燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2017，23(3)：274-279
DOI 10.11715/rskxjs.R201606007

离散分布多火源燃烧速率计算模型研究

林圣泽，刘　琼
（中南大学资源与安全工程学院，长沙 410083）

摘　要：针对可燃物离散分布燃烧现象，基于外加辐射热流对火源燃烧速率的增长理论，考虑离散可燃物燃烧时环境气压对燃烧速率增长系数 k 的影响，提出针对任意离散分布火源 i 的修正无量纲增长系数 K_i，K_i 值与离散分布条件（火源中心间距 D 和火源数目 n^2）有关，建立了离散火源燃烧速率计算模型．根据离散多火源自由燃烧燃尽时间数据获得 K_i 经验式，对比分析多种离散分布条件下各火源燃烧速率的模型计算值和实验值，结果表明，该计算模型结果比较合理．

关键词：辐射热流密度；离散可燃物；燃烧速率；计算模型
中图分类号：X932　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740（2017）03-0274-06

Burning Rates Calculation Model of Discrete Fire

Lin Shengze，Liu Qiong
（School of Resource and Safety Engineering，Central South University，Changsha 410083，China）

Abstract：Based on the growth theory of external radiation heat flux on fire burning rate，considering the influence of environment pressure on the growth coefficient k for fuel in discrete distribution，this paper puts forward a dimensionless correction growth coefficient K_i，which is related to discrete distribution conditions including center spacing D and fire resource amounts n^2. A calculation model of fire burning rate is established. Besides，the K_i empirical formula is gained according to the free burn-out time data of discrete multiple fires. The contrastive analysis of the model calculation value and the experimental value of fire burning rate shows that the result by the calculation model is reasonable.

Keywords：radiative heat flux density；discrete fuel；burning rate；calculation model

火灾是失去控制的燃烧行为，容易造成人员伤亡、财产损失．当多个起火点位置较为接近时，火源燃烧速率迅速增大，可能出现火焰融合、火旋风等特殊火行为，导致火灾破坏性加强．这种特殊的燃烧现象称为离散可燃物燃烧现象．区域性城市火灾、森林火灾是典型的离散可燃物燃烧现象．为探究离散可燃物燃烧特性，预防大面积火灾，学者针对离散可燃物燃烧开展多方面研究．在离散可燃物火源燃烧速率、火源相互影响方面，Huffman 等[1]对环形火阵列燃烧速率进行测定，发现燃烧速率随着火源间距增加先增加后减小．Chigier 等[2]就环形离散火源相互作用进行研究，发现火焰稳定性、高度与环形阵列旋流水平、火源间距相关．Satoh 等[3]提出燃尽时间分析方法，定义火源相互作用指数 $I(m)$ 与相互关联指数 $A(m, n)$．国内，Liu 等[4-5]发展燃尽时间分析方法，揭示离散可燃物燃烧受空气卷吸、热量反馈相互作用，

收稿日期：2016-06-02.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51206191）.
作者简介：林圣泽（1991—　　），男，硕士研究生，564091554@qq.com.
通讯作者：刘　琼，男，讲师，liuqiong@csu.edu.cn.

揭示其此消彼长的竞争机制. 李政等[6]进一步研究庚烷池火多火源燃烧特性，发现 S/D（S 为火源间距；D 为油盘直径）决定热量反馈增强作用、空气卷吸受限作用何者为主导. 纵观离散可燃物燃烧速率的研究，主要集中在对特定阵列的燃烧速率、火焰行为的研究，缺乏对火源发展、演变、燃烧速率强化方面的研究，导致研究结果局限于特定工况，难以拓宽到其他条件，实验结果局限性强. 另外，研究以定性分析为主，定量研究较为缺乏.

为探究离散可燃物燃烧速率计算方法，对单火源燃烧模型进行修正. 在单火源燃烧速率研究方面，近年来出现一部分对模型改进有意义的研究. 在燃烧速率增量方面，冯姜辉[7]通过理论推导与实验研究，证明独立火源燃烧速率增量与加载辐射热流密度成正比. 在低气压状态火源燃烧速率方面，蔡昕、李振华等[8-9]研究低氧环境下油盘火的燃烧特性，验证了低气压状态对燃烧的抑制作用，抑制效果与气压相关. 通过对文献的分析研究，笔者对独立火源模型进行拓展、修正，提出一种基于辐射热流密度的离散可燃物燃烧速率计算模型.

