

水成膜泡沫阻热性能模型

吴向君¹, 张光辉¹, 苏小博²

1. 海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033
2. 西安新竹防灾救生设备有限公司, 西安 710075

摘要 水成膜泡沫(AFFF)灭火剂是扑灭大型舰船甲板油面火灾最有效的灭火剂。阻热作用是水成膜泡沫灭火剂的主要灭火机制之一,当 AFFF 在火灾表面形成薄膜层后,一方面由于铺展作用,外部不断地补充 AFFF;另一方面,由于火灾的热辐射作用,AFFF 内部不断发生消融。消融的存在使 AFFF 厚度变薄,其阻热能力也不断降低,当 AFFF 下方的燃油达到闪点时,由于 AFFF 内部存在空气,下方的燃油可能发生复燃。定量分析 AFFF 的阻热性能,研究热态环境下 AFFF 内部温度场的分布情况是研究 AFFF 灭火效能的重要组成部分,对于防止火灾复燃和消防决策有重要意义。本文在建立固态消融模型的基础上,结合 AFFF 的消融特点和假设条件,建立 AFFF 消融的稳态模型,并补充 AFFF 密度、消融速率和组分速率计算模型,通过仿真求解 AFFF 内部温度场的分布,并和实验进行对比,得到实验值高于仿真值,误差在 10%以内。通过该模型的研究可以定量指导和计算单位面积油火需要的 AFFF 流量。

关键词 水成膜泡沫;阻热性能;消融

中图分类号 U664.88

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.20.013

A Heat Resistance Model of Aqueous Film Forming Foam

WU Xiangjun¹, ZHANG Guanghui¹, SU Xiaobo²

1. College of Ship and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China
2. Xi'an Xinzhu Fire & Rescue Equipment Co. Ltd., Xi'an 710075, China

Abstract Aqueous Film Forming Foam (AFFF) fire extinguisher is the most effective firefighting system for large scale oil fire on big warship deck. The heat resistance effect is one of the primary extinguishing mechanism of AFFF as the extinguishing agent. When the AFFF film layer is formed on the surface of fire, its spreading effect will continually feed AFFF from outside; and due to the heat radiation of the fire, AFFF continues to ablate inside. The presence of the ablation process makes AFFF thinner, the thermal resistance capacity will decrease. When the fuel under the AFFF reaches a flash point, the fuel may be re-ignited, due to the air inside of the AFFF. To improve the AFFF extinguishing efficacy, a quantitative analysis of the flame retardant properties of AFFF and the distribution of the temperature field in the AFFF thermal environment is of great significance. In this paper, a solid-state ablation model is proposed, and, based on this model, a steady-state ablation model of AFFF is established, combining the ablation characteristics of AFFF and some assumptions, concerning AFFF density, ablation rate and the components rate of model. The temperature distribution within AFFF can be obtained through simulations. The result of simulation is lower than the experimental result, with an error of within 10%. The model can be used to calculate the AFFF flux for oil fire per area on the warship deck.

Keywords aqueous film forming foam; thermal resistance properties; ablation

0 引言

水成膜泡沫(Aqueous Film Forming Foam, AFFF)灭火剂又称“轻水”泡沫灭火剂^[1-3],是国际上 20 世纪 60 年代发展起来的一种高效灭火剂。水成膜泡沫溶液以氟表面活性剂为主要原料,同时包括碳氢表面活性剂、稳泡剂、抗冻剂等助剂。

它具有高表面活性,灭火过程中 AFFF 沿着油品表面向四周扩散,由泡沫析出的液体在泡沫和油品之间的界面处形成一层水膜,该水膜不仅能隔绝燃料表面与氧气接触,还能对燃料表面进行冷却降温;同时,泡沫中析出的水在高温下蒸发为水蒸气,稀释燃料上方的氧气浓度,这 3 种因素协同作用,

收稿日期: 2010-10-28;修回日期: 2011-06-20

作者简介: 吴向君,工程师,研究方向为舰艇防险救生,电子邮箱: zghshining@sina.com

达到灭火效果。

国内外通过抗烧实验研究水成膜泡沫的阻热性能,例如中国 GB/T 15308—2006 标准^[4],美国 MIL-F-24385F 标准^[5],均将抗烧时间作为泡沫灭火剂阻热性能好坏的主要指标。由于水成膜泡沫结构的特殊性,其内部包含水、饱和水蒸气和空气,抗烧时间不能综合反映 AFFF 的阻热效果,AFFF 内部温度的变化情况则能更直接表示其抵御外部热辐射、保护火灾区域的能力。本文重点求解了不同 AFFF 在不同外部热辐射作用下内部温度的变化,并分析影响温度变化的主要原因。

1 AFFF 在热态环境的消融模型

消融问题是指物质内部因为能量变化导致物质质量变化的问题^[6-9],例如冰融化、物质燃烧等。消融问题的能量守恒方程求解对象主要是发生消融的动边界面。物质发生消融时,外部热量一部分被边界吸收并发生消融,另一部分被边界传递到物质内部(图 1)。

