

刘伟,李越. 室外油池火燃烧特性实验研究与数值模拟[J]. 矿业科学学报,2020,5(3):302-310. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2020.03.008
Liu Wei, Li Yue. Experimental study and numerical simulation on combustion characteristics of outdoor oil pool fire[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(3):302-310. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2020.03.008

室外油池火燃烧特性实验研究与数值模拟

刘伟,李越

中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100083

摘要:本文选取低硫原油、高硫原油和重石脑油,进行了不同燃烧面积的室外开放空间自由燃烧实验,获得燃烧速率、火焰温度和测点热辐射通量的实验数据,并使用FDS建立全尺寸模型对火焰温度和测点热辐射通量进行模拟。研究表明:(1)低硫原油和高硫原油均出现三个燃烧阶段,在燃烧初期发展阶段燃烧速率近乎以线性趋势增大;稳定燃烧阶段不明显,未出现明显的多个稳定燃烧阶段;重石脑油出现沸腾燃烧阶段。(2)油盘中心温度随高度的增加先增大后减小,火羽流外侧温度随高度增加而减小,这种下降趋势先急后缓;在连续火焰区高温集中,在间歇火焰区和浮力羽流区温度变化较大。(3)将燃烧速率曲线自定义到FDS中,可以实现对测点接收热辐射通量的准确模拟;将圆柱模型中火焰辐射通量分为底部发光区域和上方烟羽流进行计算时,火源功率越大,计算值与测量值越接近;对于大功率油池火,可以确定“安全距离-时间”临界曲线,得到距火源中心不同位置处人员可以暴露的时间。

关键词:大尺寸油池火;燃烧速率;火羽流温度;热辐射

中图分类号:X 937

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2020)03-0302-09

Experimental study and numerical simulation on combustion characteristics of outdoor oil pool fire

Liu Wei, Li Yue

School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: In this paper, low-sulfur crude oil, high-sulfur crude oil and heavy naphtha oil were selected to carry out free combustion experiment with different combustion areas in outdoor open space, and the experimental data of combustion rate, flame temperature and heat radiation flux at measuring points were obtained. In addition, FDS was used to establish a full-size model to obtain the simulation results of flame temperature and heat radiation flux at measuring points. The results show that: (1) Both low-sulfur crude oil and high-sulfur crude oil have three combustion stages. The combustion rate increases almost in a linear trend in the initial development stage of combustion. The stable combustion stage is not obvious, and there are not many obvious stable combustion stages. Heavy naphtha shows boiling combustion phase. (2) The temperature at the center of the oil pan first increases and then decreases with the increase of the height, while the temperature outside the plume decreases with the increase of the height, and this downward trend is first sharp and then slow. In the continuous flame area, the high temperature concentration tends to be stable, and in the intermittent flame area and buoyancy plume

收稿日期:2019-09-01 修回日期:2019-10-22

基金项目:国家自然科学基金(51604277);中国博士后基金(2018M630183)

作者简介:刘伟(1985—),男,安徽宁国人,副教授,主要从事矿井火灾及瓦斯防治等方面的研究工作。Tel:13426072158, E-mail: liuwei7230@qq.com

area, the temperature dispersion degree is larger. (3) By customizing the combustion rate curve into FDS, accurate simulation of heat radiation flux received at the measuring point can be achieved. When the flame radiation flux in the cylindrical model is divided into the luminous region at the bottom and the plume at the top, the higher the power of the fire source, the closer the calculated value is to the measured value. For the high-power oil pool fire, the critical curve of "safety distance-time" can be determined to obtain the time that people can be exposed at different locations from the fire source.

Key words: large size oil pool fire; combustion rate; fire plume temperature; thermal radiation

可燃性油品在装卸、储运过程中可能泄漏,当油品泄漏到地面后受地形限制,将在某一限定区域内积聚,若遇到火源将引发油池火灾,造成人员伤亡和财产损失^[1]。因此,有必要对油池火开展深入全面的研究,以准确认识其致灾机理。