1 离散可燃物燃烧速率计算模型的构建

液态燃料燃烧时，火焰辐射提供可燃物蒸发、点火所需要的能量，维持火源燃烧. 外加辐射热流时，可燃物接收的辐射热流大于维持燃烧所需辐射热流量，燃料蒸发量增加，外在表现为燃烧速率增加. 可燃物离散分布燃烧状态与独立火源外加辐射热流相似. 任意火源除受自身火焰辐射外，周围火源对其存在辐射，使燃烧速率大于基础燃烧速率. 两者在大气压力的影响方面存在不同，独立火源空气供应充足，卷吸空气不受限制，火源周边大气压力基本不变. 可燃物离散分布燃烧时，空气流动受阻碍，火源间相互竞争空气，火源周边大气压力降低，燃烧速率受抑制. 对于离散状态火源，火源相互作用分为促进作用与阻碍作用. 因此，离散分布的任意火源可认为是低压、外加辐射热流的独立燃烧火源，其燃烧速率增长规律与之相似.

1.1 离散可燃物无量纲燃烧速率增长公式

外加辐射热流时，火源燃烧速率与辐射热流密度存在如下关系[7]：

$$m'' = k_1 q''_{\mathrm{ext}} + m''_0 \tag{1}$$

$$\Delta m'' = k_1 q''_{\mathrm{ext}} \tag{2}$$

式中：m'' 为火源燃烧速率，kg/(m^2 · s)；k_1 为燃烧速率对外加辐射热流密度增长系数，kg/kJ；q''_{ext} 为加载辐射热流密度，kW/(m^2 · s)；m''_0 为独立自由燃烧时燃烧速率，kg/(m^2 · s).

式(2)表明，在常压下，独立火源燃烧速率增量与外加辐射热流密度呈正比关系. 当处于低压状态时，火源燃烧速率受辐射热流增长效应、空气不足抑制效应两方面的影响，燃烧速率增量低于常压下的增量. 在低压环境下，式(2)转化为：

$$\Delta m''_i = k_{1.1} k_{1.2} q''_{\mathrm{ext}} \tag{3}$$

式中：$k_{1.1}$ 为理想增长系数，kg/kJ；$k_{1.2}$ 为环境影响系数，无量纲，由燃烧环境决定. 独立燃烧时，空气充足，$k_{1.2} \approx 1$，$k_1 = k_{1.1}$，相当于理想状态燃烧. 可燃物离散分布时，某时刻火源的燃烧环境由阵列分布、辐射热流强度决定，$k_{1.2}$ 取值与其相关. 对式(3)进行无量纲化处理，获得离散可燃物无量纲燃烧速率增量式为

$$\Delta m''^{*}_i = \frac{k_{1.1} k_{1.2} q''_{\mathrm{ext}}}{m''_0} \tag{4}$$

式中 $\Delta m''^{*}_i$ 为火源的无量纲燃烧速率增量.

1.2 辐射热流密度计算方法

燃烧过程中，火源通过辐射热流相互促进. 火源受周边火源辐射热流影响，燃烧速率增大，对外辐射热流增强，促使周边火源燃烧速率增大. 周边火源燃烧速率增加后，又进一步促进火源燃烧速率增长. 对任意时刻 t，若各火源燃烧速率已知，可由式(4)计算无量纲燃烧速率，方法如下.

由点火源理论，火源 j 向火源 i 的辐射热流密度 $q''_{j\to i}$ 为

$$q''_{j\to i} = Q_j/(4\pi L^2_{j\to i}) \tag{5}$$

式中：Q_j 为单位时间内火源 j 向外热辐射量，kW/s；$L_{j\to i}$ 为火源 j 与火源 i 的距离，m.