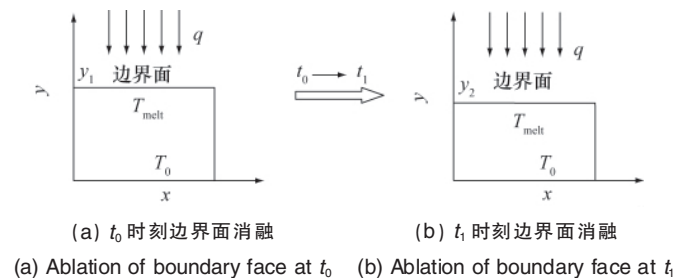


图 1 消融问题示意

Fig. 1 Schematic diagram of ablation problem

求解能量方程时,动边界面上消融温度是物质的熔点或闪点,远边界处的温度是初始温度,通过边界处的能量守恒方程,如式(1),可以求解消融速度和温度分布。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - u_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

其中, ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; u_t 为边界面上的消融速度, m/s ; T 为温度, K ; k 为热传导系数, $\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

稳态消融问题的能量守恒方程,如式(2),消融速度可以通过物质焓变求解。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \rho C_p u_t \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

1.1 AFFF 消融特点

AFFF 铺展时的消融问题和固体消融问题基本原理一致,当 AFFF 表面吸热时,AFFF 逐渐蒸发,边界面高度逐步降低,产生动边界面。但由于 AFFF 物质结构和组分的特殊性,其消融模型和一般单一连续固体物质的消融模型有很大区别,主要特点如下^[10]。

(1) AFFF 表面的吸热厚度不是无穷小,AFFF 发生吸热消融的区域不仅是 AFFF 的表面,还包括表面下方一定距离的空间,因此 AFFF 消融能量方程中必须包含体积吸热源项。

(2) AFFF 吸热过程中会发生膨胀现象,导致 AFFF 密度

ρ 是变量,且其膨胀率随温度变化,因此 AFFF 消融能量方程中的消融速度也是变量。

(3) 在固体消融问题中,当边界面达到熔点时,表面随即发生消融,而 AFFF 中存在大量的水,当 AFFF 吸热能量等于水的蒸发潜热时才能发生消融,因此 AFFF 消融能量方程的源项中还包含体积蒸发吸热项。

根据上述 AFFF 消融的特点,AFFF 消融能量方程为

$$\frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) - \rho C_p u(y) \frac{dT}{dy} + \dot{q}_g + \dot{q}_v = 0 \quad (3)$$

其中, $\frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right)$ 为热传导项, $\rho C_p u(y) \frac{dT}{dy}$ 为对流项; $\dot{q}_g$ 为

AFFF 体积吸热源项, kW/m^3 ; $\dot{q}_v$ 为 AFFF 体积蒸发源项, kW/m^3 ; $u(y)$ 表示 AFFF 消融方向上 y 处的消融速度, m/s 。

1.2 AFFF 消融假设条件分析

AFFF 消融能量方程式(3)是二阶非线性方程,有多个未知变量,且密度、消融速率均为非稳态项,源项更是复杂,为了能够求解该方程,除了应用数值求解外,还需对其进行假设简化^[10],补充多个方程组才能求解,其基本假设条件如下。

(1) 热力学平衡假设。AFFF 热力学平衡和多孔介质的热、质量传输问题相似。由于液态相和气态相之间的热响应时间远小于其他响应时间,可以假设 AFFF 的液相和气相间处于热平衡,换言之,任意位置处,任何时刻 AFFF 液相和气相的温度相等。

(2) 饱和假设。AFFF 中的气体包括空气和蒸汽,由于大面积的 AFFF 汽化时间相对较长,可以假设同一温度条件下,AFFF 内的蒸汽压等于饱和蒸汽压。

(3) 静态和稳态假设。静态假设是指在 AFFF 消融过程中不考虑自然沉降对 AFFF 密度的影响,只考虑蒸发和膨胀产生的密度影响。稳态假设,AFFF 消融是稳态消融,不考虑时间倒数项。

(4) 空气和蒸汽损失假设。假设随着 AFFF 温度的升高,AFFF 内部空气发生膨胀后从 AFFF 表面逃逸,同时随着吸热量增多,AFFF 气泡壁面变薄,气泡间隙内部液体蒸发后也从 AFFF 表面逃逸。

(5) 独立对流假设。由于 AFFF 内部空气和蒸汽的损失速率不同,产生了不同的对流项,为了保证质量和能量守恒,在考虑对流时,空气和蒸汽相的对流彼此独立。

(6) 理想气体假设。AFFF 内部的空气和蒸汽都假设是理想气体,满足理想气体条件。所有饱和气体和蒸汽的压力都假设为 1 个大气压,不考虑表面张力影响。

(7) 质量守恒假设。AFFF 消融模型的基础是质量守恒,且各相的连续方程表达式如下:

$$\frac{d[(1-f)\rho_a u_a]}{dy} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d(\rho u_t)}{dy} = \Gamma_1 \quad (5)$$

$$\frac{d[(1-f)\rho_v u_v]}{dy} = \Gamma_v \quad (6)$$

其中, f 为 AFFF 的液体体积分数; 下标 a 表示空气, l 表示液体, v 表示蒸汽。式 (5) 和式 (6) 中包含质量源项 Γ_l 和 Γ_v , $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 且 $\Gamma_l = -\Gamma_v$, 主要是因为液体质量损失全部转化为饱和蒸汽。

