

液体燃料回燃现象的理论分析

龚剑 杨立中* 陈晓军 郭再富

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026. * 联系人, E-mail: yanglz@ustc.edu.cn)

摘要 液体燃料的整个回燃过程包括预燃烧阶段、第二次供油阶段和产生回燃阶段。针对这一过程, 定量地建立了热烟气层的温度随时间变化的动力学模型。模型考虑了液体燃料挥发成气体带来的热损失率、热烟气层的质量增加以及由此带来的焓损失率。本文把模型的模拟结果与实验结果进行了很好的比较并对模型的模拟结果进行了分析, 同时指出通风受限条件下的燃烧效率和实际燃烧的反应速率是很值得研究的问题。

关键词 液体燃料 回燃 挥发 动力学模型 温度

回燃现象是指在通风受限的建筑物内由于新鲜空气的补充不足, 燃烧进入了缺氧性燃烧状态, 使得热烟气中含有大量的可燃成分, 如果由于某种原因(门的突然打开或窗玻璃的突然破裂)造成新鲜空气的大量涌入, 这些新鲜空气与可燃成分逐渐混合, 在火源的作用下混合气体将会发生强烈的燃烧, 转化为轰燃或爆燃并产生火球。回燃现象由于其发生的隐蔽性、突然性和强大的破坏性对人类尤其是消防人员有着极大的威胁^[1-4]。

现在有关研究回燃现象的方法主要局限于实验, 其中有用气体燃料产生的回燃实验^[5-7]和液体燃料产生的回燃实验^[8]。根据气体燃料(甲烷)产生的回燃现象, 建立了一种气体燃料产生回燃现象的动力学模型^[9]。从系统控制面和突变理论的角度分析本征值和无量纲烟气层温度随无量纲时间的变化情况、无量纲能量得失率随无量纲烟气层温度的变化情况以及可燃气体体积浓度对无量纲烟气层温度的影响, 这仅仅是从理论上进行分析, 而没有与实验结果进行比较, 至于液体燃料产生的回燃现象的动力学模型一直没有研究报道。本文以Gottuk等人^[8]的研究中液体燃料(No.2 柴油)产生的回燃实验结果为基础, 对整个回燃实验过程建立了腔体内热烟气层温度随时间变化的动力学模型, 模型包括了预燃烧阶段(第一阶段)、第二次供油阶段(第二阶段)和产生回燃阶段(第三阶段), 考虑了液体燃料挥发成气体带来的热损失率, 热烟气层的质量增加以及由此而带来的焓损失率, 最后把动力学模型的模拟结果与实验结果进行了比较。

1 液体燃料产生的回燃现象的动力学模型

Thomas等人^[10]针对腔室火灾中的热烟气层提出:

$$\frac{dE_h}{dt} = G(T, t) - L(T, t). \quad (1)$$

其中, $G(T, t)$ 和 $L(T, t)$ 分别为热烟气层的能量获得率和能量损失率, E_h 为热烟气层的能量, T 为温度, t 为时间。因此, T 由 G 和 L 控制, 而 G 和 L 都是 T 和 t 的函数。根据这个定量的描述, 热烟气层的温度可以定义为

$$\frac{dT}{dt} = F_1 = \frac{G - L - \dot{H}}{c_{p1}m}. \quad (2)$$

其中, \dot{H} 为由于热烟气层的质量增加而带来的焓损失率, c_{p1} 为热烟气层的定压比热容, m 为热烟气层的质量。假定腔体是密闭的。

1.1 第一阶段的动力学模型

热烟气层的质量可定义为

$$m = \rho V + \dot{m}_1 \times \Delta t_1. \quad (3)$$

其中, ρ 为热烟气层的密度, V 为热烟气层的体积, \dot{m}_1 为第一阶段的燃料供给率, Δt_1 为第一阶段通入燃料的时间, 显然 Δt_1 的值随着实验的进行而递增。

G , L 和 \dot{H} 由一些独立的方程定义^[11]:

$$G = \alpha_1 \times \dot{m}_1 \times H_c; \quad (4)$$

$$L = \dot{Q}_w = A_w [\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4) + h_t (T - T_w)]; \quad (5)$$

$$\dot{H} = \dot{m}_1 \times c_{p2} \times (T - T_{a1}). \quad (6)$$

其中, α_1 为预燃烧阶段的燃烧效率, H_c 为No.2 柴油的燃烧热, \dot{Q}_w 为通过壁面的热损失率, A_w 为与热烟气层接触的腔体内表面积, ε 为热烟气层发射率, σ 为Stefan-Boltzman常数, T_w 为壁面温度, h_t 为壁面对流传

热系数, c_{p2} 是根据 No.2 柴油完全燃烧后生成的 CO_2 和水的量以及按它们的比例算出的混合气体的定压比热容, T_{a1} 为外界新鲜空气的温度.