中心距离为 D（单位：m）、燃烧速率为 m''_0 的两相邻火源，其辐射热流密度 $q''_{0,\mathrm{ext}}$ 为

$$q''_{0,\mathrm{ext}} = Q_0/(4\pi D^2) \tag{6}$$

式中 Q_0 是燃烧速率为 m''_0 的火源的单位热辐射量，KW/s. 根据 Thomas 辐射经验模型[10]，单一池火燃烧向外辐射热 Q 与燃烧速率 m'' 相关，即

$$Q = k_2 m'' \tag{7}$$

$$k_2 = f(r, H_{\mathrm{c}}, \eta, \rho_{\mathrm{a}}) \tag{8}$$

式中 k_2 为燃料热释放系数，与燃烧面几何尺度 r、燃料燃烧热 H_{c}、辐射效率因子 η 和环境空气密度 ρ_{a} 有关.

定义火源 i 受火源 j 的辐射热流密度与 $q''_{0,\mathrm{ext}}$ 的比值为火源 j 对 i 的无量纲辐射热流密度，记为 $R_{j\to i}$.

$$R_{j\to i} = \frac{q''_{j\to i}}{q''_{0,\mathrm{ext}}} \tag{9}$$

代入式(5)和式(6)则有

$$R_{j\to i}=\frac{Q_j/Q_0}{\left(L_{j\to i}/D\right)^2} \tag{10}$$

代入式(7)，有：

$$R_{j\to i}=\frac{m''_j/m''_0}{\left(L_{j\to i}/D\right)^2}=\frac{m''^*_j}{\left(D^*_{j\to i}\right)^2} \tag{11}$$

式中：m''^*_j 为火源无量纲燃烧速率；$D^*_{j\to i}$ 为火源 j 距火源 i 的无量纲间距. 周边火源对火源 i 的无量纲辐射热流密度总和记为 R_i，可表示为

$$R_i=\sum_1^{i-1}\left(\frac{m''^*_j}{\left(D^*_{j\to i}\right)^2}\right)+\sum_{i+1}^{N}\left(\frac{m''^*_j}{\left(D^*_{j\to i}\right)^2}\right) \tag{12}$$

式中 N 为火源数目.

火源 i 受到的外界辐射热流密度 $q''_{i,\mathrm{ext}}$ 为

$$q''_{i,\mathrm{ext}}=q''_{0,\mathrm{ext}}R_i \tag{13}$$

将式(12)、(13)代入式(4)，获得可燃物离散分布时任意火源的无量纲燃烧速率增量与周边火源燃烧速率、阵列分布的关系式.

$$\Delta m''^*_i=\frac{k_{1.1}k_{1.2}k_2}{4\pi D^2}R_i \tag{14}$$

1.3　离散可燃物热流辐射燃烧速率计算模型

可燃物离散分布燃烧是相互影响、相互强化的动态过程，引入时间序列 t 模拟动态变化. 对任意火源 i，$t+1$ 时刻的无量纲燃烧速率由 t 时刻周边火源辐射热流密度决定，并决定 $t+1$ 时刻火源 i 对周边火源的辐射热流密度. 式(14)转化为

$$\Delta m''^*_i\Big|_{t+1}=\frac{k_{1.1}k_{1.2}k_2}{4\pi D^2}R_i\Big|_t \tag{15}$$

定义火源 i 无量纲转化系数 K_i 为

$$K_i=k_{1.1}k_{1.2}k_2/(4\pi D^2) \tag{16}$$

$$\Delta m''^*_i\Big|_{t+1}=K_i\,R_i\Big|_t \tag{17}$$

由式(17)可知，对分布已知的阵列，若无量纲转化系数 K_i 已知，通过时间序列迭代可计算阵列中各火源无量纲燃烧速率变化情况. 迭代关系、时间序列、离散分布状态构成离散可燃物燃烧速率计算模型.

$$\begin{cases}R_i=\sum_1^{i-1}\dfrac{m''^*_j}{\left(D^*_{j\to i}\right)^2}+\sum_{i+1}^{N}\dfrac{m''^*_j}{\left(D^*_{j\to i}\right)^2}\\ \Delta m''^*_i\Big|_{t+1}=K_i\,R_i\Big|_t\end{cases} \tag{18}$$