1.3 AFFF 源项计算模型

(1) 体积吸热源项计算

体积吸热源项描述热态环境下 AFFF 的吸热量, 计算体积吸热源项首先要掌握 AFFF 的吸热特性。由于吸热特性非常复杂, 不仅与热态环境的光谱特性有关, 而且与 AFFF 的结构、物理化学性质等有关, 无法用定量公式进行描述, 只能通过小尺度实验构建简化模型。体积吸热源项 $\dot{q}_s$ 表达式为

$$\dot{q}_s = -\frac{d}{dy} [q \exp(-\int_0^y Y(\rho_i) dy)] \quad (7)$$

其中, $Y(\rho_i) = -\frac{1}{y} \ln \frac{I(y)}{I(0)} \rho_i$, $I(y)$ 为 AFFF 存在时, 高度方向上 y 处的热辐射强度, kW ; $I(0)$ 为没有 AFFF 时, 高度方向上 y 处的热辐射强度, kW 。

(2) 蒸发吸热源项计算

蒸发吸热源项描述 AFFF 中饱和液体吸热转变为蒸汽的吸热量, 主要与蒸发质量速率和液体的蒸发潜热有关, 其中蒸发潜热是恒定值, 蒸发质量速率可以通过液体质量守恒连续方程求解, 则蒸发吸热源项为

$$\dot{q}_v = h_v \frac{d}{dy} (\rho_l f u_l) \quad (8)$$

其中, $h_v = 419 \text{ kJ/kg}$, 为 AFFF 中饱和液体的蒸发潜热。

1.4 AFFF 对流和热传导计算模型

(1) 对流计算

根据 AFFF 消融模型的对流假设条件, 在消融过程中, AFFF 中各组分的速率不同, 产生的对流传导彼此独立, 则对流项为各组分产生对流之和。

$$\rho C_p u(y) \frac{dT}{dy} = [f \rho_l C_{pl} u_l + (1-f)(\rho_v C_{pv} u_v + \rho_a C_{pa} u_a)] \frac{dT}{dy} \quad (9)$$

(2) 热传导计算

关于液态 AFFF 的热传导性能, 国内外很少有研究, 但是工业用的隔热材料和塑料泡沫的隔热性能有诸多研究, 例如 Schuetz 和 Glichsmann 在研究建筑防火固体泡沫材料的热传导性能时, 得到材料的热传导率经验公式^[11-12]

$$k_{\text{effective}} = k_{\text{gas}} + \left(\frac{2}{3} - \frac{P_s}{300} \right) f \cdot k_{\text{solid}} \quad (10)$$

其中, P_s 为组成泡沫结构的固体支柱材料占固体物质的质量分数; 下标 gas, solid 分别指气体和固体。式 (10) 只适用于各向同性的固体泡沫, 假设 AFFF 内所有的液体都构成了泡沫的气泡壁面, 则式 (10) 中的 $P_s = 0$, 修正后的 AFFF 热传导率公式为

$$k_f = k_a + \frac{2}{3} f \cdot k_l \quad (11)$$

通常情况下, 将 k_a 和 k_l 取为定值, $k_a = 0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $k_l = 0.67 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

将式 (7) — 式 (9)、式 (11) 代入式 (3), 得 AFFF 消融模型能量控制方程为

$$k_f \frac{d^2 T}{dy^2} - [f \rho_l C_{pl} u_l + (1-f)(\rho_v C_{pv} u_v + \rho_a C_{pa} u_a)] \frac{dT}{dy} - \frac{d}{dy} [q \exp(-\int_0^y Y(\rho_i) dy)] + h_v \frac{d}{dy} (\rho_l f u_l) = 0$$

2 AFFF 消融补充计算模型

从 AFFF 消融模型能量控制方程可以看出, 方程中除温度变量 T 外, 还包括 $\rho_v, \rho_l, \rho_a, \rho_f, u_v, u_l, u_a, f$ 8 个变量, 要求解方程, 还需补充 8 个方程组或计算模型。AFFF 密度计算模型用于求解 $\rho_v, \rho_l, \rho_a, \rho_f, f$; AFFF 消融速率和组分计算模型用于求解 u_v, u_l, u_a 。通过补充计算模型使控制方程封闭, 从而求解任意时刻 AFFF 铺展方向上温度分布。