近几十年来,油池火灾被广泛地研究。在研究内容上,主要包括基本燃烧特性、温度场和热辐射场。孔得朋等^[2]为探讨不同直径及初始油层厚度对沸溢火灾燃烧速率的影响,进行了小尺度沸溢油池火灾燃烧速率特性实验研究,并在此基础上建立了沸溢强度模型。吴向君等^[3]在封闭空间开展了油池火实验,研究不同羽流模型的适用性。陈阵等^[4]对油池火经典热辐射模型的适用性进行了总结分析。在研究思路,主要从实验环境和燃油两个方面设置实验工况。张培红等^[5]进行了不同通风条件下柴油池火实验,对比分析不同通风条件下燃烧及引燃特性。张云杰等^[6]通过不同尺寸油池火灾实验,主要研究了临界参数。在研究方式上,主要有全尺寸实验研究、小尺寸实验研究和数值模拟三种。康泉胜^[7]开展了小尺度油池火实验,对其非稳态燃烧特性和热力学过程进行了细致的研究。Sikanen等^[8]使用FDS研究了火焰对液体燃料表面辐射和对流热反馈问题。周健楠等^[9]用FDS对丙烷储罐内池火灾进行数值模拟,确定其热辐射分布规律及烟气影响范围,进而分析了事故后果。然而,油池火研究还不够多样、大尺寸实验研究不够充分^[10]、火羽流外侧温度研究还不够系统、数值模拟不够准确。

针对以上研究现状和问题,本文选择低硫原油、高硫原油和重石脑油在室外开放空间进行不同燃烧面积的自由燃烧实验,并将实验得到的燃烧速率自定义输入FDS中,对每组实验进行模拟。首先,通过比较各实验燃烧速率变

化曲线,探究不同种类油料在不同燃烧面积时各燃烧阶段的变化特征与联系;其次,依据油盘正上方温度测量数据,分析在不同燃烧阶段油盘中心线和外侧温度分布及其变化机理,并与FDS的模拟结果进行比较;再次,选择典型的辐射模型对测点接收热辐射通量进行计算,将其与模拟值和实验值进行对比,分析适用性;最后,对于大功率油池火灾,确定其“安全距离-时间”临界曲线,得到距火源中心不同位置处人员可以暴露的时间。通过实验和数值模拟研究,从燃烧速率、火羽流温度和测点接收热辐射通量三个方面认识油池火灾的燃烧特性,为科学防治提供理论基础。

1 实验设置与模拟

1.1 实验设置

选择低硫原油、高硫原油和重石脑油在室外开放空间进行自由燃烧实验,实验编号和燃料的基本性质见表1。

为降低自然风对池火影响,在油盘来风向和垂直于风向搭建挡风板,燃烧过程中燃烧区未出现明显的风流。实验选用的单个油盘内部长、宽、高分别为0.841 m、0.595 m、0.13 m,油盘数量按照2、4、6递增,油盘面积依次为1 m²、2 m²、3 m²;在其中一个油盘底部布置天平,记录质量随时间的变化;在与油盘上边沿相同高度水平距火源中心2.5 m、4.5 m、6.5 m处布置辐射热流计,记录热辐射通量随时间的变化;在油盘正上方距地面0.5 m处布置一束热电偶,间距为0.3 m,对于Test1—Test5和Test8,热电偶布置在油盘中心位置,记录火羽流内部温度随时间的变化;对于Test6和Test7热电偶布置在油盘外侧,记录火羽流外部温度随时间的变化。实验装置布置如图1所示。

表 1 实验编号和油料的基本性质

Tab. 1 Experimental numbers and basic properties of oils

实验编号	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
油料	低硫原油	高硫原油	重石脑油	低硫原油	高硫原油	低硫原油	高硫原油	重石脑油
油盘个数	2	2	2	4	4	6	6	4
油盘面积/m ²	1	1	1	2	2	3	3	2
燃烧热/(MJ·kg ⁻¹)	42.6	42.6	44.5	42.6	42.6	42.6	42.6	44.5
密度/(kg·m ⁻³)	822.0	833.2	703.3	822.0	833.2	822.0	833.2	703.3