2　K_i 值经验式

式(18)中，除无量纲转化系数 K_i 外均为初始变量、过程变量，确定 K_i 值可完善模型. K_i 由 $k_{1.1}$、$k_{1.2}$、k_2 这 3 部分构成. $k_{1.1}$ 为理想状态增长系数，由燃料性质、火焰形状决定，燃烧过程中可认为是常数；$k_{1.2}$ 为环境影响系数，离散状态下，和阵列分布情况、辐射热流密度有关，随燃烧过程变化；k_2 为燃料热释放系数，对于给定燃料类型和燃烧面几何尺度的离散火源，可认为是常数. K_i 可表示为

$$K_i=c_1\times f\left(R_i,D,N\right)\times c_2 \tag{19}$$

燃烧过程中，火源间距 D、火源数目 N 保持不变，$k_{1.2,i}$ 由无量纲辐射热流密度 R_i 决定，即

$$k_{1.2,i}=f\left(R_i\right)\in[0,1] \tag{20}$$

$$K_i=c_1\times f\left(R_i\right)\times c_2=F\left(R_i\right) \tag{21}$$

离散燃烧过程燃烧状况复杂，难以直接推导获得，故采用实验数据拟合获得曲线.

2.1　K_i 计算方法

K_i 属于过程隐藏变量，无法通过仪器直接测量，需通过其他实验值计算获得，具体计算方法与实验数据类型相关. 本文实验数据来自于刘琼等设计的等间距燃烧实验[5]. 实验采用正庚烷作为燃料，采用高 $h=2$ cm、底面直径 5 cm 的铸铁油盘为火源，包含 3×3、4×4、5×5、6×6、7×7 共 5 组实验，每组实验包含 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、30 cm、40 cm 共 6 种火源间距. 记录不同间距、不同阵列下火源点 i 的燃料燃尽时间 T_i. 燃烧过程中，准稳态燃烧阶段燃烧环境较稳定，K_i 稳定不变，选取该阶段作为分析对象.

准稳态燃烧阶段，火源无量纲燃烧速率可由 $\overline{K_i}$、$\overline{m''_i}$、T_i 计算获得. 由火源燃尽时间、独立火源燃尽时间 BOT 可计算火源 i 的平均无量纲燃烧速率 $\overline{m''^*_i}$. 由式(12)计算火源 i 受外在平均无量纲辐射热流密度 $\overline{R_i}$. 火源 i 的 $\overline{K_i}$ 平均值可简化计算为

$$\overline{K_i}=\frac{\overline{m''^*_i}-1}{\overline{R_i}} \tag{22}$$

对火源 i，燃烧过程燃烧速率不断变化，但整个燃烧过程消耗燃料不变. 由物料守恒原理，有

$$\overline{m''^*_i}T_i=\int_{t_0}^{T_i}m''^*_i \tag{23}$$

对火源 i，在 T_j 到 T_{j+1} 的时间段内，火源 j 熄灭导致火源 i 接受的辐射热流密度降低，燃烧速率降低. 无量纲燃烧速率变化满足以下关系.

$$m''^*_{i,T_j}-m''^*_{i,T_{j+1}}=\overline{K}\frac{m''_j/m''_0}{\left(L_{j\to i}/D\right)^2}\Bigg|_{T_j} \tag{24}$$

各火源中，火源 1(中心火源)最早熄灭，熄灭时间为 T_1. 可视为在 T_1 前各火源 i 处于准稳态燃烧阶

段. 其无量纲燃烧速率记为 m''^{*}_{i,T_j}，则有

$$m''^{*}_{i,T_1}=\overline{m''^{*}_{i}}+\frac{\sum_{1}^{i-1}\left[\frac{m''^{*}_{j,T_1}}{\left(D^{*}_{j\to i}\right)^{2}}\left(T_i-T_j\right)\right]}{T_i} \tag{25}$$