2.1 AFFF 密度计算模型

AFFF 密度是消融模型中的一个重要特征参量, 由于 AFFF 组分特殊, AFFF 密度和各组分的密度、液体体积分数有关, AFFF 密度可表示为

$$\rho_f = \rho_l f + (\rho_v + \rho_a)(1-f) \quad (12)$$

AFFF 密度是一个随时间、温度、泡沫破损率、外部环境不断变化的瞬态值, 其主要原因是 AFFF 物质的动态特性。在 AFFF 成膜的初始时刻, 密度和温度均为定值, 此时液体体积分数为发泡倍数的倒数, 即 $f = 1/S$ 。随着 AFFF 内部液体不断蒸发、泡沫不断破裂, 蒸汽和空气不断从内部逃逸, f 不断减小, 密度也随之不断减小。因此, 不可能建立描述 AFFF 密度变化动态过程的模型, 只能建立理想 AFFF 密度模型, 然后进行修正, 得到和实际相符的密度模型。理想 AFFF 密度为

$$\rho_{f, \text{ideal}} = (m_a + m_l + m_v) / (V_a + V_l) \quad (13)$$

根据实际 AFFF 的特性, 在理想 AFFF 密度求解方法和结论的基础上, 可以得

$$\rho_{f, \text{real}} = \zeta \rho_{f, \text{ideal}} \quad (14)$$

其中, ζ 为修正因子, 且 $\zeta = 1 - \frac{T_{\text{ideal}} - T_i}{T_{\text{ideal}} - T_{\text{sat}}}$ ($\frac{T_{\text{sat}} - T_i}{T_{\text{ideal}} - T_i}$), T_{ideal} 为理想 AFFF 的温度, K ; T_i 为环境初始温度, K ; T_{sat} 为理想 AFFF 完全蒸发时的温度, $T_{\text{sat}} = 393 \text{ K}$; T_i 为实际 AFFF 完全蒸发时的温度, $T_i = 353 \text{ K}$ 。

2.2 AFFF 消融速率计算模型

AFFF 消融速率特指 AFFF 表面的消融速率, 由于已经假设 AFFF 消融是稳态消融, 可以采用稳态流控制体积分析 AFFF 消融速率。如图 2 所示, 随着 AFFF 消融, AFFF 表面逐渐向 AFFF 底部方向移动, AFFF 边界是动态边界, 但由于 AFFF 表面的消融边界条件始终恒定, 可以看作控制体以消融速率 u_f 逐渐向边界方向相对运动。

根据控制体能量守恒得

$$q + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_f h_f \quad (15)$$

其中, q 为外部来流热量, kW ; $\dot{m}$ 为面积 AFFF 质量流量, kg/s ;

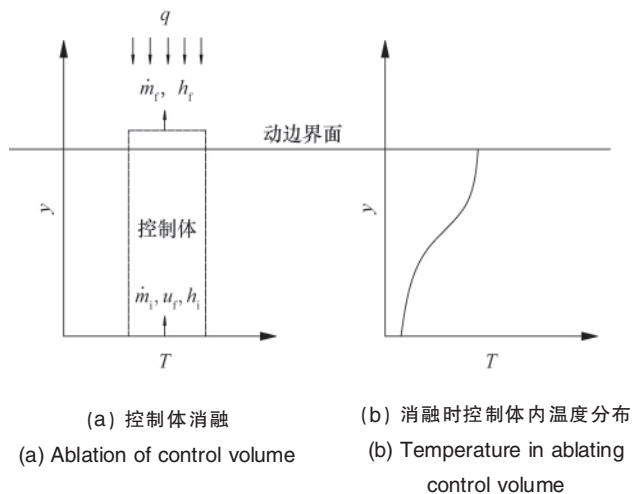


图2 稳态流控制体分析

Fig. 2 Steady flow analysis of control volume

h 为是比焓, kJ/kg。

AFFF 吸收外部热量后, 稳态控制体内的泡沫不断蒸发, 根据控制体的质量守恒, 进入控制体的质量流量等于流出控制体的质量流量, 即

$$\dot{m}_r = \dot{m}_i = [\rho_l \frac{1}{S} + (\rho_v + \rho_a)(1 - \frac{1}{S})] u_i \quad (16)$$

其中, S 为 AFFF 发泡倍数。

由于初始 AFFF 中蒸汽的质量很小, 可以忽略不计, 则

$$u_i = \frac{q}{\rho_l \frac{1}{S} (h_r - h_i) + \rho_a (1 - \frac{1}{S}) (h_r - h_i)_a} \quad (17)$$

由式(17)可以看出, AFFF 消融速率和外部热流量、发泡倍数、饱和液体组分密度、空气密度、初始到蒸发时刻的焓变有关。其中发泡倍数可以看作是常数, 一般通过实验测量得到, 饱和液体组分密度、空气密度、焓变均和温度有关, 可以通过查热力学表得到。

2.3 AFFF 组分速率计算模型

AFFF 组分速率是指 AFFF 在消融的过程中 AFFF 内部蒸汽、空气以及饱和液体的速率, 根据消融模型假设可知, 各组分的速率彼此不同, 产生的对流换热热量也不相同。各组分速率主要通过质量守恒方程求解。