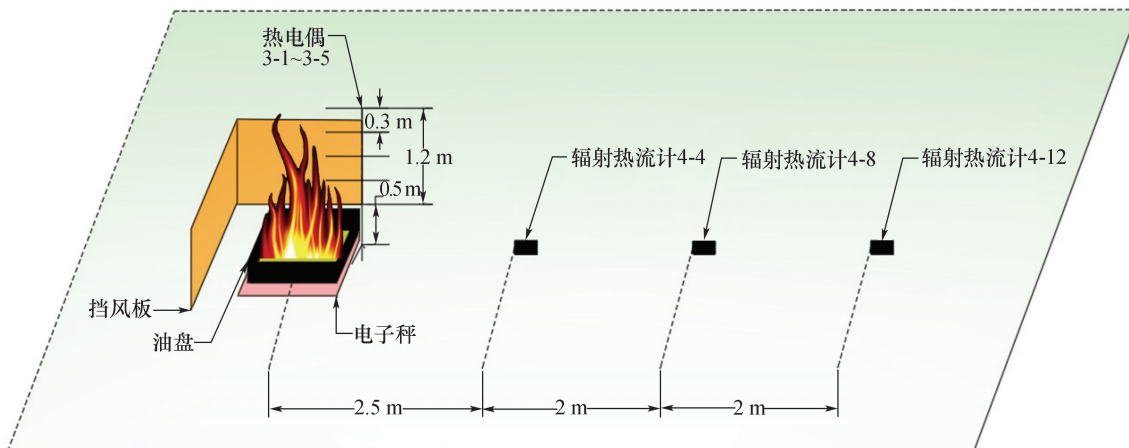


图 1 实验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement

1.2 模拟简介

本文依据实验环境,确定模拟区域的长、宽、高分别为 9 m、5 m、5 m,经计算和网格独立性验证之后,选用 0.15 m×0.15 m×0.15 m 的方形网格。网格四周和顶部的边界条件设置为开放,网格底部设置为 0.5 m 厚水泥,环境温度为 295 K,立体角数设定为 800,烟灰产率 0.1。油盘摆放、热电偶和热辐射计布置与实验情况保持一致。

在 FDS 中,定义燃烧反应的方式有两种:一种是指定单位面积热释放速率,另一种是指定燃烧热与其他热参数。这两种情况下,燃烧模型都可被使用,本文选择前者,将实验得到的燃烧速率曲线自定义输入到 FDS 中,选用 LES 湍流模型进行数值模拟。FDS 技术参考指南^[11]中详细地介绍了 FDS 的求解原理。其中,能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) = \frac{d\bar{p}}{dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}''$$

$$\dot{q}''' = - \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha}''' \Delta h_{f,\alpha}$$

$$\dot{q}'' = - \lambda \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Z_{\alpha} + \dot{q}''_r$$

式中, \dot{q}''' 为单位体积热释放率; \dot{q}_b''' 为转移到粒子上的能量; \dot{q}'' 为传导的、对流的和辐射的热通量; \dot{m}_{α}'''

为 α 物质的生成率; λ 为热导率; D_{α} 为 α 物质的热扩散率。

2 结果分析与讨论

2.1 燃烧速率

燃烧速率作为油池火的基本参数,是研究燃烧特性的基础。低硫原油、高硫原油和重石脑油在油盘面积分别为 1 m²、2 m²、3 m² 时,燃烧速率随时间的变化曲线如图 2 所示。文献[12]已经简要提及本文各实验燃烧速率随时间的变化规律,本文将对其变化机理进行详细讨论。

由图 2(a)(b)可知,低硫原油和高硫原油的燃烧过程均可以划分为三个燃烧阶段,即初期发展阶段、准稳态燃烧阶段和衰减熄灭阶段。在燃烧的初期发展阶段,燃烧速率近似线性趋势增大,迅速达到峰值,且油盘面积越大,这种趋势越明显,燃烧速率峰值越早到达。由此可知,在防治原油池火灾时,应着重控制燃烧面积,避免形成过大的原油燃烧面积,以最大程度减小池火灾带来的危害。燃烧速率达到峰值之后,在一定范围内保持较小波动趋势,称之为准稳态燃烧阶段。由低硫原油和高硫原油燃烧速率变化曲线可以看出其稳定燃

