

基于FDS软件的飞机加油车油罐火灾模拟研究

徐广垒

中国航空油料有限责任公司云南公司 云南昆明 650200

摘要: 近年来,国内外接连发生多起火灾爆炸事故,产生较为严重的社会影响。飞机加油作业位于机场机坪,飞机加油车油罐一旦发生火灾,将产生严重的社会影响。文章以飞机加油车油罐火灾为研究切入点,结合航空煤油的特性、油罐车油罐的结构及着火相邻部位热辐射强度等方面进行了模拟研究,对于行业内外飞机加油车油罐火灾的预防和应急处置具有较强指导意义。

关键词: 火灾;飞机加油车;油罐

一、绪论

(一) 研究背景和意义

飞机加油车作为航油供油保障的核心设备,它的安全性直接影响供油安全,再加上航空燃料的易燃性等危险性的叠加,加油车火灾发生后会对生命财产和社会影响造成严重危害。因此针对飞机加油车开展火灾发生、发展及蔓延规律进行研究,对保障飞机加油车供油安全具有重大的现实意义。

(二) 国内外研究现状

目前国内、外未对飞机加油车火灾特性开展相关研究。但结合其他车辆的研究内容,现对车辆火灾特性的研究方法主要为全尺寸火灾试验、缩小比例模型火灾试验和数值模拟等三种方法^[4]:全尺寸火灾试验,缩小比例模型试验,火灾数值模拟。

(三) 主要研究内容及方案

对目前加油车油罐火灾的研究背景和研究现状进行全面的回顾、归纳和总结。通过建立的加油车油罐仿真模型进行数值模拟,通过模拟曲线分析不同工况对加油车油罐发生火灾的影响因素,总结加油车油罐发生火灾的特性的发展规律。

二、飞机加油车油罐火灾特性及FDS基本原理

(一) 飞机加油车油罐火灾发展的基本过程

对于加油车火灾来说,由于加油车实际工况比较复杂,根据火灾的发展一般可分为三个主要阶段,分别为初期增长阶段、充分发展阶段和衰退阶段^[4]。

初期增长阶段的特点是燃烧点的平均温度较低,若此时空间内氧气充足或是火灾没有被有效控制,在热传导和火焰热辐射的作用下热释放速率会迅速增加,火灾

的规模迅速增大。当火灾进行到充分发展阶段时,燃烧空间内部可燃材料燃烧极为猛烈,此时火灾的HRR会达到最大值,空间内瞬时温度会达到800℃以上。在这个阶段,火场中的一切可燃材料乃至车体自身骨架结构均会受到严重的损坏。

(二) FDS基本原理

火灾动力学仿真软件FDS(Fire Dynamics Simulator)以大涡模拟(LES)为主要计算方法,以直接数值模拟(DNS)为辅助计算方法,对Navier-Stokes方程进行求解,对火灾过程中温度的变化、烟气的分布、气体组分浓度等一系列火灾状态参数进行预测和分析。

1. 基本控制方程

火灾数值模拟的本质,就是以流体流动过程中所遵循的各大物理定律为理论基础,对火灾过程中描述流体运动状态的基本控制方程进行求解,得出计算区域内的温度、烟气密度、气体流速、压力等参数。FDS中各基本控制方程的表达式如下^[4]:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0$$

式中: ρ ——气体密度, kg/m³;

t ——模拟时间, s;

\vec{u} ——速度矢量, m/s

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla p = \rho \vec{g} + \vec{f} + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

式中: \vec{g} ——重力加速度, m/s²;

p ——环境压力, Pa;

\vec{f} ——除去重力以外的其他表面力, N;

τ_{ij} ——牛顿流体粘性应力张量, N。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \vec{q}_r + \nabla \cdot \vec{u} P + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_{s,i} \rho D_i \nabla Y_i$$

式中: q_r ——辐射热通量向量, W/m²;

h_s ——显焓, J/kg;

T ——热力学温度, K;

k ——导热系数, W/(m·K)。

三、飞机加油车油罐火灾模拟模型建立

(一) 飞机加油车油罐数值模型建立

本报告采用3D建模软件3DMAX对加油车的简化为按照加油车长、宽、高、油罐参数实现1:1建模。图3-1为飞机加油车实景,图3-2为飞机加油车简化模型,表3-1为飞机加油车油罐主要参数。



图3-1 飞机加油车实景



图3-2 飞机加油车简化几何模型

表3-1 飞机加油车油罐主要参数

基本信息	
燃料种类:	柴油
罐体尺寸:	3.78 × 1.8 × 1.3 米
罐体容积:	6.81m ³
运输介质:	汽油, 航空煤油
介质密度:	0.73 吨/立方米