(1) 饱和液体速率

假设 AFFF 内饱和液体相对于 AFFF 结构是静止的, 则饱和液体速率就是 AFFF 结构运动速率。饱和液体速率分析如图 3 所示。

采用拉格朗日分析法, 控制体 1 是指开始发生消融时的初始控制体, 此时该控制体以消融速率 u_i 向 AFFF 消融的反方向运动, 经历一定的时间 t 后, 控制体 1 内温度不断升高, 体积不断膨胀, 并向上运动, 变成控制体 2。对于一维消融模型, 当控制体的空间尺度 Y_1 和 Y_2 已知时, 饱和液体的速率可以表示为

$$u_i = -u_i \frac{Y_2}{Y_1}$$

当给定控制体 2 的温度, 可以测量计算体积膨胀率 $\frac{Y_2}{Y_1}$, 且 $\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{V_2}{V_1}$, 则

$$u_i = -u_i \frac{V_2}{V_1} \quad (18)$$

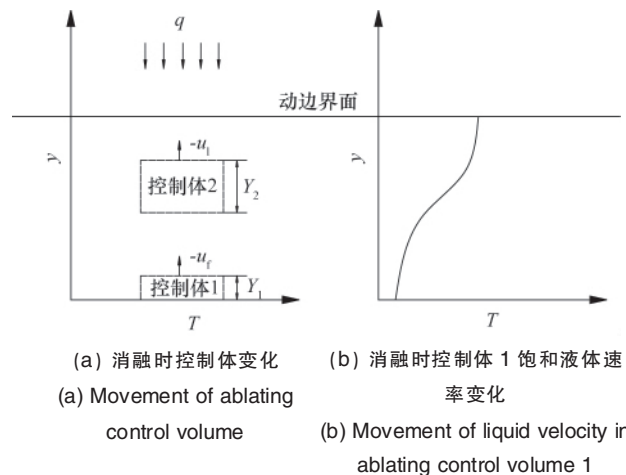


图3 饱和液体速率分析

Fig. 3 Liquid velocity determination

(2) 饱和蒸汽速率

饱和蒸汽本质是饱和液体, 只是物质的相不同。随着温度升高, 饱和蒸汽流量和速率都在不断增加, 如图 4 所示。

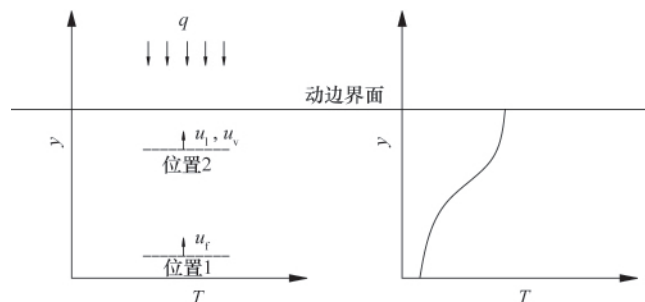


图4 饱和蒸汽速率分析

Fig. 4 Vapor velocity determination

位置 1 表示还未开始吸收外部热量时初始状态, 此时 AFFF 内部空气、饱和蒸汽和液体以消融速率 u_i 向 AFFF 消融的反方向运动, 位置 2 表示靠近动边界处的面, 此处 AFFF 各组分的消融速率各不相同。从消融模型假设条件可知, 任意位置处的饱和蒸汽和液体质量流量恒定, 则位置 1 处的质量流量为

$$\dot{m}_i + \dot{m}_v = \dot{m}_{i+v} = [\rho_l f + \rho_{v,i} (1 - f_i)] (-u_i)$$

位置 2 处的温度已知, 则组分的密度和体积分数可求, 液体质量流量为

$$\dot{m}_i = \rho_i f u_i$$

同理,位置 2 处的饱和蒸汽质量流量为

$$\dot{m}_v = \rho_v (1-f) u_v$$

则,饱和蒸汽的速率为

$$u_v = \frac{[\rho_i f_i + \rho_{v,i}(1-f_i)](-u_i) - \rho_i f u_i}{\rho_v(1-f)} \quad (19)$$