T_w, A_w 由下式定义^[11]:

$$T_w = U_c(T - T_{a1}) + T_{a1}; \quad (7)$$

$$A_w = 2 \times (L_R \times W_R + W_R \times H_R + H_R \times L_R). \quad (8)$$

其中 L_R, W_R, H_R 为腔体的长度、宽度和高度. 假设热烟气流充满整个腔体.

U_c 为壁面温度因子, 由下式定义^[12]:

$$U_c = e^{-\beta(k_w \rho_w c_w)^{B_1}}. \quad (9)$$

其中, $\beta = 0.539, B_1 = 0.338$ 是常数. k_w, ρ_w 和 c_w 分别是壁面传热系数、密度和定压比热容.

1.2 第二阶段的动力学模型

热烟气流的质量可定义为

$$m = \rho V + \dot{m}_1 \times t_1 + \dot{m}_2 \times \Delta t_2. \quad (10)$$

其中, $t_1 = 920 \text{ s}$ ^[8], \dot{m}_2 表示第二阶段的平均燃料供给率(考虑了供油前后的两次延迟时间), Δt_2 表示第二阶段的时间(包括了供油前后的两次延迟时间), 显然 Δt_2 的值随着实验的进行而递增. 在文献^[8]中, 第二次燃料供给率为 0.052 kg/s , 持续时间为 67 s .

G, L 和 \dot{H} 由一些独立的方程定义

$$G = 0; \quad (11)$$

$$L = \dot{Q}_w + \dot{Q}_v; \quad (12)$$

$$\dot{H} = \dot{m}_2 \times c_{p3} \times (T - T_{a1}). \quad (13)$$

其中, \dot{Q}_v 为液体燃料挥发的热损失率, c_{p3} 为燃料挥发成气体的定压比热容. \dot{Q}_w 的表达式如(5)式所示, 其中, T_w 由下式定义:

$$T_w = U_c(T - T_{a2}) + T_{a2}. \quad (14)$$

U_c 仍然由(9)式定义, 与第一阶段的不同的地方在于这里用的是 T_{a2}, T_{a2} 为钢结构的温度.

\dot{Q}_v 由下式定义:

$$\dot{Q}_v = H_g \times \dot{m}_2. \quad (15)$$

其中 H_g 为燃料的蒸发潜热. 因为 No.2 号柴油的沸点是 $210 \sim 235$ ^[18], 所以假定所有液体燃料此时都挥发成气体, 燃料挥发率等于燃料供给率.

1.3 第三阶段的动力学模型

热烟气流的质量可定义为:

$$m = \rho V + \dot{m}_1 \times t_1 + \dot{m}_2 \times t_2. \quad (16)$$

其中, $t_1 = 920 \text{ s}$ ^[8], $t_2 = 231 \text{ s}$ ^[8].

G, L 和 \dot{H} 由一些独立的方程定义:

$$G = \alpha_2 \times \chi \times \dot{m}_f \times H_c; \quad (17)$$

$$L = \dot{Q}_w = A_w[\varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4) + h_f(T - T_w)];$$

$$\dot{H} = \dot{m}_a \times c_{p1} \times (T - T_{a1}). \quad (18)$$

其中, α_2 为第三阶段的燃烧效率, χ 为燃料-通风控制函数, \dot{m}_f 为燃料燃烧率, \dot{m}_a 为经由开口流入的空气质量流率. 对于 L 中的参数如(7~9)式所示.

χ 由下式给出:

$$\chi = \begin{cases} 1, & \dot{m}_a/\dot{m}_f \geq S_r; \\ \dot{m}_a/(\dot{m}_f S_r), & \dot{m}_a/\dot{m}_f < S_r. \end{cases} \quad (19)$$

其中, S_r 为化学当量比. \dot{m}_a 由下式定义^[13]:

$$\dot{m}_a = 2/3 C_d \rho_0 W_V H_V^{3/2} \sqrt{2g(1 - T_{a1}/T)(N - D)(N + D/2)}. \quad (20)$$