当火源处于准稳态燃烧时，火源 i 无量纲燃烧速率增量 $\Delta m''^{*}_{i,T_1}$ 保持稳定，则有

$$\Delta m''^{*}_{i,T_1}=K_iR_i \tag{26}$$

带入阵列各火源的准稳态无量纲燃烧速率、阵列分布状况，可计算 K_i.

$$K_i=\frac{\Delta m''^{*}_{i,T_1}}{\sum_{1}^{i-1}\frac{\Delta m''^{*}_{j,T_1}}{\left(D^{*}_{j\to i}\right)^{2}}+\sum_{i+1}^{N}\frac{\Delta m''^{*}_{j,T_1}}{\left(D^{*}_{j\to i}\right)^{2}}} \tag{27}$$

2.2 K_i 曲线的拟合

实验数据经过式(25)、式(12)、式(27)处理，依次可计算出 m''^{*}_{i,T_1}、R_i、K_i. 限于篇幅限制，以 $D=15$ cm 为例说明.

经式(25)求得火源点 i 准稳态无量纲燃烧速率 m''^{*}_{i,T_1}. 计算 $D=15$ cm 时不同阵列、不同位置火源的无量纲燃烧速率 m''^{*}_{i,T_1}，结果见表 1.

表 1 $D=15$ cm 不同阵列、不同位置 m''^{*}_{i,T_1} 值记录表

m''^{*}_{i,T_1}	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
m''^{*}_{1,T_1}	2.61	3.12	4.00	4.69	4.44
m''^{*}_{2,T_1}	2.40	2.63	3.66	4.43	4.44
m''^{*}_{3,T_1}	2.09	2.29	3.64	4.35	4.44
m''^{*}_{4,T_1}			3.33	3.82	4.30
m''^{*}_{5,T_1}			3.23	3.70	4.29
m''^{*}_{6,T_1}			2.79	3.09	4.23
m''^{*}_{7,T_1}					3.88
m''^{*}_{8,T_1}					3.39
m''^{*}_{9,T_1}					3.84
m''^{*}_{10,T_1}					3.12

将火源无量纲燃烧速率(表 1)、阵列分布位置代入式(12)计算火源 i 受周边火源的无量纲外加辐射热流密度 R_i. 无量纲火源间距大于 3 时，相互间辐射热流密度很小，计算中予以忽略. 准稳态燃烧阶段，火源i受到周边火源无量纲辐射热流密度R_i，见表 2.

计算获得 $m''_{i,T_1}*$、R_i 后，式(27)简化为

$$K_i=(m''^{*}_{i,T_1}-1)/R_i \tag{28}$$

将表 1、表 2 数据代入式(28)，计算不同阵列、不同位置火源的无量纲增长系数，如表 3 所示.

表 2 $D=15$ cm 不同阵列不同位置 R_i 值记录表

R_i	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
R_1	13.80	20.40	31.81	39.70	39.94
R_2	10.64	14.27	28.74	34.66	39.37
R_3	8.48	9.77	25.53	30.18	38.78
R_4			19.74	23.68	34.58
R_5			17.57	20.56	34.13
R_6			11.91	13.84	30.00
R_7					23.99
R_8					23.56
R_9					20.45
R_{10}					14.03

表 3 $D=15$ cm 不同阵列不同位置 K_i 值记录表

K_i	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
K_1	0.116 6	0.103 9	0.094 3	0.092 9	0.086 2
K_2	0.131 8	0.114 2	0.092 6	0.099 0	0.087 5
K_3	0.130 8	0.131 7	0.103 4	0.111 1	0.088 8
K_4			0.118 0	0.119 1	0.095 4
K_5			0.126 9	0.131 2	0.096 3
K_6			0.150 0	0.150 8	0.107 6
K_7					0.120 1
K_8					0.123 7
K_9					0.139 1
K_{10}					0.151 1

式(21)表明，对同一阵列，K_i 是 R_i 的函数. 对 $D=15$ cm 时的 7×7 阵列进行曲线拟合，拟合结果如图 1 所示.

