90% CJ爆速, 这一传播速度在实验中是经常被发现的.

但是, 当C增大到2.8时, 流场发生了突变, 爆轰波的传播速度突然降低为1050 m/s, 约为CJ爆速的一半, 并保持稳定传播, 这就是准爆轰波. 图2给出了不同网格下的传播速度, 同样模拟得到了准

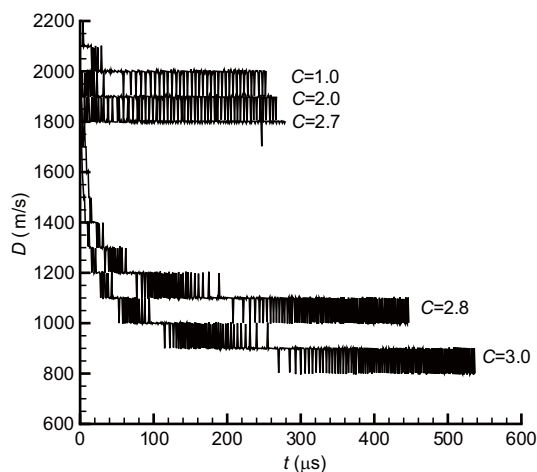


图1 不同参数C下的爆轰波传播速度(dx=0.1 mm)  
Figure 1 Detonation speeds at different parameter C (dx=0.1 mm).

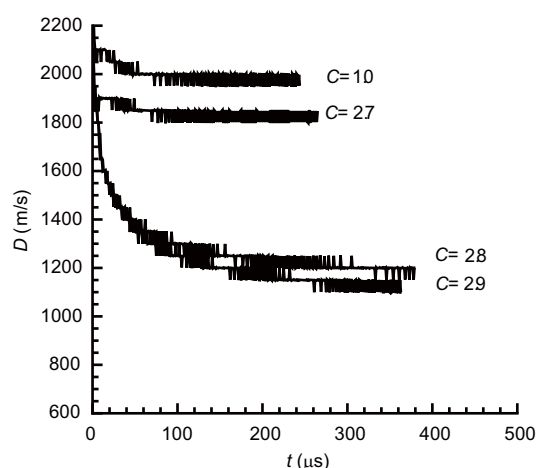


图2 不同参数C下的爆轰波传播速度(dx=0.05 mm)  
Figure 2 Detonation speeds at different parameter C (dx=0.05 mm).



爆轰波, 表明这不是由于网格边界条件等参数引起的, 而是方程固有的特性. 从速度的变化可以看出, 虽然分裂算法有一定的误差, 但是, 在一定的范围内, 其影响还是非常小的, 比如  $C \leq 2.7$ , 对传播速度的影响小于 10%. 只有在流场的性质发生剧烈变化时, 才有显著的影响.

图 3 给出了 CJ 爆轰波的波面压力曲线. 可见, 波面的压力为 15 atm, 为 CJ 压力值. 速度为零的点位于距离中间的位置, 左端的平台压力为 5.2 atm. 这是典型的 CJ 爆轰波的压力曲线. 图 4 给出了准爆轰波的压力曲线, 可以看出, 跟图 3 的形状完全不同, 波面压力降为 6 atm, 左端平台压力降为 4.5 atm. 压

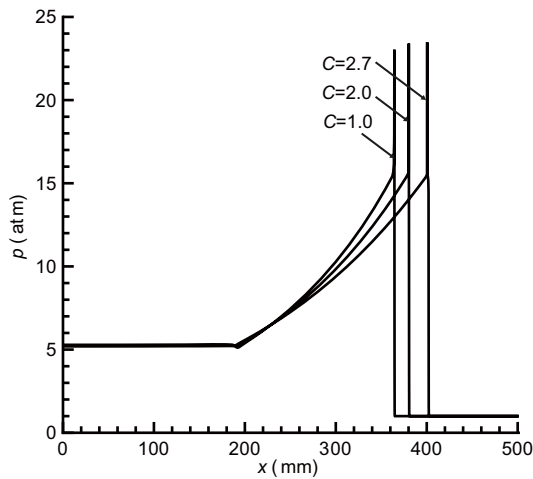


图 3 CJ 爆轰波的压力曲线  
Figure 3 Pressure profiles of CJ detonation.