其中 C_d 为开口流动系数, ρ_0 为外界新鲜空气的密度, W_V 为开口宽度, H_V 为开口高度, g 为重力加速度. N, D 分别为无量纲中性层和热间断层的高度, 它们的简化关系如下^[12,13]:

$$N = D + (1 - D)^2/2; \quad (21)$$

$$D = Z_D/H_V. \quad (22)$$

其中 Z_D 为热间断面的高度. 假设火焰仅仅是线性传播的, \dot{m}_f 由下式定义^[9]:

$$\dot{m}_f = k[mC/(MV)]^n l W_R H_0 Q_c / H_c. \quad (23)$$

其中, k 为化学反应速度, C 为反应区内燃料(总碳氢)质量百分比浓度, M 为反应区内可燃气体的摩尔质量, V 为腔体总体积, n 为反应级数, l 为火焰传播距离, H_0 为反应区(重力流混合区)高度, Q_c 为燃料的摩尔燃烧热. H_0 由下式定义^[9]:

$$H_0 = N H_V. \quad (24)$$

根据 Arrhenius 公式, 化学反应速率 k 由下式定义:

$$k = k_0 \cdot \exp(-E_a/RT). \quad (25)$$

其中, k_0 为化学反应的指前因子, E_a 为活化能, R 为通用气体常数.

为了定量建立回燃现象的动力学模型, 根据回燃产生时腔体内火焰传播特征, 引入火焰传播公式^[12]:

$$\frac{dl}{dt} = F_2 = (aV_d + bV_p) \left[1 - \exp\left(\frac{l - l_{\max}}{l_{\max}}\right) \right]. \quad (26)$$

其中, a 和 $b = 1 - a$ 分别是扩散火焰和预混火焰传播的比例因子^[2], V_d 和 V_p 分别是扩散火焰和预混火焰传播速度, l_{\max} 为火焰最大传播距离. 函数 $\left[1 - \exp\left(\frac{l - l_{\max}}{l_{\max}}\right) \right]$ 使腔体内火焰传播距离限制在 l_{\max} 内, 并使 F_2 光滑. V_d 由下式定义^[14]:

$$V_d = \frac{K_d \dot{m}_a}{\rho_0 W_V H_0} \quad (27)$$

其中 K_d 为扩散火焰燃烧系数.

V_p 由下式定义^[15]:

$$V_p = K_p V_{\max} = (AR_e + B) V_{\max} \quad (28)$$

其中, K_p 为预混火焰传播系数, V_{\max} 为预混火焰最大传播速度. A, B 是常数, $A = 0.000125$ ^[15], $B = 1.3$ ^[15], R_e 为反应区的雷诺数, 由下式定义:

$$R_e = \mu H_0 / \nu \quad (29)$$

其中, ν 是动力黏性系数, μ 为反应区的气体平均速度. μ 由下式定义:

$$\mu = \dot{m}_a / (\rho_0 W_R H_0) \quad (30)$$

2 液体燃料回燃实验的简介和模拟结果的分析

2.1 对Gottuk等人^[8]的液体燃料回燃实验进行简要描述

Gottuk等人^[8]为了发展海军舰船的防火技术, 在实验室中建立了两个腔体, 其中一个腔体用于产生回燃, 长×宽×高为 5.2 m × 2.4 m × 3.2 m, 另外一个腔体由于可以改变其大小(分别为 20, 104 和 129 m³) 被称为缓冲区, 两个腔体之间用一门 1.22 m × 2.13 m 连接; 腔体结构为钢结构; 燃料是No.2 柴油喷雾; 实验利用了水喷淋抑制回燃的产生.

实验的整个过程分为 3 个阶段. 第一阶段为预燃烧阶段, 燃料供给率为 40 g/s, 时间从 80 s 到 1000 s, 目的是假定加入的燃料量与腔体中原有的空气量充分反应, 经过 80 s 的延迟进入第二阶段. 第二阶段为第二次供油阶段, 燃料供给率为 52 g/s, 时间从 1080 s 到 1147 s, 目的是通入液体燃料在高温条件下挥发成可燃性气体, 再经过 86s 的延迟进入第三阶段. 第三阶段就是产生回燃的阶段, 时间从 1233 s 打开开口到 1269 s 产生火球.

2.2 模拟结果的分析

根据前面提出的回燃过程的动力学模型, 采用 4~5 阶龙格库塔法进行数值计算求解模型中的偏微分方程组, 其中计算中用到的初始条件、边界条件以及各种物性参数见表 1.

