



冷态缓释放条件下水成膜泡沫在方形浅油面上的蔓延模型研究

张光辉, 浦金云, 陈晓洪

海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033

摘要 水成膜泡沫(AFFF)的发展和应用是消防泡沫的重大变革,水成膜泡沫内含有氟表面活性剂,具有很强的流动性和成膜性。在灭火过程中,灭火时间是消防员最关心的问题,它是验证系统灭火效能的唯一指标,也是决定消防损害管制成败的重要指标。影响AFFF灭火时间的最重要因素是泡沫的蔓延过程,泡沫蔓延速度快、覆盖面积广、抗烧能力强,则灭火时间短。冷态缓释放条件下,AFFF在方形浅油面上的蔓延模型研究可以定量分析泡沫蔓延距离与时间及其他影响因素的联系,对大面积油火消防设计有重要的理论指导意义。由于AFFF蔓延的过程中伴随泡沫沉降,所以假设泡沫在油面蔓延过程是准静态过程,在较短的时间范围内,不考虑泡沫沉降对泡沫流量的影响,泡沫蔓延的主要作用力是泡沫的静压力和泡沫、油面界面间的黏性阻力,忽略惯性力。通过假设建立连续方程和动量守恒方程,得到冷态缓释放条件下AFFF在圆形油面上蔓延距离和泡沫高度函数。研究发现,冷态下泡沫的蔓延距离与流量和时间呈指数关系,与泡沫燃油界面间的黏性阻力呈负指数关系。

关键词 水成膜泡沫;黏性阻力;预测

中图分类号 U664.88

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)21-0095-04

Model of Cold AFFF Spreading on the Circular Oil Surface Under Gentle Application

ZHANG Guanghui, PU Jinyun, Chen Xiaohong

Ship and Power College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract The development of the Aqueous Film Forming Foam (AFFF) heralds a revolution in the study on fire fighting foams. Fluorosurfactants are added in the AFFF to facilitate the spread of a thin film of water on oil fire. In fighting against fire, time is a very important parameter, which decides whether the damage can be effectively controlled. The spreading process is closely related with the fire fighting time. If foams spread quickly, the cover area will be large and the burning resistant ability can be improved. Since there is a foam drainage, in the model it is assumed that the AFFF foam spreading process is in a quasi steady state and the drainage will not affect the flow within a short time. The main driving force is the

hydrostatic pressure and the viscosity shear between the AFFF foam and the oil interface. The foam spreading distance and the foam height are obtained based on the continuity equation and the momentum equation. The calculation results based on the model show that with a larger AFFF flux and a longer time, we will obtain longer spreading distance. With given AFFF and oil, the viscosity shear between AFFF foam and oil interface is the main parameter. In the test, it is found that resistance of the channel can also affect the spreading distance, by which the distance can be reduced. The AFFF drainage will also reduce the spreading distance. In order to improve the model, the resistance of the channel and the AFFF drainage are to be considered. A good model for a cold AFFF foam spreading on the circular oil surface under a gentle application is necessary for the AFFF foam to be used on large area oil fire, to predict the fire fighting time.

Keywords aqueous film forming foam; viscosity shear; prediction

0 引言

水成膜泡沫(Aqueous Film Forming Foam, AFFF)是扑灭燃油火灾的最佳灭火剂之一,它具有良好的流动性能,能够快速在燃油表面形成水膜,冷却火场温度,窒息灭火。尤其是

收稿日期: 2009-09-02

基金项目: 海军武器装备研制项目

作者简介: 张光辉,博士研究生,研究方向为舰艇消防安全技术与工程,电子信箱:zghshining@sina.com;浦金云(通信作者),教授,研究方向为舰船安全技术



在现代大型舰艇飞行甲板上, AFFF 灭火系统是主要的灭火工具。但是在大型舰艇航行状态下, 由于火灾面积大, 火场和灭火系统受到环境严重干扰等原因, 舰艇甲板 AFFF 泡沫灭火变得异常困难, 掌握 AFFF 的蔓延和灭火数理过程就变得尤为重要。