(3) 空气速率

空气速率计算和蒸汽速率计算相同,任意位置处的空气流量相等,则位置 1 和位置 2 处的空气流量计算公式联立得

$$u_a = \frac{\rho_{a,i}(1-f_i)(-u_i)}{\rho_a(1-f)} \quad (20)$$

3 仿真和实验

3.1 实验装置设计

AFFF 阻燃性能试验装置设计原理如图 5 所示。实验装置由以下几个部分组成:方红外热辐射加热器、泡沫盛装容器、沉降泡沫液盛装容器、热电偶若干。

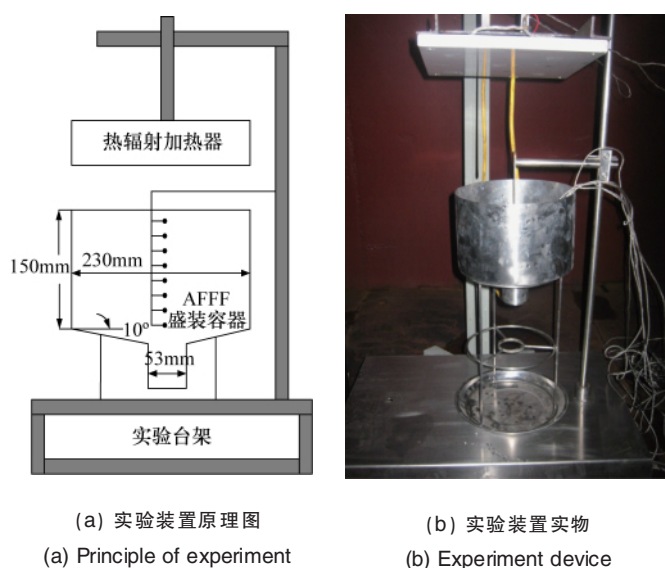


图 5 AFFF 阻燃性能实验装置

Fig. 5 Experiment device for measuring AFFF heat resistance

泡沫盛装容器为圆柱体,直径 230mm,高 150mm,厚度 1mm,不锈钢材质。容器底部为圆锥形(夹角 160°),用于盛装 AFFF 泡沫。

泡沫盛装容器顶部是 0.3m² 的形红外热辐射加热器,最大热辐射通量为 30kW/m²,热辐射通量的大小通过加热器与泡沫液表面的垂直距离进行调节,热辐射通量采用 MR-4 辐射热计进行标定,安装位置为 AFFF 表面中心。

在下方圆柱形容器中心处,以垂直间隔 0.01m 的距离布置 6 个铠型 0.5mm 直径的不锈钢热电偶,热电偶响应时间为 1s,数据采集时间间隔为 6s,从泡沫液表面至泡沫液底部的

热电偶次序依次为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#] 和 6[#]。实验分成 5 组:

- (1) 热辐射通量 $q=15\text{kW/m}^2$,AFFF 发泡倍数 $S=12$,配比 3%;
- (2) 热辐射通量 $q=15\text{kW/m}^2$,AFFF 发泡倍数 $S=18$,配比 3%;
- (3) 热辐射通量 $q=20\text{kW/m}^2$,AFFF 发泡倍数 $S=12$,配比 3%;
- (4) 热辐射通量 $q=20\text{kW/m}^2$,AFFF 发泡倍数 $S=18$,配比 3%;
- (5) 热辐射通量 $q=20\text{kW/m}^2$,AFFF 发泡倍数 $S=18$,配比 6%。

3.2 仿真和实验测量结果

各组实验测量结果如图 6—图 10 所示。

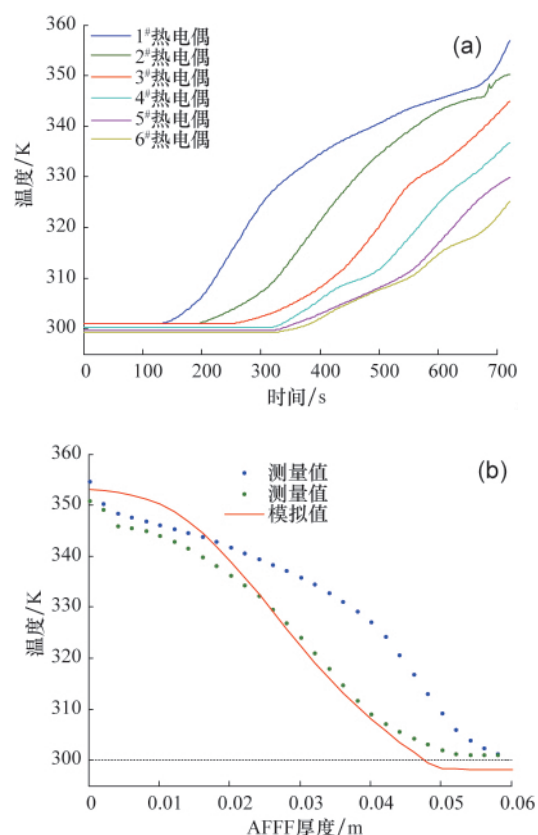


图 6 $q=15\text{kW/m}^2$,AFFF=3%, $S=12$,各测点(a)及厚度方向上(b)的温度分布

Fig.6 Measured (a) and distributed (b) temperature with heat flux $q=15\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=12$

从上述 5 组实验测量数据可以看出,当 AFFF 内部温度 $T>333\text{K}$ 时,由于泡沫破碎、重新组合等因素的影响,温度振荡较大,又当 $T<303\text{K}$ 时,环境温度影响较小,自然沉降影响占主导,曲线也出现跳跃,所以在整理实验数据的过程中,稳态温度梯度范围是 $303\text{K}<T<333\text{K}$ 。实验结果如表 1 所示。