Gottuk等人^[8]的研究中热烟气层的温度随时间变化的曲线与计算机模拟后的结果见图 1, Gottuk 测量了开口处和火源处两点的热烟气层的温度, 而建

表 1 模型的特殊参数

腔体参数	燃料参数
$L_R = 5.2 \text{ m}$ ^[81]	$a = 0.9$ ^[91]
$W_R = 2.4 \text{ m}$ ^[81]	$b = 0.1$ ^[91]
$H_R = 3.2 \text{ m}$ ^[81]	$c_{p2} = 1282.3 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
$W_V = 1.22 \text{ m}$ ^[81]	$c_{p2} = 2200.8 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ^[171]
$H_V = 2.13 \text{ m}$ ^[81]	$H_c = 45000000 \text{ J/kg}$ ^[181]
$k_w = 20.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ^[161]	$H_g = 375000 \text{ J/kg}$ ^[181]
$\rho_w = 8055.0 \text{ kg/m}^3$ ^[161]	$K_d = 0.0005$ ^[191]
$C_w = 559.0 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ^[161]	$K_p = 3$ ^[151]
流体参数	$l_{\max} = L_R = 5.2 \text{ m}$ ^[91]
$c_{p1} = 1003.2 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ^[111]	$m_1 = 0.04 \text{ kg/s}$ ^[81]
$C_d = 0.7$ ^[201]	$m_2 = 0.015 \text{ kg/s}$
$T_{a1} = 300 \text{ K}$ ^[111]	$Q_c = 59.7500 \text{ J/mol}$
$T_{a2} = 663 \text{ K}$ ^[81]	$S_r = 14.7$ ^[81]
$Z_D = 0$ ^[111]	$V_{\max} = 0.3731 \text{ m/s}$ ^[151]
$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ^[111]	$\alpha_1 = 0.65$ ^[111]
$\rho_0 = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ^[111]	$\alpha_2 = 0.3$ (假设)
$\nu = 0.017 \text{ m}^2/\text{s}$ ^[91]	化学反应参数
传热参数	$C = 0.18$ ^[181]
$h_r = 7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ^[111]	$E_a = 126000 \text{ J/mol}$ ^[171]
$\varepsilon = 0.41$ ^[111]	$g = 9.8 \text{ m/s}^2$
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$	$k_0 = 3.8 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ^[171]
	$R = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$
	$n = 1$ ^[91]

立的动力学模型的研究对象是腔体中的整个热烟气层的平均温度, 所以计算机模拟的结果应该介于这两点温度之间, 在预燃烧阶段火源处的热烟气层的温度应该要比模拟结果要高, 在产生回燃阶段开口处的热烟气层的温度应该要比模拟结果要高. 由于计算程序的特点, 计算机模拟的结果比实验测量的曲线平滑.

从图 1 中可以看出在预燃烧阶段的前 140 s 左右的时间内, 温度随时间的递增迅速升高, 第 140 s 时就接近了最高温度, 然后温度随时间慢慢升高直到预燃烧阶段的结束; 由于腔体采用的材料是钢结构,

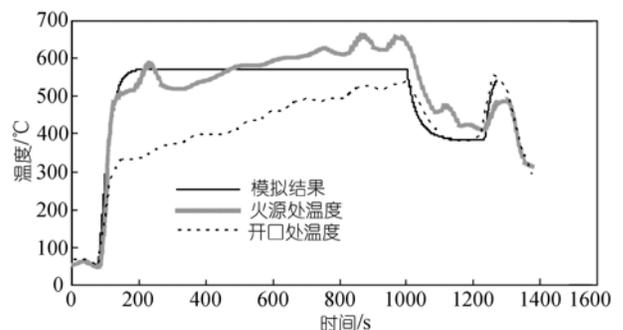


图 1 温度随时间变化的曲线

在第二次供油阶段结束时, 壁面仍然有 400 左右的温度, 这个温度远高于 No.2 柴油的自燃温度 254 [18], 因而在产生回燃阶段, 壁面可以作为一个点火源来点燃可燃气体和新鲜空气的混合气体, 而且在打开开口之后只经过短短的 36 s, 温度就迅速的达到了 540 左右的高温, 并在没有任何明显的物理现象下产生了火球. 可见回燃有着极大的突然性和破坏性, 它对人类安全尤其是消防工作者有着极大的危害.

本文所建立的动力学模型是在燃料完全燃烧的假定下, 运用一步反应法并代入相应的指前因子 k_0 , 而事实上燃料的燃烧总是遵循以下的规律: 首先依靠 OH 和 O 从燃料中脱氢生成水、碳氧中间产物、氢和 CO, 接下来 H_2 和 CO 再氧化成 H_2O 和 CO_2 . 虽然燃料的化学反应速度公式同式(25), 但是式中 k_0 的取值是不同, 这直接影响到燃料燃烧率. 另外, 在通风受限条件下的燃料燃烧效率是一个很关键的值, 本文的预燃烧阶段所代入的燃烧效率值是根据 Bishop 等人 [11] 的研究中采用的值, 在产生回燃阶段所代入的燃烧效率值是假设所得, 这个值由于忽略了热烟气层在开口处的辐射和对流热损失并假定腔体是密闭的, 所以取值偏小, 在实际实验过程中的燃烧效率应该要比这个取值要大, 而燃烧效率的取值直接影响到能量获得率. 这些都是很值得去研究的问题.

