

激波灭火技术的初步研究*

刘 君 周勇为 常熹钰

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘 要 讨论了激波灭火技术的基本原理, 给出可行的研究路线。采用新型的计算效率较高的 ENO 差分格式, 从非正常 EULER 方程出发, 对近地爆炸波产生的流场进行数值模拟, 分析后认为控制爆炸波后风场是关键。

关键词 森林灭火; 计算流体力学; ENO 差分格式

分类号 O35

Numerical Simulation of Blast Interaction with the Forest Fires

Liu Jun Zhou Yong wei Chang Xi yu

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The paper discusses the basic principles of extinguishing the forest fires by blast and its feasible research direction. As the first step, flows of blast waves near the earth are simulated numerically by use a new ENO scheme which was simple structure and efficient to use.

Key words blast wave; forest fire; CFD; ENO scheme

森林是人类社会赖以生存的环境基础, 森林火灾防治技术的研究已引起各国政府的高度重视。鉴于依然依赖水和化学试剂的森林灭火技术的局限性, 当务之急是突破传统观念, 开发新型高效的森林灭火技术。在文献 [1] 中俄罗斯科学工作者提出利用激波灭火的新思路, 本文工作就是在国家自然科学基金资助下, 探索激波灭火的原理和技术可能性。

1 激波灭火原理及其研究途径

1.1 原理分析

在经典的燃烧理论中^[2], 根据能量平衡理论, 稳定燃烧的点火与灭火可以表示为:

$$q_1 = q_2, \quad \frac{\partial q_1}{\partial T} = \frac{\partial q_2}{\partial T}, \quad G_1 = G_2 \quad (1)$$

式中, q_1 是燃烧过程反应放热, q_2 向环境对流散热, G_1 是氧气化学反应消耗量, G_2 通过对流从周围环境带入氧气量。这些参数可以近似为:

$$q_1 = C_1(C_2 - T) \exp(-C_3/T), \quad q_2 = C_4U(T - T_e) \\ G_1 = C_5(C_2 - T) \exp(-C_3/T), \quad G_2 = C_6U(T - T_e)$$

式中 $C_1 \sim C_6$ 是与物质特性和流动有关的参数^[2], T_e 是周围环境温度。如果不考虑组分浓度变化的影响, q_1 和 q_2 随温度变化如图 1 所示。 I 是点火点, 来流温度大于 T_i (注意: 不是 I 点当地温度) 后, 反应生成热大于散热, 最终使温度达到燃点; E 是灭火点, 来流温度小于 T_e 后, 当地温度随时间递减, 使已有燃烧熄灭; 温度在 T_i 和 T_e 二者之间时保持已有的燃烧。 q_1 和 q_2 随流速(也可看成流量) U 的变化如图 2, 速度增大, 散热加快, 更利于灭火。

周围环境温度和流量对 G_1 和 G_2 的影响曲线与图 1 和图 2 相似。燃料充分时在大气层环境条件下

* 自然科学基金资助 (批准号: 39770623)
1999 年 3 月 12 日收稿
第一作者: 刘君, 男, 1965 年生, 副研究员

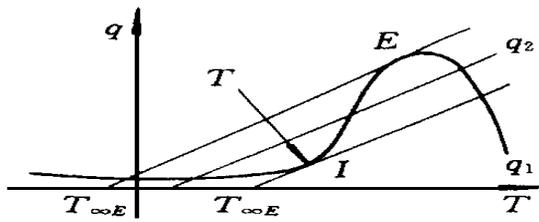


图1 温度对点火和灭火的影响

Fig. 1 Influence of temperature with igniting & extinguishing fire

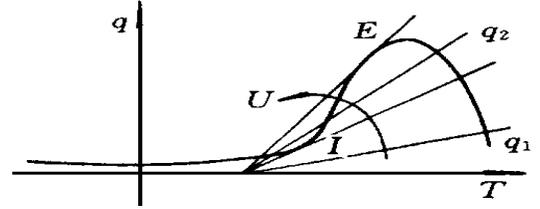


图2 流量对点火和灭火的影响

Fig. 2 Influence of inflow flux with igniting & extinguishing fire

温度增高，氧耗加快，如果大于对流补充，反应无法维持；但是如果流速很快，造成局部氧气浓度远远大于燃气浓度，反应也无法进行。实际生活中，有风助火势，也有灰飞烟灭的现象。