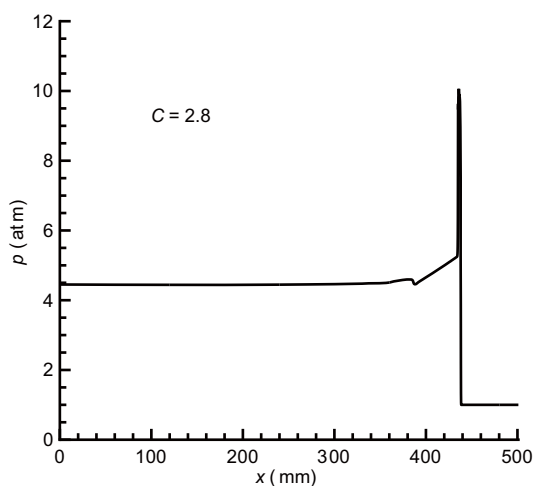


图 4 准爆轰波的压力曲线  
Figure 4 Pressure profile of quasi-detonation.

力曲线形状不同, 表明二者的热力学特性截然不同.

准爆轰波波面的温度曲线绘于图 5 之中, 同时还给出了参数  $Z$  的曲线(虚线表示), 用来标明火焰面的位置. 可以看出, 准爆轰波面为双间断结构, 分别为入射激波和放热面. 双间断将波面分成了三个区, 这和试验观察到的结果是一致的. 在入射激波和火焰面之间的区域, 其温度值并不是入射激波后诱导的温度值, 而是有所下降. 这个区域的产生就是因为本模型中包含有方程(10)这一过程.

这一结果和一维加热管流的理论解释是定性一致的. 一维加热管流理论认为, 对亚声速加热, 当马赫数大于一定值时, 加热会使温度下降. 这是因为, 尽管气体受到加热, 但是气体的动能增加很快, 此时气体的静焓增加已经抵不上气体动能的增加, 因此虽然加热, 但是气体的静温反而下降. 图 6 给出了与图 5 对应的速度和声速的曲线. 可以看出, 在中间区域, 气体的速度增加, 声速降低. 气体的平均速度为 1000 m/s, 同准爆轰波的传播速度相当.

最后, 来讨论一下声速面的情况. 图 7 给出了 CJ 爆轰波面的速度和声速曲线, 爆轰波从左向右传播. 可以看出, 在 CJ 爆轰波面上, 刚开始时是亚声速燃烧, 等反应结束时, 刚好到达声速状态, 即满足 CJ 理论. CJ 理论认为, 燃烧后的马赫数正好是声速. 而后, 稀疏波迅速将气体的速度降低, 稀疏波传播到声速点停止, 不会对爆轰波面造成影响. 从图上可以看出, CJ 爆轰波面非常窄, 宽度只有 0.1 mm.

图 8 给出了 90% CJ 爆轰波( $C=2.7$ )的波面速度和

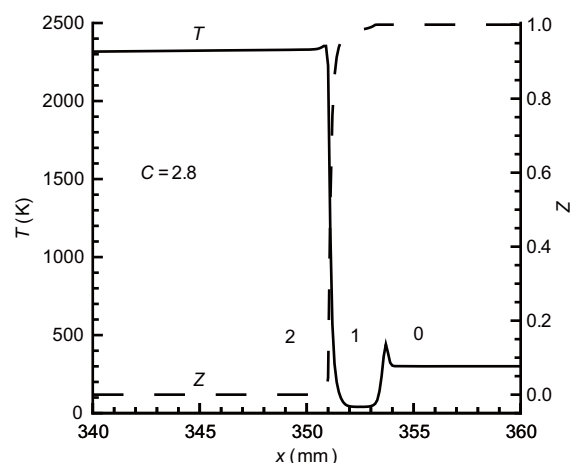


图 5 准爆轰波的温度曲线  
Figure 5 Profiles of temperature and parameter  $Z$  of quasi-detonation.

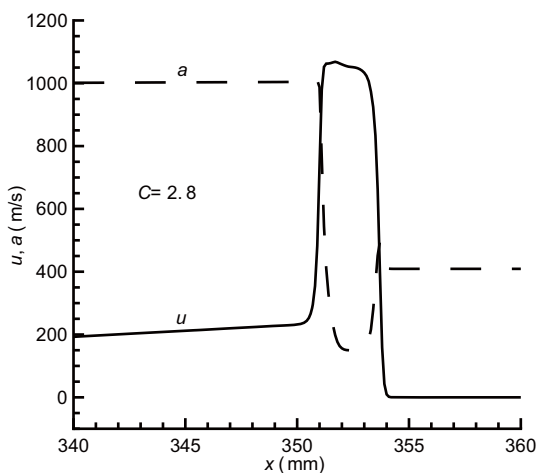


图6 准爆轰波的气体速度和声速曲线

Figure 6 Velocity and sound speed profiles of quasi-detonation.