3 结论

本研究针对液体燃料产生的回燃现象, 运用偏微分方程组定量的建立了热烟气层温度随时间变化的动力学模型, 分析了整个的回燃实验过程, 包括预燃烧阶段、第二次供油阶段和产生回燃阶段, 在模型方面考虑了液体燃料挥发成气体带来的热损失率, 热烟气层的质量增加以及由此而带来的焓损失率.

从图 1 可以看出, 对于本文提出的模型模拟出的温度结果与实验结果比较接近, 可靠性高. 从图中还可以看出, 回燃是一种典型的突变现象, 在打开开口之后经过短短的 36 s, 热烟气层的温度就从 380 左右跃升到 550 左右, 这一高温带来的辐射极有可能引起房间内其他可燃物的燃烧, 并最终导致轰燃或爆燃.

进一步工作应考虑在开口处的热烟气层的辐射和对流损失来改进模型, 并考虑一些参数对结果的影响, 例如指前因子、火焰传播速率、腔室尺寸和通风受限条件下的燃烧效率. 与此同时, 应进行液体燃

料和固体燃料引起的回燃实验的研究.

致谢 感谢翁文国博士的帮助. 本工作为国家重点基础研究发展规划(批准号: 2001CB409603)和国家自然科学基金(批准号: 50306024)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Bukowski R W. Modeling backdraft: The fire at 62 watts street. NFPA J, 1995, 89: 85~89
- 2 Fleischmann C M. Backdraft Phenomena, NIST-GCR-94-646. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1994
- 3 Dunn V. Beating the Backdraft. Fire Eng, 1988, 14: 44~48.
- 4 Chitty R. A Survey of backdraught. Fire Research Station, 1994
- 5 Fleischmann C M, McGrattan K B. Numerical and experiment gravity currents related to backdrafts. Fire Safety J, 1999, 33: 261~282[DOI]
- 6 Gojkovic D. Initial Backdraft Experiments. Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden. 2000
- 7 Foster J A, Roberts C V. An Experimental Investigation of Backdraft. Fire Research Division, Office of the Deputy Prime Minister, London, 2003
- 8 Gottuk D T, Peatross M J, Farley J P, et al. The development and mitigation of backdraft: A real-scale shipboard study. Fire Safety J, 1999, 33: 261~282[DOI]
- 9 Weng W G, Fan W C. Catastrophe behavior of backdraft in compartment Fires. 5th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology, Newcastle, Australia, 2001. 3~6
- 10 Thomas P H, Bullen M L, Quintiere M L, et al. Flashover and instabilities in fire behavior. Combust Flame, 1980, 38: 159~171[DOI]
- 11 Bishop S R, Holborn P G, Beard A N, et al. Nonlinear dynamics of flashover in compartment fires. Fire Safety J, 1993, 21: 11~45[DOI]
- 12 Beard A N, Drysdale D D, Bishop S R. A non-linear model of major fire spread in a tunnel. Fire Safety J, 1995, 14: 333~357[DOI]
- 13 Rockett J A. Fire induced gas flow in an enclosure. Combust Sci Technol, 1976, 12: 165~175
- 14 Takeda H. Transient models of early stages of fire growth. mathematical modelling of fires. ASTM STP983, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987
- 15 傅维镛, 张永康, 王清安. 燃烧学. 北京: 机械工业出版社, 1988. 194~270
- 16 Incropera F P, Dewitt D P, 编. 葛新石, 王义方, 郭宽良, 等译. 传热的基本原理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1985. 420~440
- 17 Sang H K, Seung W B, Ji H C. Autoignition of sprays in a cylindrical combustor. Intl J Heat Mass Transfer, 2001, 44: 2413~2422[DOI]
- 18 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 13~13
- 19 Takeda H. A trial of flashover prediction in compartment fire modeling. Fire Sci Technol, 1987, 7(1): 15~23
- 20 Steckler K, Baum H, Quiniere J. Fire Induced flows through room openings-flow coefficients. Twentieth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1984. 1551~1600

(2005-01-22 收稿, 2005-08-22 收修改稿)