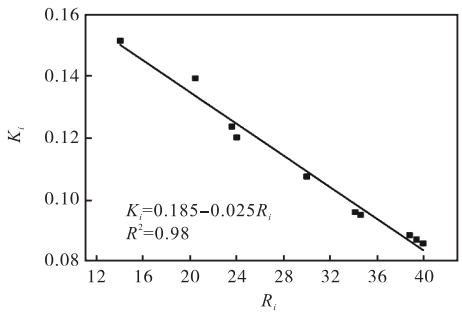


图 1 $D=15$ cm 时 7×7 阵列 K_i 与 R_i 关系图

图 1 表明，火源间距为 15 cm 时，7×7 火源阵列中 K_i 与 R_i 存在较为明显的线性关系，即

$$K_i=0.185-0.025R_i \qquad (R^2=0.98) \tag{29}$$

将式(29)改写成式(21)形式，则有

$$K_i=0.185\times\left(1-0.135R_i\right) \tag{30}$$

式(30)表明，对同一阵列，火源独立燃烧时，R_i=0，无量纲增长系数 K_i 达到最大值. 随 R_i 增加，无量纲增长系数 K_i 逐步减少，关键系数 $k_{1.2,i}$ 在实验范围内从 1 线性减少.

阵列间距增加，辐射热流密度降低、空气干扰增加，燃烧速率误差增加. 因此，选取 $D=10$ cm (D^*=2)、$D=15$ cm (D^*=3)、$D=20$ cm (D^*=4) 作为分

析对象，D = 30 cm（D^*=6）、D = 40 cm（D^*=8）不计算在内. 对实验数据进行处理，拟合结果如图 2 所示.

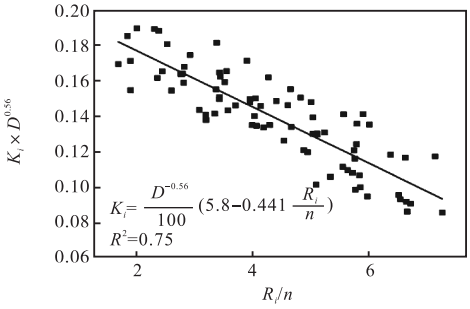


图 2　火源间距 D 为 10 cm、15 cm、20 cm 时拟合结果

图 2 中拟合结果为

$$K_i = \frac{D^{-0.56}}{100}\left(5.8-0.441\frac{R_i}{n}\right) \quad (R^2 = 0.75) \tag{31}$$

式中 n 为火源阵列阶数（n^2 为火源数目 N）. 式（31）显示，当无量纲辐射热流密度增加时，K_i 存在降低趋势，降低程度与辐射热流密度、阵列间距、阵列阶数相关.

3　模型模拟结果与对比验证

3.1　模拟过程

获得 K_i 曲线后，给定初始条件，对阵列火源燃烧速率变化情况进行模拟，计算流程如图 3 所示. 模拟输入内容为火源阵列规模（用火源阵列阶数 n 表示）、火源间距 D. 采用迭代法对燃烧强化过程进行模拟. 当所有火源前后时刻的无量纲燃烧速率增量差值小于 10^{-5} 时，认为燃烧进入准稳态燃烧阶段，结束模拟.

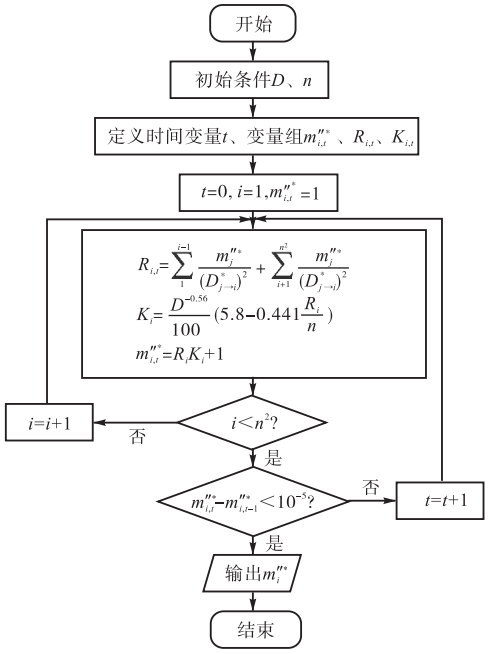
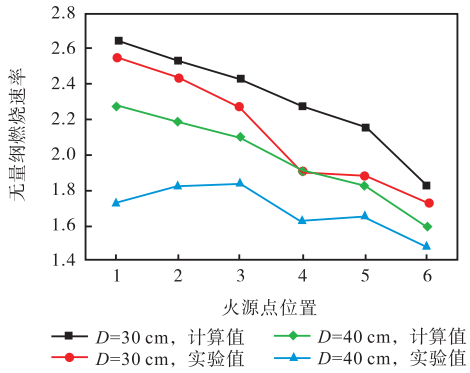