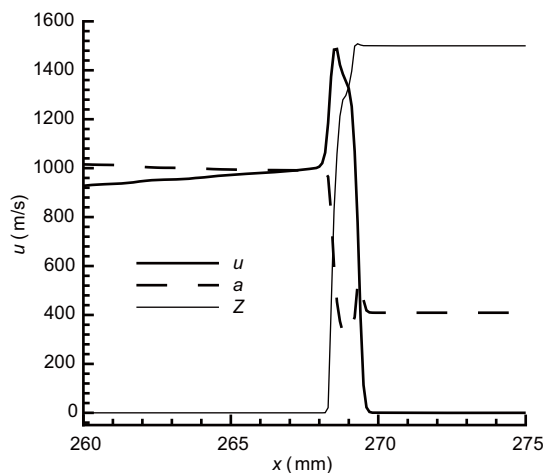


图8 90% CJ爆轰波波面的气体速度和声速曲线

Figure 8 Gas velocity and sound speed at the front of 90% CJ detonation.

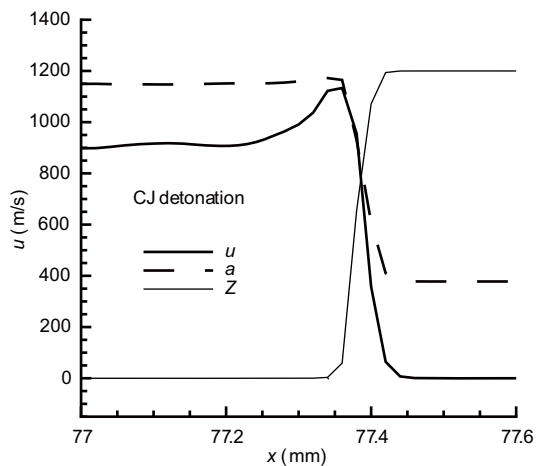


图7 CJ爆轰波波面的气体速度和声速曲线

Figure 7 Gas velocity and sound speed at the front of CJ detonation.

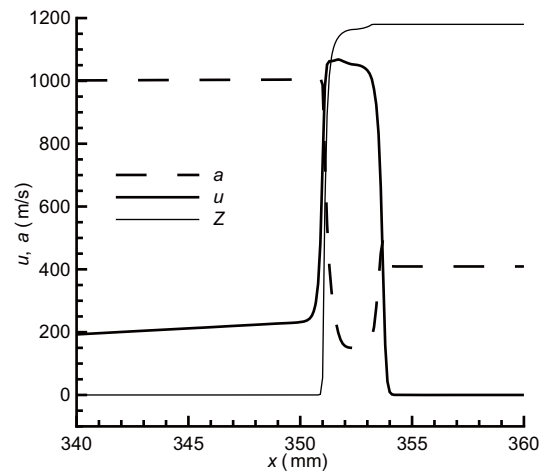


图9 准爆轰波波面的气体速度和声速曲线

Figure 9 Gas velocity and sound speed at the front of quasi-detonation.

声速曲线, 其中还包括参数  $Z$  的曲线, 用来标明火焰面的位置. 可以看出速度和声速有两个相交点, 即两个声速面. 第一个声速面表明气体膨胀到超声速. 第二个声速面正好对应  $Z=0$  的情况, 表明放热结束后, 流体刚好达到声速, 即 CJ 状态. 随后, 稀疏波将燃烧气体的速度降低, 但只能影响到声速点, 不会影响爆轰波的自维持传播.

图9给出了准爆轰波的波面结构, 同样给出了参数  $Z$  的变化曲线. 结构同图8基本相同, 但是可以清楚地看出, 在放热结束前气体就达到了声速点, 即热壅塞状态. 可见, 在热力学上, 准爆轰波的确是热壅塞的, 从而证明了摘要中的假设. 同时还说明, 声速

面的准确模拟对于研究流动燃烧现象是非常重要的. 放热发生在声速点的两侧, 一方面波的传播速度要降低, 另外, 波不能够自维持稳定传播, 稀疏波会不断地将波速降低. 从图上还可以看出, 同 CJ 爆轰波相比, 准爆轰波的波面非常宽, 宽度为 4 mm.