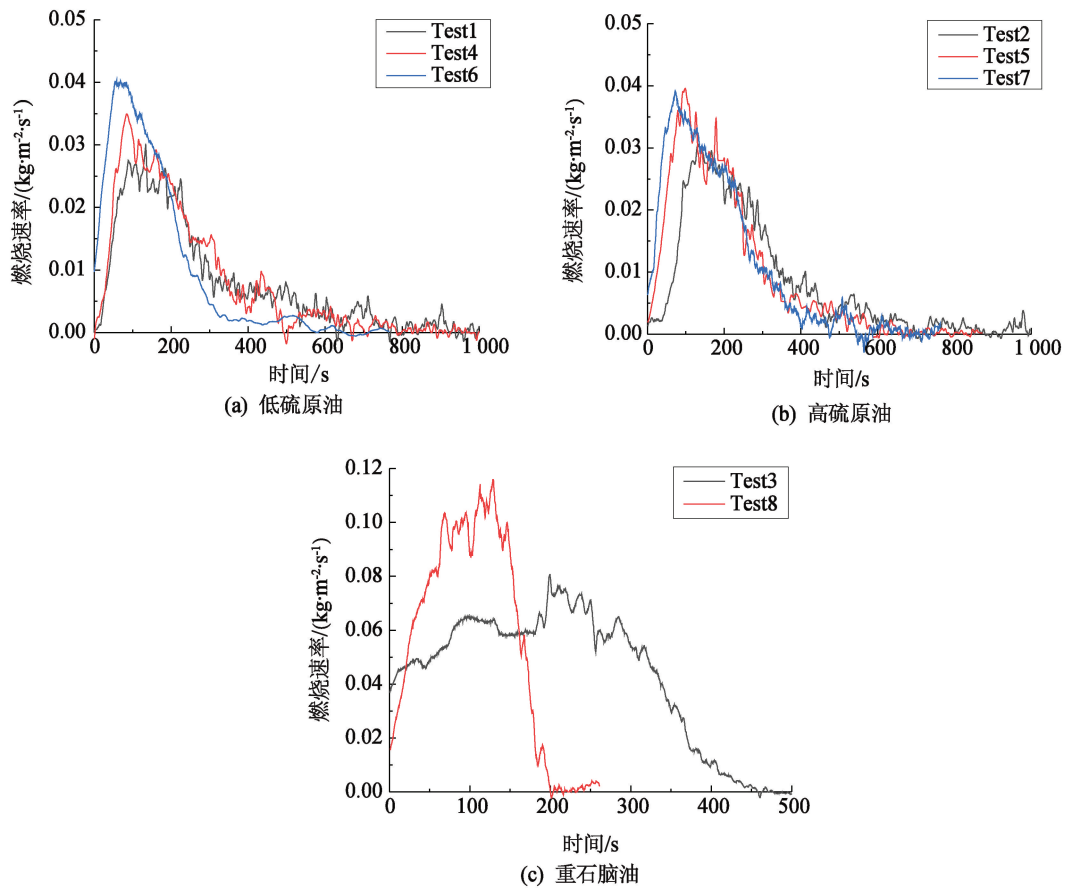


图2 燃烧速率随时间的变化

Fig. 2 Change of combustion rate with time

烧阶段持续时间很短,这主要是因为原油是多组分混合物,没有固定的沸点,燃料不能以恒定的速率吸热蒸发。在准稳态燃烧阶段之后燃烧速率呈快速下降趋势,直至燃烧结束,此过程为衰减熄灭阶段。在整个燃烧过程中并未出现明显的多个稳定燃烧阶段,此现象与隧道内小尺寸原油池火的燃烧速率出现多个稳定燃烧阶段显著不同^[12]。一方面是因为本论文所进行的实验油盘面积较大,属于大尺寸油池火燃烧,原油升温迅速,多组分的沸腾蒸发过程发生在短时间内,彼此分界不明显,基本呈现出一个准稳态燃烧阶段,并且随着油盘面积的增大这种现象更为明显;另一方面是由于燃烧环境的影响,隧道属于狭长的受限空间,燃烧过程中会受到氧气浓度和空气流动等多重因素的影响。

由图2(c)可以看出,在重石脑油燃烧的准稳态阶段燃烧速率迅速增至最大,考虑本文所进行的实验油料厚度均为0.01 m,综合实验现场观察到油池壁出现的气泡和火焰高度的变化特征,可以断定此阶段为沸腾燃烧阶段。在沸腾燃烧阶段油池

