

一维爆轰波不稳定性的一种理论描述*

王 春¹ 姜宗林¹ 韩肇元²

(¹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;

²中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027)

摘要: 本文针对一维爆轰波不稳定性, 提出一种爆轰振荡器概念, 应用化学反应介质中的激波动力学方法, 理论上证明了爆轰波前锋化学反应区可以描述为一类二阶非线性振荡器。

关键词: 爆轰不稳定性, 激波动力学, 振荡器

一、问题描述和相关研究

爆轰波不稳定性是爆轰物理的基本问题之一, 也是爆轰物理研究的前沿课题。研究这个问题对于深入认识爆轰波起爆、爆燃转爆轰过程及爆轰波传播现象的物理本质和基本规律具有重要的意义。

爆轰波自身具有的强耦合、强非线性特点给爆轰波不稳定性研究带来相当的困难。目前为止, 对于爆轰波不稳定性研究主要有两类研究手段。

第一类手段是借助数值模拟方法, 通过数值手段研究化学反应及化学反应动力学参数对爆轰波稳定性的影响。通常的做法是采用一步法、两步法、三步法甚至基元反应模型研究化学反应活化能以及爆轰过驱度对一维脉动爆轰波规则和非规则振荡的影响。也有大量的数值研究工作通过对多维爆轰波的数值模拟获得爆轰波传播和演化的唯象特性。

第二类手段是采用理论分析的方法, 其最早可以追述到 20 世纪 60 年代 Erpenbeck 的研究工作。其后较多的理论研究延续和发展 Erpenbeck 的研究方法^[1], 对含化学反应的流体动力学方程进行数学分析, 获得其对于特定频率扰动的响应特性。现有的理论分析工作本质上是建立在对于线性化反应性欧拉方程的小扰动分析的基础上。线性化小扰动分析方法所依赖的一系列假设条件使其无法对爆轰波不稳定性自身具有的强耦合和强非线性特性进行更为准确的描述。总体来讲, 现有的理论分析依赖于数学分析, 而不是对于物理机制的把握。

二、爆轰振荡器概念及其理论描述

本文提出了一种爆轰波不稳定性激波诱导化学反应自激振荡模型。爆轰波的前导激波和爆轰波中的化学反应致声速面自动形成一个振荡器, 当爆轰波的前导激波强度在 CJ 理论值附近变化时, 振荡器产生具有自反馈作用的振荡行为。这种类型振荡器产生的本质原因来自于激波与化学反应的耦合作用, 它是爆轰波不稳定的主要控制机理。

*本文工作得到了国家自然科学基金 (90916028, 10602059) 资助

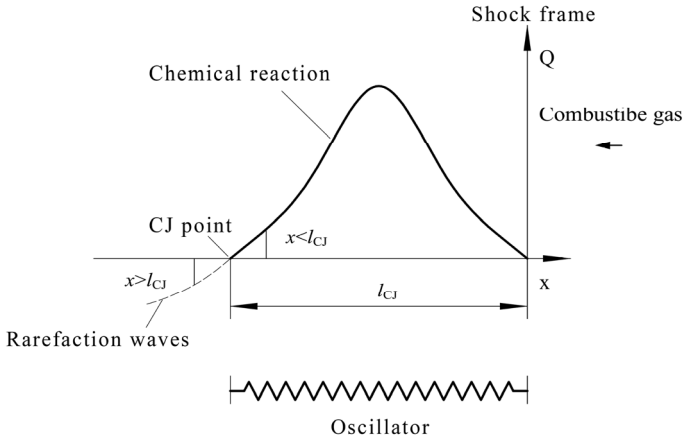


图1 爆轰波前锋的振荡器概念

激波诱导化学反应振荡器形成的必要条件是：1) 激波压缩形成的亚声速流动的存在；2) 亚声速流动通过化学反应加热加速至声速面的出现。公式 (1) 给出了爆轰波前导激波随声速面处化学反应进程变化的关系式，其中 M 为运动激波马赫数， S 为化学反应进程变量， ρ_1 和 a_1 分别为波前介质的密度和声速， Q 为化学反应方热量， $f(M)$ 为激波马赫数的函数。

$$\frac{2M}{\gamma+1} \left[2 + \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{1}{M^2} \right) \right] \frac{dM}{dt} - \frac{(\gamma-1)QS}{\rho_1 a_1^2} = 0 \quad (1)$$

通过适当的坐标系变化，激波动力学方程可以进一步转化为方程式 (2)，其中 x 为前导激波与声速面之间的距离且有 $dM/dt = (1/a_1) dx/dt$ ， $f(M)$ 为运动激波马赫数的函数。

$$f(M) \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{(\gamma-1)QS(x)}{\rho_1 a_1^2} = 0 \quad (2)$$

三、结论

本文发展了化学反应介质中的激波动力学方法，理论上探讨了一维爆轰波不稳定性可以描述为一类二阶常微分方程组，因此这类不稳定性本质上是一种振荡器。

参 考 文 献

- 1 J.J. Erpenbeck, Stability of idealized one-reaction detonations, Phys. Fluids, 1964; 7: 684-696
- 2 C. Wang, Z. Jiang and Z. Han, The Mechanism of Self- Excited Oscillation of Chemical Reaction Induced by Shock Wave. AIAA 2009-7430