(二) 飞机加油车材料燃烧模型设置

Pyrosim为火灾动态模拟(FDS)提供了一个图形用户界面,提供了三维图形化前处理功能,可视化编辑可实现在构建模型的同时,可方便查看所建模型,使用户从以前使用FDS建模的枯燥复杂的命令行中解放出来,创建火灾模拟,准确地预测火灾烟气流动、火灾温度和

有毒有害气体浓度分布^[2]。

罐体我们采用的是镁铝合金,在飞机加油车罐体上装有FQJ型浮球液位计,可随时了解罐体内的油量情况。图3-3为材料燃烧模型设置。

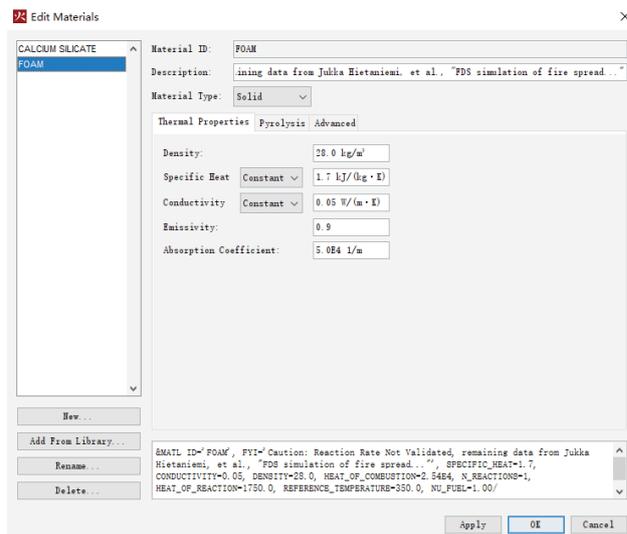


图3-3 材料燃烧模型设置

在本文中只需要模拟在室外的环境即可,由于FDS默认的环境为封闭空间,所以需要利用VENT语句来使四周成为敞开状态。由于设置的热释放速率始终为定值^[1],所以模拟时间不需要太长。本文发现在FDS在模拟小尺寸燃烧情况时,一般在5s后火焰就趋于稳定了。在这里将模拟时间设置为300s。池火灾事故造成的主要危害是油品燃烧产生辐射热值,火灾燃烧时有2个主要特征,一是火焰场温度不断上升,二是附近物体的热辐射强度持续增加。油池燃烧造成的热辐射通量的伤害阈值如表3-2所示。

表3-2 油池燃烧造成的热辐射通量的伤害阈值

热辐射通量/ (kW·m ⁻²)	设备损坏后果	人员受伤后果
37.5	操作设备全部毁坏	10 s内死亡率1%; 1 min内死亡率100%
25.0	受热辐射影响时间较长时,木料燃烧的最小能量	10 s内重伤; 1 min内死亡率100%
12.5	木料燃烧,塑料熔化的最小能量	10 s内一度烧伤; 1 min内死亡率1%
4.0	玻璃暴露30 s后破裂	20 s内感到疼痛; 长时间暴露不会有不适感