激波与燃烧的关系较为复杂，一般认为波阵面后高温高压，对点火有利；但若激波强度不太高，波后区不足以引燃火线外的树木（即小于图1中I点对应的环境温度），那么基于如下事实，激波是可以灭火的。首先，爆炸波改变了由于热浮力产生的维持燃烧的空气对流流场，破坏其传质与传热过程。其次，紧跟波阵面后的稀疏波导致过膨胀，离开爆心一定距离出现所谓“负超压区”，压力比大气压还低，温度也较低，有利于火焰熄灭。第三，爆炸波产生来回振荡的强烈的风场，火焰附近对流量增加，但含氧量不增，也利于达到灭火要求E点的条件；第四，局部高温加快热解气体的反应，不利于火焰扩散。第五，激波将地面落叶枯枝卷离火源也能抑制火焰蔓延。

这是根据燃烧原理和激波特性定性分析得到的，说明利用激波灭火的新思路有充分的科学依据，值得进一步探索。从我们已经开展的研究工作^[3]和国外文献报道^[1]看，激波管产生的激波使燃烧的树冠火焰熄灭，同时也发现热解气体的爆燃减缓了激波的衰弱。

1.2 研究途径

由于研究问题的复杂性和危险性，大量的工作应事先在实验室开展或通过计算模拟来完成，研究只能循序渐进。首先应开展冷流模拟，研究激波在地面形成的压力场和速度场，包括与没有燃烧树木的相互作用。其次，在了解森林火灾产生的可燃性热解气体成分和大致变化范围后，研究激波在预混气体中的爆燃增强，确定激波强度上限，确保安全性。在此基础上开展热流条件下的实验模拟。最后进行野外有限条件下的检验。

2 计算过程

2.1 控制方程

完全气体的三维非定常守恒型 Euler 方程可以写成：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \tag{2.1}$$

其中 $U = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e)^T$ ，内能 $e = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) + p / (\gamma - 1)$ ；E、F 和 G 是对流项通量，方程推导及其物理量的具体表示形式较为通用，在此省略。

计算时为了准确描述物体外形，需要将上式变化到贴体系 $(\tau, \zeta, \eta, \varphi)$ 下，具体变换过程的推导参考文献 [4]。采用时间相关法把三维问题分解成三个一维问题求解，写成算子形式：

$$L(\Delta \tau) = L_{\xi}(\Delta \tau 2) L_{\eta}(\Delta \tau 2) L_{\varphi}(\Delta \tau 2) L_{\eta}(\Delta \tau 2) L_{\xi}(\Delta \tau 2) L_{\varphi}(\Delta \tau 2)$$

L 是三维问题算子； L_{ξ} 、 L_{η} 和 L_{φ} 是一维问题算子，采用 ENO 差分格式离散。

2.2 新型 ENO 差分格式简介

爆炸波与物体相互干扰形成的流动十分复杂，是一个高度非线性问题；采用时间高精度空间高分辨率的差分格式很重要^[4,5]。本文作者在文献 [6] 中台湾学者 J. Y. Yang 提出利用原函数再构造逼近方法建立 ENO 格式的基础上，对 NND2M 格式^[4]进行再构造，得到一种新型的 ENO 格式。现以一维

EULER 方程为例, 对 ENO 格式进行简单介绍:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

其中 $F = AU$, $A = \partial F / \partial U$ 为系数矩阵, 可以分解为 $A = R^{-1}\Lambda R$, R 为特征向量矩阵, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 是特征值对角矩阵。采用 Steger 通量分裂法, $\Lambda = \Lambda^+ + \Lambda^-$, $A = A^+ + A^-$, $F = F^+ + F^-$, 这样一来 (2.1) 式变为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F^+}{\partial x} + \frac{\partial F^-}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{用新型 ENO 格式离散, 得: } U_j^{n+1} = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_{j+\frac{1}{2}}^n - H_{j-\frac{1}{2}}^n) \quad (2.4)$$