冷态缓释放条件下 AFFF 蔓延模型是最基本的模型, 该模型直接影响热态和强释放模型的研究。以往的研究主要采用全尺度试验方法测量泡沫液蔓延和泡沫高度^[1-4], 本文以 AFFF 灭舰艇火灾过程为研究对象, 假设油层很薄, 泡沫蔓延的过程中驱动底部薄燃油层作库埃特流动^[5], 通过假设建立数量模型预测 AFFF 泡沫在燃油层表面的蔓延参数。

1 AFFF 在燃油表面蔓延的基本控制方程

AFFF 蔓延可以描述为自由表面流, 根据静水动力学的原理^[6], 其平均高度是密度、静压力和速度的函数, 如泡沫蔓延图 1 所示, 泡沫在燃油表面蔓延的基本控制方程也可以用泡沫层的高度表示。

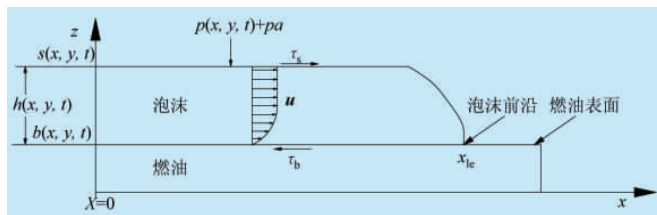


图 1 AFFF 蔓延简单过程

Fig. 1 Simple spreading process of AFFF

假设泡沫本身是不可压缩的, 但是由于泡沫沉降导致泡沫密度是可变量, 根据质量和动量守恒得出连续方程和动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho w u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \quad (4)$$

式中, ρ 为泡沫密度; u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度; p 为压力; τ_{xx}, τ_{xy} 分别为 zx 平面和 zy 平面的剪切力; F_x, F_y 分别为 x, y 方向的单位体积力; g 为重力加速度。

令

$$\Psi(x, y, t) = z - s(x, y, t) \quad (5)$$

$$\Phi(x, y, t) = z - b(x, y, t) \quad (6)$$

根据运动学边界条件知, 在 $s(x, y, t)$ 和 $b(x, y, t)$ 处, z 方向上的速度为 0, 则在 $s(x, y, t)$ 和 $b(x, y, t)$ 处有

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial t} + u \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v \frac{\partial \Psi}{\partial y} + w \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + v \frac{\partial \Phi}{\partial y} + w \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

由于 $h(x, y, t) = s(x, y, t) - b(x, y, t)$, 积分连续方程(1), 有

$$\begin{aligned} & \int_b^s \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) dz = 0 \\ & \rightarrow \rho w|_{z=s} - \rho w|_{z=b} + \int_b^s \frac{\partial \rho}{\partial t} dz + \int_b^s \frac{\partial \rho u}{\partial x} dz + \int_b^s \frac{\partial \rho v}{\partial y} dz = \\ & -\dot{m}''_{z=s} + \dot{m}''_{z=b} \end{aligned} \quad (9)$$

将式(5)代入式(7), 式(6)代入式(8), 运用 Leibniz 积分(9)式, 有

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_b^s \rho dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_b^s \rho u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_b^s \rho v dz = -\dot{m}''_{z=s} + \dot{m}''_{z=b} \quad (10)$$

假设在 z 方向上, ρ, u, v 均恒定, 即 $u=U, v=V$, 则有

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho U h}{\partial x} + \frac{\partial \rho V h}{\partial y} = -\dot{m}''_{z=s} + \dot{m}''_{z=b} \quad (11)$$

式中 U, V 为平均速度。由于 z 方向上速度变化率为 0, 则 $\partial \rho / \partial z = -\rho g$, 且在 $s(x, y, t)$ 处有

$$p(x, y, z, t) = P(x, y, t) + Pa$$

式中, $P(x, y, t)$ 为外力; 积分得: $p(x, y, z, t) = \rho g(s - z) + P(x, y, t) + Pa$ 。因此,

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial(\rho g s)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\partial(\rho g s)}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial y} \quad (13)$$