上述分析表明, 一个能够自维持地稳定传播燃烧波(无论是 CJ 爆轰波还是准爆轰波), 一定有一个声速面的存在, 该声速面隔绝了后面的稀疏波对前导波面的侵蚀作用. 本研究提出的物理模型恰恰能够反映这一点, 这是准爆轰波传播的本质, 热壅塞流动.

## 5 结论

本文分析了分裂算法的特性及其对爆轰波和准爆轰波数值模拟结果的影响. 研究表明, 现在的数值模拟方法在模拟流动燃烧过程中, 由于所用的分裂算法采用等容燃烧假设, 会造成系统动量不守恒, 不能够完全准确地模拟燃烧复杂流场, 尤其是接近声速流动和热壅塞流动.

在此基础上, 提出了一个简化的模型来修正分裂算法带来的误差. 利用该模型模拟得到了准爆轰

波, 数值结果同实验结果定性吻合得很好. 通过对准爆轰的热力学特性分析可以发现, 准爆轰波的热力学特性是热壅塞的.

需要说明的是, 新模型只是定性地给出了表达式, 还没有给出详细的物理参数描述. 而且准爆轰波的实验研究非常困难, 无法给出波面的准确的热力学参数分布, 如温度分布和密度分布等, 数值结果无法与实验结果进行定量比较和相互验证. 因此, 对于准爆轰和分裂算法, 还需要开展进一步的深入研究.

## 参考文献

- 1 Dupre G, Peraldi O, Lee J H S, et al. Propagation of detonation waves in an acoustic absorbing walled tube. *Prog Astronaut Aeronaut*, 1988, 114: 248–263
- 2 Lee J H S, Knystautas R, Chan C K. Turbulence flame propagation in obstacle-filled tubes. *Proc Combust Inst*, 1985, 20(1): 1663–1672
- 3 Teodorczyk A, Lee J H S. Detonation attenuation by foams and wire meshes linking with walls. *Shock Waves*, 1995, 4(4): 225–236
- 4 Radulescu M I, Lee J H S. The failure mechanism of gaseous detonations: Experiments in porous wall tubes. *Combust Flame*, 2002, 131(1-2): 29–46
- 5 Chue R S, Lee J H S, Scarinci T, et al. Transition from fast deflagration to detonation under the influence of wall obstacles. *Prog Astronaut Aeronaut*, 1993, 153: 270–282
- 6 Chao J, Lee J H S. The propagation mechanism of high speed turbulence deflagrations. *Shock Waves*, 2003, 12(4): 277–289
- 7 Wagner H G. Some experiments about flame acceleration. In: *The Proceedings of first International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions*. Montreal, 1982. 77–99
- 8 Zhu Y J, Yang J M, Lee J H S. Structure and behavior of the high-speed deflagration generated by a detonation wave passing through a perforated plate (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2008, 28(2): 97–104 [朱雨建, 杨基明, Lee J H S. 爆轰波透射孔栅形成的高速爆燃波的结构和行为. *爆炸与冲击*, 2008, 28(2): 97–104]
- 9 Lee J H S. The propagation of turbulent flame and detonations in tubes. In: *Advances in Chemical Reaction Dynamics*. Rentzepis P M, Capellos C, eds. Berlin: Springer, 1986. 345–387
- 10 Gordon P V, Sivashinsky G I. Pressure diffusivity and low-velocity detonation. *Combust Flame*, 2004, 136(4): 440–444
- 11 Brailovskya I, Sivashinskya G. Effects of momentum and heat losses on the multiplicity of detonation regimes. *Combust Flame*, 2002, 128(1-2): 191–196
- 12 Tsien H S, Beilock M. Heat source in a uniform flow. *J Aeronaut Sci*, 1949, 16(12): 756–757
- 13 童秉刚, 孔祥言, 邓国华. 气体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1989. 98–108

# Influence of operator-splitting algorithm on numerical simulation of quasi-detonation

LIU YunFeng\* & JIANG ZongLin

*The State Key Laboratory of High Temperature Gasdynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100190, China*

In this paper, the characters of operator-splitting algorithm in numerical simulations of combustion are analyzed. In numerical simulations, the combustion is handled using an operator-splitting algorithm so that during each time step the motionless fluid is first allowed to react at constant volume and then subsequently the nonreactive fluid is allowed to convert. This algorithm would violate the conservation of momentum of the combustion system. Therefore, a correction model is introduced to correct the numerical results of operator-splitting algorithm. Quasi-detonation is a special combustion phenomenon which is frequently observed in experiments. But its mechanism cannot be simulated by the conventional operator-splitting algorithm. In this research, quasi-detonation is simulated by using this correction model, which is in good agreement with experimental results. The thermodynamic characters of quasi-detonation show that it is thermally choked. These results show that the problem posed and the correction model introduced are correct.