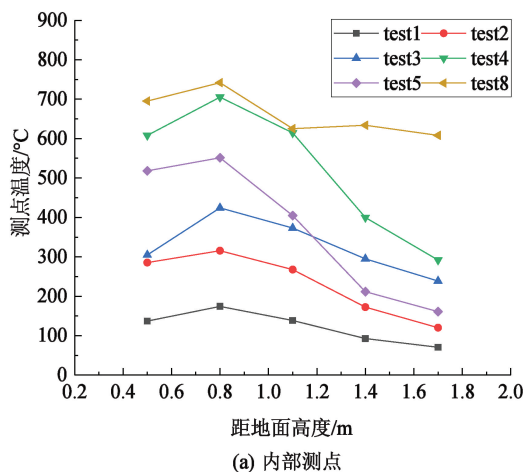
壁产生了沸腾现象,液面和池壁的燃料大量气化,致使燃料蒸气在短时间内迅速增加,燃烧速率快速增大。该结果与康泉胜等^[13]对油池火沸腾燃烧阶段研究时出现的现象类似,这说明油池火的沸腾燃烧与油品性质和厚度关系紧密。

在整个燃烧过程中每个实验燃烧速率均出现小幅度的波动。这一方面是由于环境对称重系统的影响;另一方面是因为原油属于多组分油品,燃烧时产生的燃料蒸气不是单一组分,不利于燃烧速率的稳定。在整个燃烧过程中出现的燃烧速率波动,一定程度上影响着火焰脉动和跳跃现象的产生,这种影响在火羽流温度和测点接收热辐射通量随时间变化的趋势上都有体现。

比较图2可知,低硫原油和高硫原油燃烧速率的变化趋势相似,相同油盘面积下燃烧速率相近,这说明硫元素的存在对燃烧速率几乎没有影响。而同等条件下重石脑油燃烧速率远远大于低硫原油和高硫原油,其燃烧更为剧烈。

2.2 火羽流温度

火羽流是火灾的初始基本形态,可分为连续火焰区、间歇火焰区和浮力羽流区,温度是其



重要参数^[14]。本文对各测点稳定燃烧阶段的温度数据求平均,得到火羽流温度垂直分布,如图3所示。

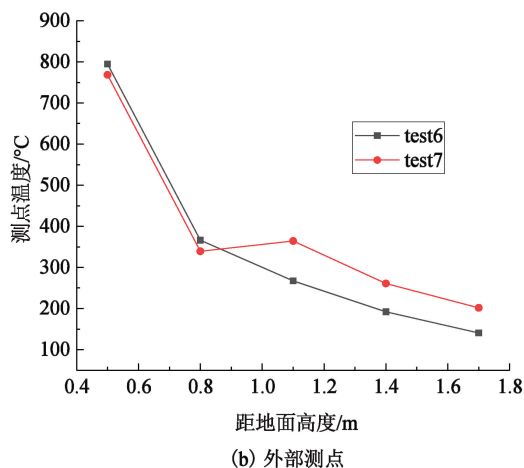


图3 火羽流温度随高度的变化

Fig. 3 Variation of plume temperature with height

由图3(a)可知,油盘中心温度随高度的增加呈先增大后减小的变化趋势。这主要是在靠近液面区域燃料蒸气浓度比较高,而氧气浓度不足以使可燃蒸气完全燃烧,温度相对较低。随着高度的增加,由于体积膨胀和浮升力的作用燃料蒸气向上流动,与此同时羽流不断地卷吸新鲜空气,在某一高度燃料蒸气与氧气的比值几乎达到当量比,在此区域燃烧最为剧烈,温度达到最高;当高度进一步增加时,燃料蒸气浓度相对较小,不能进行剧烈燃烧,温度趋于变低。对于同一种燃油,油盘面积越大,火羽流温度越高。对比三种实验油料可以看出,重石脑油火羽流温度高于低硫原油和高硫原油,这主要是因为重石脑油属于原油蒸馏或石油二次加工切取相应馏分而得,以生产高辛烷值汽油为目的,热值更高,燃烧更为剧烈,一旦发生重石脑油池火灾,会造成更大的危害。