同理, 利用 Leibniz 积分公式对式(2)、(3)、(4)积分, 并代入式(12)、(13), 有

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho U h)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho U^2 h + \frac{1}{2} \rho g h^2 \right)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U V h)}{\partial y} = \\ & - \left(\frac{\partial(\rho g b)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} \right) h + \tau_{sx} - \tau_{lx} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U V h)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho V^2 h + \frac{1}{2} \rho g h^2 \right)}{\partial y} = \\ & - \left(\frac{\partial(\rho g b)}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) h + \tau_{sy} - \tau_{ly} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $\frac{1}{2} \rho g h^2$ 为泡沫蔓延过程中产生的惯性力; 右边第 1 项表示燃油层的斜率影响产生的作用力, 第 2 项是泡沫静压力, 第 3 项是泡沫表面受到的作用力, 第 4 项是泡沫和燃油界面黏性阻力。式中, τ_{sx}, τ_{sy} 分别为泡沫表面 x 方向和 y 方向的剪切力; τ_{lx}, τ_{ly} 分别为泡沫底部 x 方向和 y 方向的剪切力。

2 冷态缓释放条件下 AFFF 在方形浅油面上的蔓延模型

当 AFFF 释放到燃油层表面后, 泡沫和燃油层将会形成复杂的流动状态^[7]。首先泡沫是非牛顿流体, 燃油是牛顿流体, 泡沫在外力和重力的作用下可能出现两种流态, 当 $\tau_b \leq \tau_y$ (泡沫的屈服应力) 时, 泡沫流动状态是栓塞流 (plug flow); 当 $\tau_b > \tau_y$ 时, 泡沫流动状态是栓塞-应力混合流 (plug-shearing)

flow)。同时泡沫的流动会使燃油层产生流动,并在燃油层内部形成边界层,边界层的厚度随着距离的增加而增加,当边界层的厚度大于燃油层的厚度($\delta_b > \delta_f$)时,燃油层的流动状态从边界层流(boundary layer flow)转换成为库埃特流(couette flow),如图2所示。

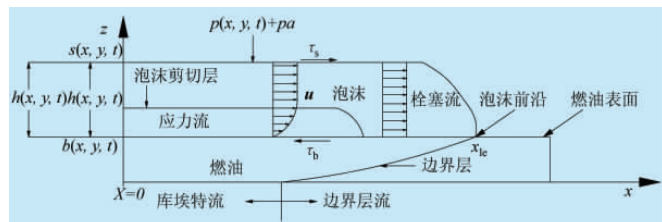


图2 AFFF蔓延过程中的复杂流动状态

Fig. 2 Complex flow state of AFFF spreading process

在冷态缓释放条件下,AFFF蔓延可以进行以下假设^[8]:

- 1) 缓释放条件下,AFFF蔓延过程为准静态过程,不考虑泡沫层表面作用力,即 $\tau_{st}=0, \tau_{sy}=0$ 。
- 2) 惯性力相对较小,则式(14)和式(15)等式左边惯性力项为0。
- 3) 由于AFFF是非牛顿流体,其内部剪应力相对于燃油层内的剪应力可以忽略不计,则泡沫作 plug flow。
- 4) 燃油层整体水平,则燃油层的斜率影响产生的作用力为0。
- 5) 燃油层很薄,燃油内的边界层厚度很快与燃油底部相交,boundary layer flow 长度相对 couette flow 长度可以忽略不计。
- 6) 冷态条件下不考虑燃油的蒸发损失率和沉降率,泡沫的发泡倍数 S 恒定,密度也是常数。

根据上述假设知: $\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\rho}{s}gh$ 。如果只考虑AFFF泡沫蔓延的一维模型,则式(10)、(14)、(15)简化得

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$\tau_{bx} = \rho g \left(\frac{1}{s} - 1 \right) h \frac{\partial h}{\partial x} \quad (17)$$

3 冷态缓释放条件下 AFFF 在方形浅油面上的蔓延计算

3.1 试验设计

试验装置是长4 m,宽1 m,高0.3 m的方形流道。流道的左端是长0.2 m,宽0.2 m,高0.3 m的方形箱体,箱体和流道间是0.2 m高的挡板。泡沫发生装置和泡沫枪,按照GB 15308-2006设计。

主要测量装置是高清摄像机和量杆,3个摄像头,1个固定在流道上方可滑动的导轨上,流道上每0.1 m有1个量杆,当AFFF前锋运动到高度标尺处,记录当前时刻;另2个固定在流道0.9和1.1 m处的侧端,同时方形箱体顶部安装