**detonation, quasi-detonation, combustion, operator-splitting algorithm**

**PACS:** 47.70.Fw, 47.40.-x, 02.60.Cb

**doi:** 10.1360/SSPMA2013-00031

# 征 稿 简 则

**简介:** 《中国科学: 物理学 力学 天文学》(中文版)和 *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*(英文版)是中国科学院和国家自然科学基金委员会共同主办、《中国科学》杂志社出版的学术刊物, 主要报道物理学、力学和天文学基础研究与应用研究等方面具有创新性和高水平的最新研究成果, 月刊.

**收录情况:** 《中国科学: 物理学 力学 天文学》与其英文版 *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy* 是两个完全独立的刊物, 前者被《中国科学引文数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国科技论文与引文数据库》和《中国数字化期刊群》等收录, 并进入《中文核心期刊要目总览》; 后者被 SCI, EI, Astrophysics Data System, Current Contents, Google Scholar, Index to Scientific Reviews, INSPEC, Mathematical Reviews, MathSciNet 等收录.

**栏目:** 《中国科学: 物理学 力学 天文学》设有以下 4 个栏目:

**评述:** 综述所研究领域的代表性成果和研究进展, 评论研究现状, 提出今后研究方向的建议. 要求作者在该领域从事过系统的研究工作, 或者所做工作与该领域的研究紧密相关(10000 字左右, 附 600 字左右的摘要).

**论文:** 报道物理学、力学和天文学各领域具有创新性、高水平 and 重要科学意义的最新科研成果(8000 字左右, 附 300 字左右的摘要).

**快报:** 简明扼要地及时报道物理学、力学和天文学各领域具有创新性和新颖性的科研成果(4000 字左右, 附 300 字左右的摘要).

**评论:** 评介过去或近期在本刊或国内外重要刊物上发表的重要研究成果(1500 字左右, 附 200 字左右的摘要).

**投稿:** 请使用在线投稿的方式, 访问本刊网站 [www.scichina.com](http://www.scichina.com) 或 [phys.scichina.com](http://phys.scichina.com), 点击“作者投稿系统”, 进入“学术期刊管理系统”, 首次投稿时需注册一个“作者账户”. 注册完成之后, 按照提示与引导进行投稿. 如果不能在线投稿, 请与编辑联系, 另行约定投稿方式. 本刊编委可推荐经其本人审阅后的稿件, 如同意见名推荐该稿件(首页注明“xxx推荐”或“Recommended by xxx”), 经核实后送主编终审. 编委本人作为作者参与的论文并同意具名负责的稿件(首页注明“xxx供稿”或“Contributed by xxx”)同样办法处理. 专业主编将依据稿件的具体情况尽快予以答复.

**审稿:** 稿件将由编委会组织同行专家进行评审, 并做出录用与否的决定. 评审过程大约需要 60~90 天. 评审结束后, 无论录用与否, 编辑部将及时向作者转达评审意见. 作者若在 90 天内没有收到编辑部有关稿件的取舍意见, 请及时与编辑部联系. 作者在通知编辑部后, 可以改投他刊. 本刊不受理“一稿多投”之稿件.

**文章署名:** 通讯作者应保证稿件内容经全体作者认可并同意署名. 投稿后, 署名的改变要有全体原作者签名同意的书面材料.

**录用:** 稿件被录用后, 全体作者必须签署“著作权转让声明书”, 将该论文(各种语言版本)所享有的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权在全世界范围内转让给《中国科学: 物理学 力学 天文学》的出版单位《中国科学》杂志社. 全体著作权人授权《中国科学》杂志社根据实际需要独家代理申请上述作品的各种语言版本(包含各种介质)的版权登记事项. 著作权转让声明书可以从本刊网站上下载.