由图3(b)可以看出,火羽流外部温度随高度的增加而降低,且这种下降呈现出先急后缓的趋势。这主要是在靠近液面区域燃料蒸气充足,并且火羽流外侧有充足的氧气供给,为充分燃烧提供了条件,这与火羽流中心温度的变化机理相印证。通过对比低硫原油和高硫原油火羽流外部温度变化曲线,也能说明两种原油中硫元素的差异对温度影响较小。

由以上分析可知,低硫原油、高硫原油和重石脑油的火羽流在油盘中心垂直方向温度的变化趋势相似,而对于相同面积的池火,重石脑油燃烧时温度更高,产生的威胁更大。以重石脑油油盘面积 1 m^2 (Test3)为例,通过FDS对其模拟得到不同燃

烧时间段温度切片,如图4(a)所示。对于低硫原油和高硫原油的大尺寸油池火,其火羽流外侧垂直方向温度的变化情况相似,与含硫量相关性不大。本节以高硫原油油盘面积 3 m^2 (Test7)为例,通过FDS对其模拟得到不行燃烧时间段温度切片,如图4(b)所示。

由图4可以直观地看出,火羽流温度在垂直方向上呈不连续分布,这说明其不是连续的火焰柱。从温度的空间分布特征来看,油盘中心线区域的温度是整个火羽流温度最高的部分,基本呈现出自下而上先增加后减小的变化,而火羽流外部垂直方向的温度自下而上逐渐减小。从温度的大小来看,重石脑油油盘面积为 1 m^2 时,油盘的中心线温度达 $400\text{ }^\circ\text{C} \sim 900\text{ }^\circ\text{C}$,而单个油盘中心线温度也达 $300\text{ }^\circ\text{C} \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$;高硫原油油盘面积为 3 m^2 时,火羽流外侧温度距地面 0.5 m 处大约 $750\text{ }^\circ\text{C}$,随高度的上升逐渐下降到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。从火羽流区域来看,在连续火焰区高温趋于集中,在间歇火焰区和浮力羽流区径向温度的变化较大。由此可知,温度的模拟结果基本与实验测量结果一致。

由图4(a)可知,重石脑油燃烧在沸腾燃烧阶段火羽流的高度和宽度达到最大,这说明在此阶段燃烧最为剧烈,产生的危害最大,应采取措施避免形成薄层重石脑油池火。由图4(b)可知,对于大尺寸油池火,在其燃烧的三个阶段中,火羽流外侧温度始终很高,影响范围很大,有直接灼伤附近人员、引燃周围物体的危险,应该采取措施避免形成大面积油池火。