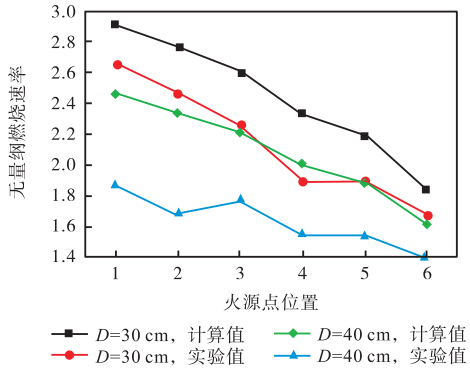
图 3　模型模拟流程图

3.2　模拟结果与实验结果对比

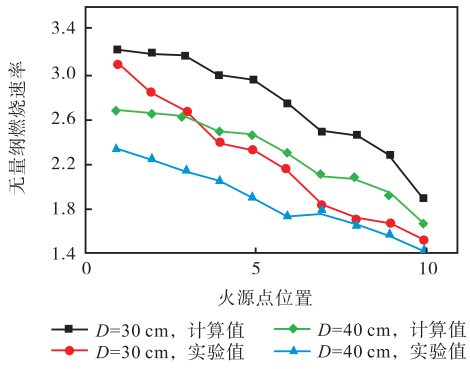
火源间距 D 设置为 30 cm、40 cm，火源阵列阶数 n 分别取 5、6、7，按照图 3 所示流程，对 D 为 30 cm、40 cm 时的 5×5、6×6、7×7 阵列进行模拟. 模拟结果与实际实验数据对比结果如图 4 所示.



（a）5×5 阵列



（b）6×6 阵列



（c）7×7 阵列

图 4　D 为 30 cm 和 40 cm 时不同阶阵列无量纲燃烧速率的对比

3.3　对比结果分析

燃烧速率计算模型的模拟结果与实验数据变化趋势一致，数值较为接近. 模拟结果较好地反映了阵列燃烧过程中燃烧速率的分布情况，但模拟结果整体大于实验数据. 经过多方面分析，发现出现差距的主要原因包括：

（1）计算模型模拟结果为火源 i 的准稳态燃烧速率，实验结果记录为整个燃烧过程平均无量纲燃烧

速率. 计算结果应当大于实验结果.

(2) 实验数据精度不足，油盘燃料误差、点火时间误差、人员操作干扰、空气流动干扰、燃尽判定标准异同等导致记录数据存在偏差. K_i 曲线在单一阵列中拟合程度较高，全范围的线性拟合程度较低.

(3) 实验数据处理方法中采用逆推法计算准稳态燃烧速率，存在一定程度误差.

3.4 计算模型不足

(1) 对火源初始燃烧速率计算较为模糊. 模型预测中，设定每个火源初始燃烧速率 m_0''，模拟过程重在揭示阵列分布的独立火源的相互影响、燃烧速率的变化情况，忽略了阵列火源从点火开始到燃烧速率达到 m_0'' 的过程.

(2) 实际燃烧过程中，燃烧速率增长过程是连续的，但模拟过程采用迭代法，具有突变性质. t 仅表示迭代次数，不代表真实时刻火源的燃烧速率. 模拟过程反应燃烧速率的增长变化情况，但无法获得燃烧过程中特定时间点的某火源的燃烧速率.