## 中国科学 物理学 力学 天文学

SCIENTIA SINICA Physica, Mechanics & Astronomica

第 44 卷 第 11 期 2014 年 11 月出版

版权所有, 未经许可, 不得转载

主 管	中 国 科 学 院	出 版	《中国科学》杂 志 社
编 辑	中 国 科 学 院 《中国科学》编辑委员会	印刷装订	北京中科印刷有限公司
	北京(100717)东黄城根北街 16 号	总发行处	北京报刊发行局
主 编	王鼎盛 张杰	订 购 处	全 国 各 邮 电 局 《中国科学》杂志社发行部

刊号: ISSN 1674-7275 代号: 国 外 BM40G 每 期 定 价: 138.00 元 全 年 定 价: 1656.00 元  
CN 11-5848/N 国内邮发 80-211

广告经营许可证: 京东工商广字第 0429 号

国内用户可登录

<http://phys.scichina.com>

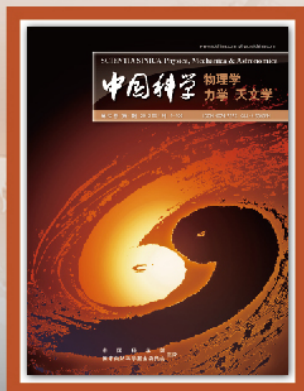
免费下载

Free Download

主管：中国科学院 | 主办：中国科学院 国家自然科学基金委员会 | 出版：《中国科学》杂志社  
SCIENCE CHINA PRESS

主编：王鼎盛

[www.scichina.com](http://www.scichina.com) | [www.springer.com/scp](http://www.springer.com/scp)



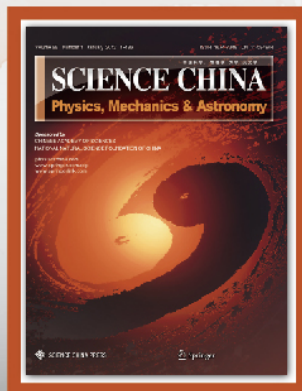
## 中国科学： 物理学 力学 天文学 (中文月刊)

SCIENTIA SINICA  
Physica, Mechanica & Astronomica

CN 11-5848/N  
ISSN 1674-7275

CN 11-5849/N  
ISSN 1674-7348  
eISSN 1869-1927

SCIENCE CHINA  
Physics, Mechanics & Astronomy  
(英文月刊)



广告经营许可证：京东工商广字第0429号 邮发代号：80-211 (中文版) | 80-212 (英文版) 国内每期定价：138.00元

● 《中国科学：物理学 力学 天文学》中英文版 2003 年从《中国科学 A 辑》分出，主要报道凝聚态物理、原子分子物理、光物理和声学、理论物理、粒子物理、核物理、核技术、等离子物理；基础力学、固体力学、流体力学、爆炸力学、物理力学；天体物理学、天体力学、天体测量、射电天文学、星系与宇宙学、空间天文学和交叉学科的基础研究与应用研究方面有重要意义的成果。

● 2010 年开始《中国科学：物理学 力学 天文学》与 SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy 为两本完全独立的刊物。

中文版：被《中文核心期刊要目总览》、《中国科学引文数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国科技论文与引文数据库》和《中国数字化期刊群》等收录。

英文版：被 SCI, EI, Astrophysics Data System (ADS), Current Contents, Google Scholar, Index to Scientific Reviews, INSPEC, Mathematical Reviews, MathSciNet 等收录。

### 栏目：

评述：综述所研究领域的代表性成果和研究进展，评论研究现状，提出今后研究方向的建议，提出作者自己的见解和相应的讨论。

论文：报道物理学、力学和天文学各领域具有创新性、高水平 and 重要科学意义的最新科研成果。

快报：简明扼要地及时报道具有创新性和新颖性的科研成果。

点评：评介近期在国内外重要刊物上发表的重要研究成果，以及国家级各重要科技奖项的研究成果等。

### 投稿办法：

请使用在线投稿的方式，访问本刊网站 [phys.scichina.com](http://phys.scichina.com)，点击“作者投稿系统”，进入“学术期刊管理系统”，首次投稿时需注册一个“作者账户”。注册完成之后，按照提示进行投稿。如果不能在线投稿，请与编辑联系，另行约定投稿方式。

### 绿色通道

本刊编委可推荐稿件，如同意具名推荐（首页注明“××× 推荐”或“Recommended by ×××”），即视为已初审通过，经核实送主编终审后优先发表。编委本人作为作者参与并同意具名负责的稿件（首页注明“××× 供稿”或“Contributed by ×××”）依同样办法处理。

■ 稿件评审公正 ■ 发表及时快速 ■ 出版专业周到 ■

《中国科学：物理学 力学 天文学》编辑部

地址：北京东黄城根北街16号 (100717)

电话：010-64015835 传真：010-64016350

E-mail：[physics@scichina.org](mailto:physics@scichina.org)

ISSN 1674-7275