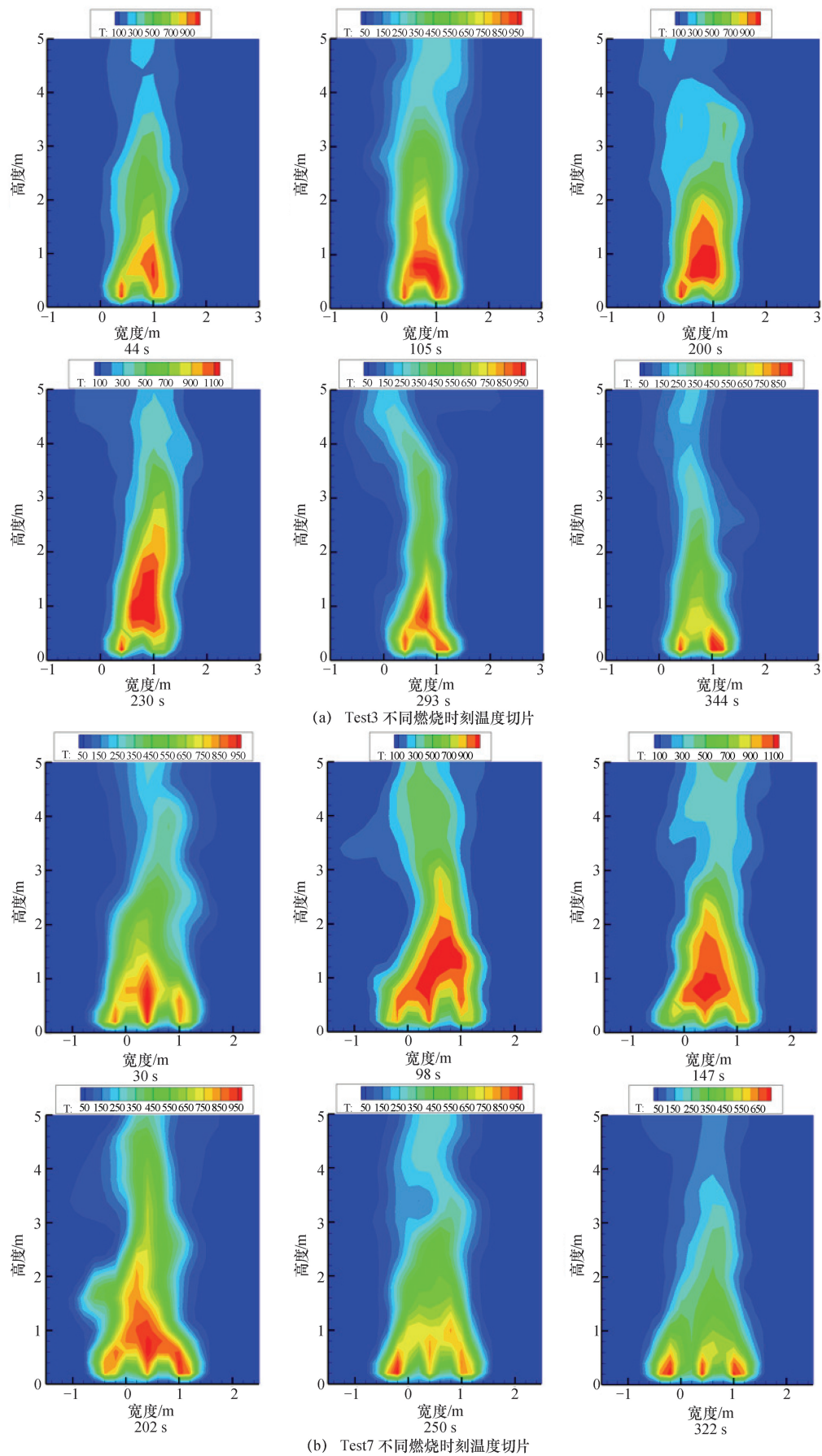


图4 不同燃烧阶段温度切片

Fig. 4 Temperature slices at different combustion stages

2.3 测点接收热辐射通量

对于大尺寸油池火,无风或者较小风速时只有少量热气往下风向传递,即热对流相对较弱,热辐射

是主要的传热方式。本节根据大型开放空间碳氢化合物火灾危险性计算公式^[15]得到辐射模型计算值,并与FDS模拟值和实验测量值相比较,如图5所示。

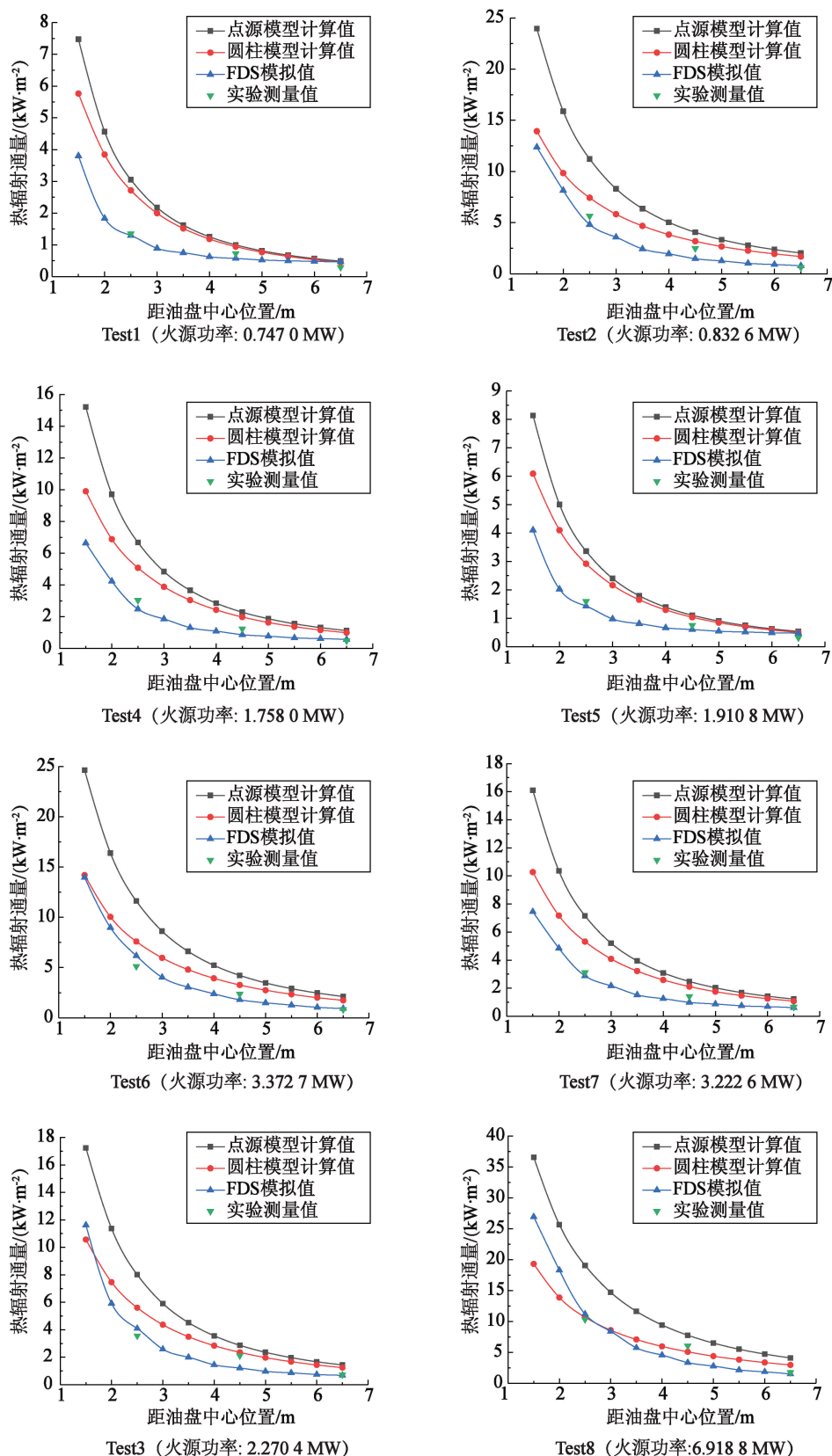


图5 测点接收热辐射通量比较

Fig. 5 Comparison of heat radiation flux received at measuring points

由图5可知,在靠近火源位置时点源模型和圆柱模型的计算值偏大,模拟值与测量值几乎相等;随着离火源距离的增大,点源模型和圆柱模型计算值与测量值逐渐接近,在距火源较远的位置计算值、模拟值和测量值基本保持一致。