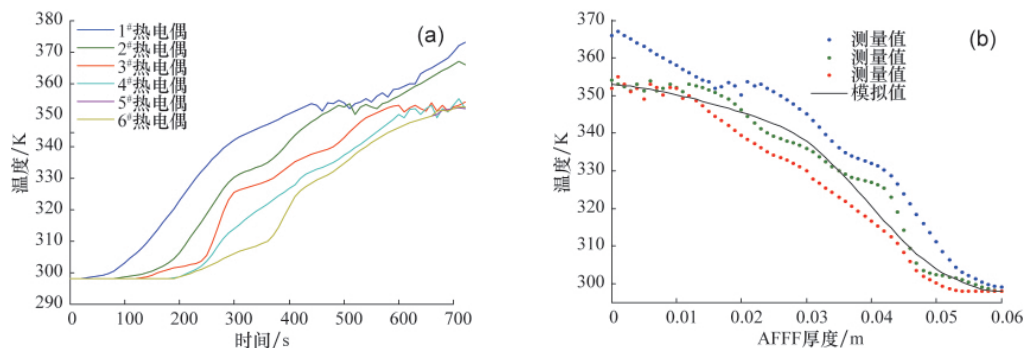


图 7 $q=20\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=12$, 各测点 (a) 及厚度方向上 (b) 的温度分布

Fig.7 Measured (a) and distributed (b) temperature with heat flux $q=20\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=12$

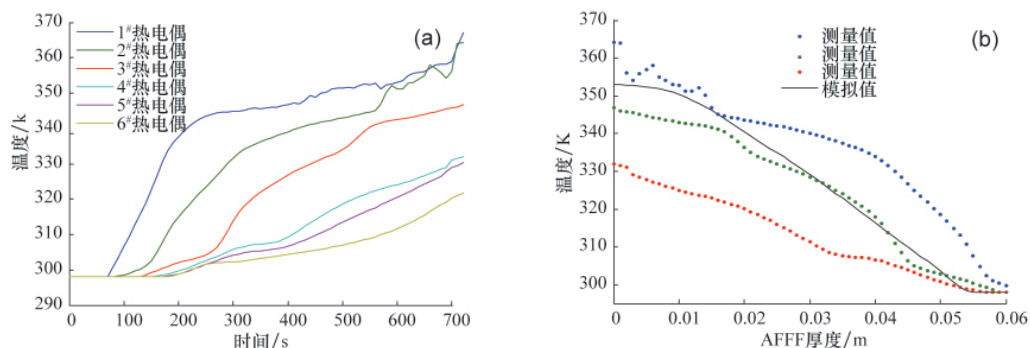


图 8 $q=15\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=18$, 各测点 (a) 及厚度方向上 (b) 的温度分布

Fig. 8 Measured (a) and distributed (b) temperature with heat flux $q=15\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=18$

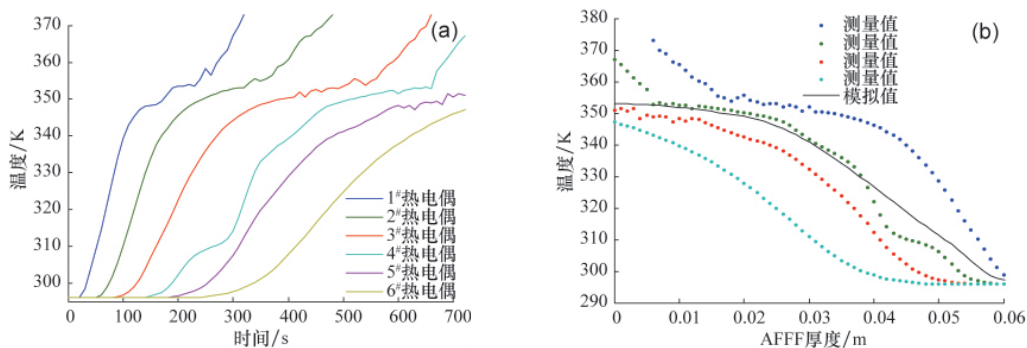


图 9 $q=20\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=18$, 各测点 (a) 及厚度方向上 (b) 的温度分布

Fig.9 Measured (a) and distributed (b) temperature with heat flux $q=20\text{kW/m}^2$, AFFF=3%, $S=18$

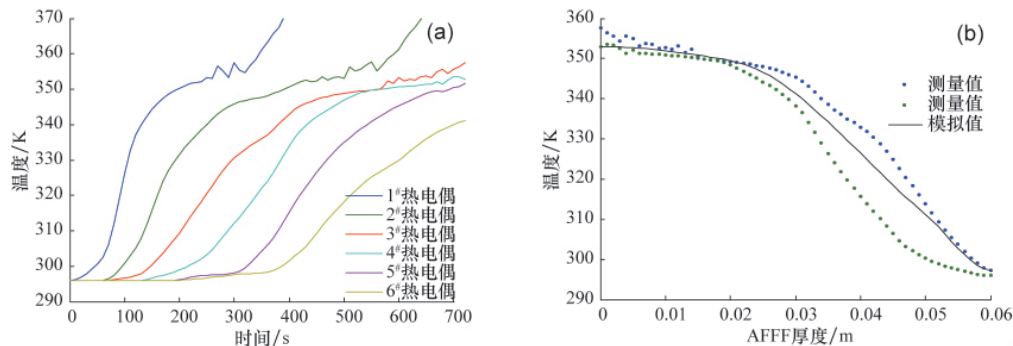


图 10 $q=20\text{kW/m}^2$, AFFF=6%, $S=18$, 各测点 (a) 及厚度方向上 (b) 的温度分布

Fig. 10 Measured (a) and distributed (b) temperature with heat flux $q=20\text{kW/m}^2$, AFFF=6%, $S=18$