式中上标 n 为时间结点, 下标 j 为空间结点; 其中

$$H_{j+\frac{1}{2}} = F_{j+\frac{1}{2}}^+ + F_{j+\frac{1}{2}}^-, \quad \Delta Q_{j+\frac{1}{2}} = Q_{j+1} - Q_j$$

$$F_{j+\frac{1}{2}}^+ = F_j^+ + \frac{1}{2}ms(\Delta Q_{j+\frac{1}{2}}^+, \Delta Q_{j-\frac{1}{2}}^+), \quad F_{j+\frac{1}{2}}^- = F_{j+1}^- - \frac{1}{2}ms(\Delta Q_{j+\frac{1}{2}}^-, \Delta Q_{j-\frac{1}{2}}^-)$$

$$Q^+ = (R^{-1}\Lambda^+ R)U, \quad Q^- = (R^{-1}\Lambda^- R)U$$

$$\Lambda^+ = (I - \frac{\Delta t}{\Delta x}\Lambda^+) \Lambda^+, \quad \Lambda^- = (I + \frac{\Delta t}{\Delta x}\Lambda^-) \Lambda^-$$

$$\text{函数 } ms(x, y) \text{ 定义如下: } ms(x, y) = 0.5 [\text{sign}(x) + \text{sign}(y)] \quad ms_1(x, y) \quad (2.5)$$

$$ms_1(x, y) = \min(x_1, y_1) \quad (2.6)$$

$$x_1 = \begin{cases} x & x < 0.5x - y \\ 0.5(x+y) & x > 0.5x - y \end{cases}, \quad y_1 = \begin{cases} y & y < 0.5x - y \\ 0.5(x+y) & y > 0.5x - y \end{cases}$$

用数值理论对常系数标量模型方程: $\partial u / \partial t + a \partial u / \partial x = 0$ 进行分析, 稳定性要求为: $CN \leq 1.0$; 也可以证明本文 ENO 格式与文献[6]的 ENO 格式完全相同。但是本文格式在构造过程中没有涉及矩阵运算, 从而很好的提高了计算效率。另外, 常用的 ENO 格式多为七点格式, 本文格式仅涉及五点, 因此应用方便, 尤其边界条件的处理较为简单。

2.3 初始条件和边界条件

根据实验对物理模型近似处理。假设爆炸源能量瞬间释放, 初始时刻压力值一般用下式确定: 式中 r 为爆炸波到爆心半径(m), W 为装药量(kg), \bar{W} 为波阵面上其他参数用 R-H 关系式给出。一般取较小半径, 认为爆炸源内物理参数不变。

边界条件提法如下:

(1) 地面和建筑物表面满足无穿透条件: $V \cdot n = 0$ 。

(2) 外边界取一阶近似, 用内点外推得到。为保证爆炸波到达外边界后产生的误差对内流场计算影响较小, 外边界取的较远。

(3) 对称面上提对称边界条件, 用增设网格处理。

3 计算过程

计算过程中, 装药量 $W = 1.0\text{kg}$, 初始半径 $r = 1.0\text{m}$ 。根据流动对称性, 计算半个区域: 宽 60.0m , 高 60.0m ; 爆心离地面高度为 3.0m 。网格结点 $241 \times 240 \times 5$ (软件在 586/200 微机运行最大网格数), 时间推进一步大约 25s, 约 300 步激波到达外边界, 计算停止。