(3) 模型对 K_i 曲线依赖程度高. 模拟采用的 K_i 曲线来自于等间距燃烧阵列，对其他工况的模拟不能够直接代用.

4 结 论

(1) 火源离散燃烧时，由于火源间相互作用，同一阵列，随无量纲辐射热流密度 R_i 增长，无量纲增长系数 K_i 呈现降低趋势. 针对单一阵列，存在明显线性关系. 拟合结果与理论推导两方面证明，离散状态火源燃烧规律与外加辐射热流、变气压的独立火源燃烧规律一致.

(2) 结合实验数据类型推导 K_i 计算方法，拟合获得 K_i 与相邻火源间距 D、阵列阶数 n、辐射热流密度 R_i 之间的关系式.

$$K_i = \frac{D^{-0.56}}{100}\left(5.8 - 0.441\frac{R_i}{n}\right)$$

(3) 对部分工况进行模拟，模型模拟结果与实验数据相符合，反映了火源阵列由中心向边缘燃烧速率变化情况. 对比结果说明离散可燃物辐射热流燃烧速率计算模型有一定使用价值.

(4) 受限于实验数据、模型不足等因素，模型燃烧速率数值计算准确度不足. 可通过追加实验、测定精确燃烧速率，增加 K_i 曲线精确度等提升预测精度.

为改进模型，后续工作会将严格阵列拓展为非严格阵列、任意离散状态等，使得预测模型模拟结果更加精确.

参考文献：

[1] Huffman K G, Welker J R, Sliepcevich C M. Interaction effects of multiple pool fires [J]. *Fire Technology*, 1969, 5(3): 225-232.

[2] Chigier N A, Apak G. Interaction of multiple turbulent diffusion flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1975, 10(5/6): 219-231

[3] Satoh K, Shinohara M, Yang K T. Experiment observation and analysis of square arrays of equidistant multiple fire affected by a shear flow field [C]//*Proceedings of the Seventh Brazilian Congress of Engineering and Thermal Science*. Rio de Janeiro, 1998: 490-495.

[4] Liu Naian, Liu Qiong, Deng Zhihua, et al. Burn-out time data analysis on interaction effects among multiple fires in fire arrays [C]// *Proceedings of the Combustion Institute*. Netherlands: Elsevier, Inc, 2007: 2589-2597.

[5] 刘 琼. 多火源燃烧动力学机制与规律研究[D]. 合肥：中国科学技术大学工程科学学院，2010.
Liu Qiong. Dynamical Mechanism and Behaviors of Multiple Fires Burning[D]. Hefei: School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, 2010(in Chinese).

[6] 李 政，刘乃安. 庚烷池火多火焰燃烧特性的实验研究[J]. 火灾科学，2012，21(3)：109-115.
Li Zheng, Liu Naian. Experimental study of heptane discrete-pool fire burning characteristics [J]. *Fire Safety Science*, 2012, 21(3): 109-115(in Chinese).

[7] 姜冯辉. 小尺度燃烧中传热阻碍机理研究[D]. 北京：清华大学机械工程学院，2012.
Jiang Fenghui. Heat Transfer Blockage in Small Scale Combustion[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, 2012(in Chinese).

[8] 蔡 昕，王喜世，李权威，等. 低气压环境下正庚烷及汽油池火的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术，2010，16(4)：341-346.
Cai Xin, Wang Xishi, Li Quanwei, et al. Combustion characteristics of n-heptane and gasoline pool fire under low ambient pressure conditions [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2010, 16(4): 341-346(in Chinese).

[9] 李振华，杨满江，张 辉，等. 低压低氧环境下油盘火的对比实验与燃烧特性[J]. 中国科学技术大学学报，2009，39(2)：215-219.
Li Zhenhua, Yang Manjiang, Zhang Hui, et al. Contrastive experiments and combustion characteristics of a square-pans fire under low pressure and low oxygen concentration in Tibet [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(2): 215-219(in Chinese).

[10] Thomas P H. The size of flames from natural fires [C]//*9th Symposium on Combustion*. London: Academic Press, 1962: 844-859.