一个着色器,标记泡沫颜色,通过摄像机记录着色泡沫通过0.8和1.2 m处的时间,如图3所示。

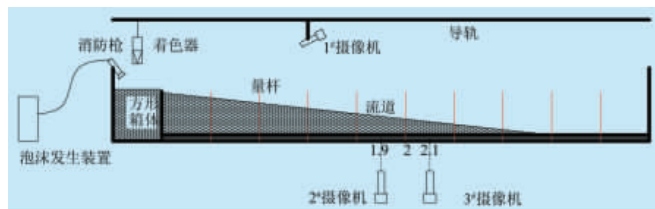


图3 AFFF泡沫蔓延试验

Fig. 3 Experiment of AFFF foam spreading

使用的泡沫液是军用AFFF液,底层为JP-5航空燃油。

3.2 AFFF蔓延计算

AFFF泡沫和燃油界面的阻力是阻碍泡沫蔓延的主要因素之一,为了确定该界面阻力,本文首先采用UK FRS黏性阻力测量装置^[9]对其进行多次测量发现该值基本恒定约为0.5 Pa。

所以根据式(16)和(17),设 τ_{bx} 恒定,令 $F = \tau_{bx} / \rho g \left(1 - \frac{1}{s} \right)$; 同时由于泡沫发生装置流量恒定,则得

$$\dot{V} = B U_0 h_0$$

式中, $\dot{V}$ 为AFFF的流量; B 为流道的宽度, $B=0.2$; U_0 为 $x=0$ 处的速度, h_0 为 $x=0$ 处的AFFF高度; $h=h(R, t)$, R 为AFFF蔓延距离。解偏微分方程,得

$$h = h(x, t) = \sqrt{h_0^2 - 2Fx}$$

$$h_0 = \left(\frac{3\dot{V}F}{B} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot t^{\frac{1}{3}}$$

$$R = \left(\frac{9\dot{V}^2}{8FB^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot t^{\frac{2}{3}}$$

$$U = \left(\frac{\dot{V}^2}{3FB^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot t^{-\frac{1}{3}}$$

$$h = \sqrt{h_0^2 - 2Fx} = \left[\left(\frac{3\dot{V}F}{B} \right)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{2}{3}} - 2Fx \right]^{\frac{1}{2}}$$

4 结果和讨论

4.1 结果

首先本文采用UK FRS黏性阻力测量装置测量泡沫发生装置在额定压力下产生3% AFFF 30 min后的屈服应力值为2.5 Pa,该值远大于泡沫和燃油界面间的阻力,说明泡沫蔓延过程为栓塞流动的假设成立。同时采用GB 15308-2006中规定的测量AFFF发泡倍数 S 的方法,得到 $s=8$ 。根据上述计算公式,得出当流量 $\dot{V}=0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的泡沫蔓延距离 R 和 $x=1 \text{ m}$ 处的速度 U ,如图4和图5所示。