在常见的爆炸波文献中, 研究的主要是对物体的冲击载荷, 报道的多为与压力有关参数, 不能完全满足激波灭火研究的要求。本文计算中, 记录超压和最小负压随传播距离的变化 (如图 3), 其中超压变化规律与文献[8]较为一致; 同时, 也给出与地面平行方向速度的最大和最小值的衰减情况 (图 4)。由于爆炸波在爆点附近多次膨胀和压缩, 流动发生急剧变化, 在离爆心一定距离 ($x > 5.0\text{m}$) 变化趋于平缓, 直到较远处接近静止大气值。在图中也看到在 5m 到 20m 之间超压较小, 速度还有一定的

落差, 说明存在较强的振荡风场, 是可以利用来灭火的。对温度场的分析也发现在爆炸初期, 速度图上风速变化较大的区域确实存在有低温影响, 合理应用这一特性可以有效减弱火势。

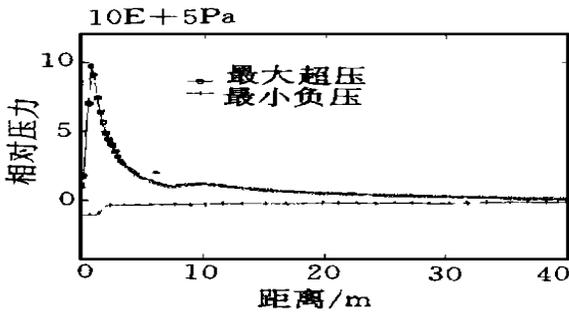


图3 最大超压和最小负压沿x方向变化(y = 3.0m)

Fig.3 Distribution of P max & P min along x at y = 3.0m

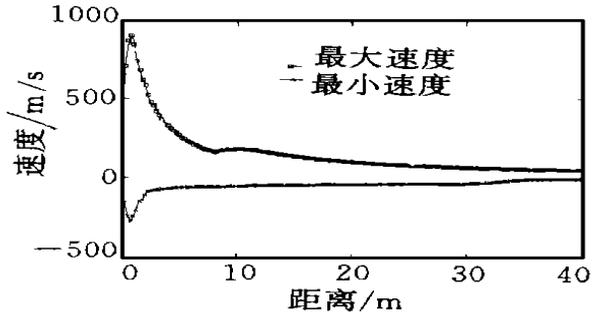


图4 速度最大和最小值沿x的分布(y = 0.3)

Fig.4 Maximum & minimum of velocity along x at y = 3.0m

根据研究问题中流量的重要性, 特别比较了压力等值线和流量绝对值等值线(可以看成风场流量), 二者变化规律性较为相似。这样, 在试验中着重细致研究压力或速度场, 减少实验测量参数, 降低实验费用。

5 结束语

本文是这项研究工作在理论分析和计算模拟方面开展的初步探讨, 从得到的流场结构和参数看, 利用爆炸激波达到燃烧理论提出的灭火条件是可能的; 但是也发现这一技术的研究十分复杂。由于可供参考的文献较少, 本文结论还需进一步验证。

参考文献

- 1 Grishin A G. Interaction of shock wave with tree crowns and the front of grown forest fires. Shock wave (edited by Brun R.) Springer-verlag, Berlin Heideberg, 1995: 441~416
- 2 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟. 北京: 科学出版社, 1994: 36-64
- 3 常熹钰等. 激波与森林作用的实验研究. 见: 第八届全国激波学术交流会论文集, 1998
- 4 刘君. 超音速完全气体和 H₂/O₂ 燃烧非平衡气体的复杂喷流流场数值模拟. [博士学位论文]. 中国气动中心
- 5 刘君. NND2M 差分格式在运动激波模拟中的应用. 见: 第七届全国激波与激波管学术交流会论文集, 1995, 河南, 洛阳
- 6 Yang, J Y, and Lombard, C. K., "Uniformly second order Essentially Non-oscillatory Schemes for the Euler equations", AIAA Journal, Vol. 28, No. 12, 1990
- 7 见: 第九届全国计算流体力学会议论文集. 广西, 北海, 1998
- 8 张六一. 空气土中爆炸模拟装置的研制及应用. 见: 第七届全国激波与激波管学术交流会论文集, 河南, 洛阳, 1995