表 1 5 组实验结论
Table 1 5 Experiments results

实验序号	发泡倍数	平均热辐射通量	配比浓度/%	测量平均温度梯度 (303—333K)/(K·m ⁻¹)	数值模拟平均 温度梯度/(K·m ⁻¹)	绝对误差	相对误差/%
第 1 组	12	15	3	-1438.72	-1304.67	-134.05	9.3
第 2 组	18	15	3	-1703.69	-1578.95	-124.74	7.3
第 3 组	12	20	3	-1549.01	-1401.72	-147.29	9.5
第 4 组	18	20	3	-1826.25	-1637.56	-188.69	10.3
第 5 组	18	20	6	-1685.76	-1538.46	-147.3	8.7

4 结论

本文从微观的角度把 AFFF 分成 3 种组分建立理论模型,并应用小尺度实验进行验证,得到如下结论。

(1) 阻热性能模型计算结果和实验结果的误差范围在 10%以内,采用该计算模型能够较好地反映 AFFF 内部温度变化。

(2) 5 组实验的测量平均温度梯度都高于数值模拟平均温度梯度值,主要原因包括两个方面,一是一部分 AFFF 沉降到了底部,导致 AFFF 液态水组分含量减小,体积吸热源项增加;二是实验装置泡沫盛装容器吸热,增加了壁面热传导效果,AFFF 内部吸热量增加。

(3) 在 AFFF 发泡倍数和配比浓度相同的情况下,平均热辐射通量增加,则温度梯度增加,实验测量值约为 22K·m/kW,数值模拟值约为 19.27K·m/kW,相对误差为 12.4%。

(4) 在 AFFF 热辐射通量和配比浓度相同的情况下,发泡倍数越大,温度梯度值越大,主要原因是 AFFF 密度减小,液态水含量较少,且降低泡沫容易破裂,阻挡热辐射的能力降低。

(5) 相同条件下,6%配比的 AFFF 阻热性能比 3%配比的阻热效果好,平均温度梯度小于 100K/m,主要原因是 AFFF 的化学活性剂含量大。

参考文献 (References)

[1] 张宇, 廖光焯. 一种新型高铺展性水成膜泡沫的性质以及灭火性能研究[J]. 火灾科学, 2008, 17(1): 1-6.
Zhang Yu, Liao Guangxuan. *Fire Safety Science*, 2008, 17(1): 1-6.
[2] 肖进新, 罗妙宣, 胡昌明. 碳氟表面活性剂在有机液体中的表面活性[J]. 精工化学, 2000, 17(2): 63-65.
Xiao Jinxin, Luo Miaoxuan, Hu Changming. *Fine Chemicals*, 2000, 17(2): 63-65.

[3] 肖进新, 暴艳霞, 寿建宏, 等. 碳氟-碳氢表面活性剂混合水溶液在油面上铺展[J]. 化学研究与应用, 2002, 14(2): 137-140.
Xiao Jinxin, Bao Yanxia, Shou Jianhong, et al. *Chemical Research and Application*, 2002, 14(2): 137-140.
[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 15308—2006 泡沫灭火剂[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 15308—2006 Foam extinguishing agent[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
[5] MIL-F-24385F Fire extinguishing agent, aqueous film-forming foam (AFFF) liquid concentrate for fresh and sea water [S]. Military Specification, 1992.
[6] 秦妍, 李维仲. 利用移动网格技术模拟冰消融过程中的传热问题[J]. 热科学与技术, 2005, 4(3): 213-218.
Qin Yan, Li Weizhong. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2005, 4(3): 213-218.
[7] Furzeland R M. A comparative study of numerical methods for moving boundary problems[J]. *J Inst Math Appl*, 1980, 26(4): 411-429.
[8] Asaithambi N S. A galerkin method for stefan problems [J]. *Appl Math Comput*, 1992, 52(2-3): 239-250.
[9] Menniga J, Özisik M N. Coupled integral equation approach for solving melting or solidification[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1985, 28(8): 1481-1485.
[10] Boyd C F, diMarz M. Fire protection foam behavior in a radiative environment [R]. New York: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Techonlogy, 1996.
[11] 余其铮. 辐射换热基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
Yu Qizhen. *Radiation heat transfer*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
[12] 张光辉, 浦金云, 陈晓洪. 冷态缓释释放条件下 AFFF 泡沫在方形浅油面上的蔓延模型研究[J]. 科技导报, 2009, 27(21): 95-98.
Zhang Guanghui, Pu Jinyun, Chen Xiaohong. *Science and Technology Review*, 2009, 27(21): 95-98.

(责任编辑 代丽)



《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。