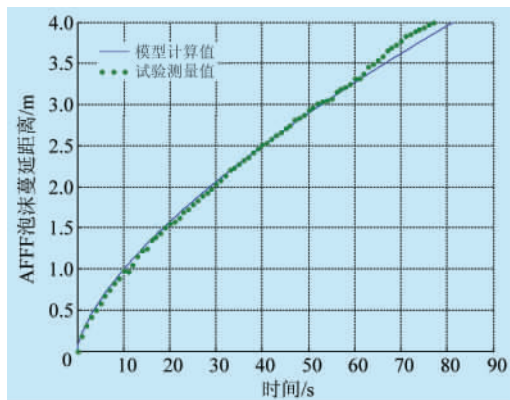


图4 蔓延距离随时间变化

Fig. 4 Foam spreading distance with time

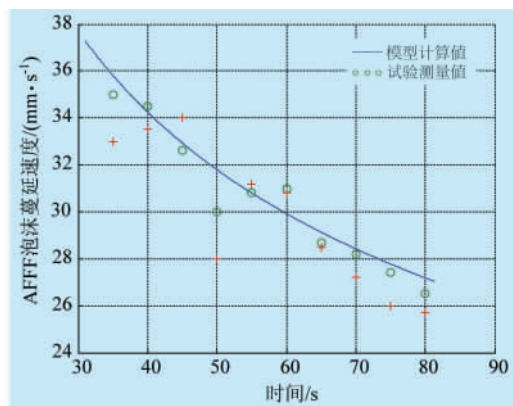


图5 速度随时间变化

Fig. 5 Foam spreading velocity with time

4.2 讨论

1) 从图4和图5可以看出,本文的蔓延模型的计算结果与实验结果基本一致,该蔓延模型能够较好地计算出泡沫的蔓延距离和某时刻某处的泡沫层高度。

2) 从图4可以看出,在 $t < 40$ s前试验结果略小于模拟结果,而当 $t > 60$ s后试验结果略大于模拟结果。主要原因是在泡沫蔓延较短时间内,由于流道边界的阻力作用导致总的黏性阻力 $\tau = \tau_b + \tau_f$ 大于泡沫和燃油界面间的阻力值;随着时间的增加,由于泡沫液的沉降作用,部分泡沫沉降到燃油层表面,泡沫液的密度变小。

3) 从图4可以看出, $x=2$ m和 $x=0.5$ m处的速度基本相同,说明泡沫的蔓延速度在任意时刻均相等,与距离无关,所以关于泡沫液和燃油界面间的阻力恒定假设成立。

5 结论

冷态缓释放条件下 AFFF 在方形浅油面上的蔓延模型能够较好地预测 AFFF 在流道内的蔓延距离和泡沫高度,泡沫液和燃油界面间的阻力是制约泡沫蔓延的主要因素^[10-12]。AFFF 和燃油特性一定的条件下,流量越大,时间越长,则蔓延距离越长;流量和矩形流道固定的条件下,泡沫和燃油界面的阻力

越小,则蔓延距离越长。同时,通过本文试验研究发现在较短时间内流道侧壁阻力使泡沫蔓延距离减小,较长时间内由于泡沫沉降因素使泡沫蔓延距离增加,泡沫厚度和泡沫覆盖冷却效果减小。这两种影响因素将是以后研究的重点。

参考文献 (References)

- [1] Darwin R L, Scheffey J L. Requirements for an aircraft carrier flight deck fire fighting test facility [R]. NRL/MR/6180-03-8668, Washington DC: Naval Research Laboratory, 2003.
- [2] Carhart H W, Leonard J T, Darwin R L, et al. Aircraft carrier flight deck fire fighting tactics and equipment evaluation tests [R]. NRL Memorandum Report 5952, Washington DC: Naval Research Laboratory, 1987.
- [3] Beene D E, Jr. Evaluation of Aqueous Film Forming Foams (AFFF) on deck fires [R]. ADA141928, Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1983.
- [4] Darwin R L. A review of the performance of AFFF systems serving helicopter decks on US navy surface combatants[R]. NRL/MR/6180-01-8546, Washington DC: Naval Research Laboratory, 2001.
- [5] 吴玉林, 刘树红. 黏性流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. Wu Yulin, Liu Shuhong. Viscosity hydrodynamics [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007.
- [6] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang. Hydrodynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [7] Lattimer B Y, Trelles J. Foam spread over a liquid pool [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42: 117-146.
- [8] Persson B, Lönnemark A, Persson H. FOAMSPEX: Large scale foam application—Modelling of foam spread and extinguishment [J]. *Fire Technology*, 2003, 39(4): 347-362.
- [9] Persson B, Lönnemark A, Persson H. FOAMSPEX—Final report [R]. SP Report 2001:13, Borås, Sweden, 2001.
- [10] Dahlberg M. Foam spread experiments on a water surface[R]. SP Report 1994: 16 1994.
- [11] Isaksson S, Persson H. Fire extinguishing foam—Test method for heat exposure characterisation[R]. SP Report 1997:20, Borås, Sweden, 1997.
- [12] Hanauska C, Lattimer B. Modeling of foam fire extinguishment [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 12: 113-120.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目由《中华读书报》“书评周刊”主编王洪波先生主持,发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容的图书。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以200字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁;投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。