(三) 飞机加油车油罐火灾工况设置

结合航空煤油加油车油罐火灾发生位置,本报告设置了火灾场景。



图3-4 油罐火源位置

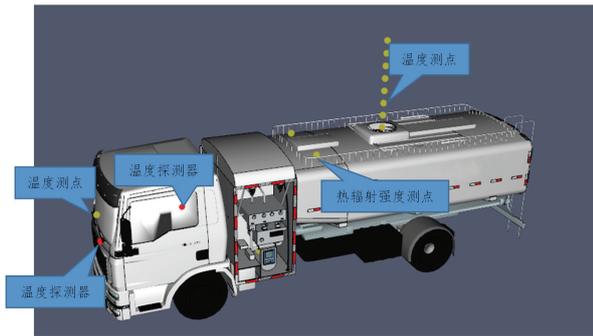


图3-5 油罐火灾测量装置设置

四、飞机加油车油罐火灾数值模拟结果分析

(一) 火灾蔓延情况

油罐内部发生火灾后，烟气约50s充满，随后火焰蔓延出灌口，整个燃烧过程，操作台和驾驶室处未发生燃烧。下图展示了场景3的火灾烟气蔓延过程。



图4-1 油罐火灾烟气蔓延过程

(二) 油罐口上方温度

油罐液面火温度出现先升高后下降趋势，最高温度分别达到约1000℃。由于油罐为密闭空间，初期氧气降

低，后期火灾从灌口溢出，从外界补充空气，温度又出现升高。

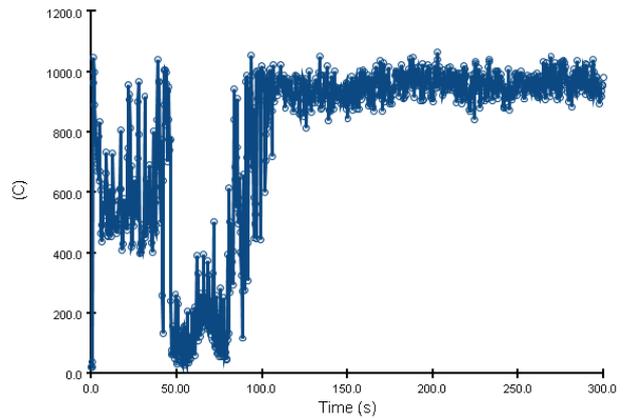


图4-2 油罐口上方温度变化

(三) 油罐前部上方热辐射强度

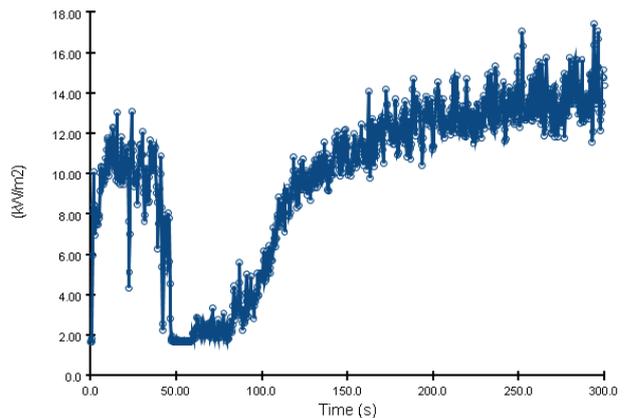


图4-3 油罐前部上方热辐射强度变化

(四) 油罐与操作台相邻部位热辐射强度

油罐与操作台部位设置热辐射强度切片云图如下图所示，热辐射强度最大值位于上部，最大值约10kW/m²，油箱部位接受的热辐射强度最大值约1.0kW/m²。火灾对驾驶室和操作台几乎没有影响。

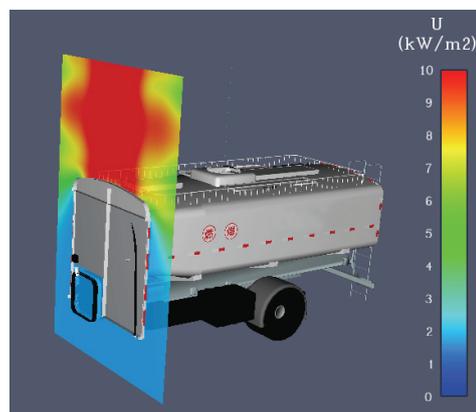


图4-4 油罐与操作台相邻部位热辐射强度

（五）前玻璃和左右窗玻璃温度

在前玻璃和侧窗玻璃位置设置温度测点，监测对驾驶室的影响，前窗、侧窗玻璃处的温度最大值约21℃，远远小于玻璃的高温破碎温度350℃，油罐火灾时不会造成车头前窗和侧窗玻璃被破坏。

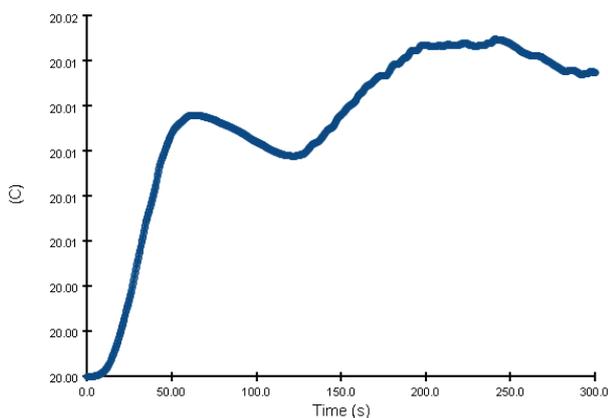


图4-5 前玻璃和左右窗玻璃温度变化

结论

综上所述，飞机加油车油罐火灾可预防和前期处置可能性较大。为此，文章以飞机加油车油罐火灾为研究切入点，结合当前国内外接连多发火灾爆炸事故，从航煤的特性、油罐车油罐的结构、相邻部位的热辐射强度等方面进行了具体模拟研究，对于行业内外飞机加油车油罐火灾的预防和应急处置具有较强指导意义。

参考文献

- [1] 陈贻来. 单个小汽车火灾热释放速率影响因素分析[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(5): 379-382.
- [2] 薛伟, 张光俊. 吉林林业科技: FDS火灾模拟与应用[J]. 2006-11, 35(6): 18-20.
- [3] 陈洁. 大型客车火灾蔓延规律数值模拟研究[D]. 中南大学, 2014.
- [4] 刘汉. 纯电动公交车火灾特性的数值模拟研究[D]. 长安大学, 2021.