这主要是因为点源模型将火焰看作一个对外辐射为各向同性的点,距离火源越近,这种假设的局限性越大;圆柱模型认为火焰表面均匀向外产生热辐射,虽然可以将火焰辐射通量分为羽流底部发光区域和上方烟羽流两部分进行计算,但距离火源很近时,计算结果仍较测量值偏高。

通过对图5横向和纵向比较可知,油盘等效直径越大,测点接受的热辐射通量越大;燃烧面积相同时,低硫原油和高硫原油相同位置接收的热辐射通量相差不大,而重石脑油远远高于两者,这种变化趋势与前文燃烧速率和火羽流温度的变化特征在本质上相一致。从火源功率来看,当火源功率在0.747 0~1.910 8 MW时,模拟值与实验值几乎相等,而点源模型和圆柱模型远远高于实验值;火源功率在2.270 4~6.918 8 MW时,FDS的模拟结果相对于测量值偏小,点源模型计算值高出测量值很多,而圆柱模型计算结果与实验值的逐渐靠近,这主要是因为FDS模拟时,室外燃烧环境存在瞬时变化,而边界条件设置不能与其完全保持一致。

总体来看,通过将实验燃烧速率曲线输入到FDS中,对测点接收热辐射通量的模拟是比较准确的,这为不同场景大尺寸油池火灾的研究提供了可靠的选择。同时,也验证了圆柱模型对于大功率油池火灾不同位置接收热辐射通量计算的科学性。本文在此研究基础上,以Test8为例,基于热通量-时间准则、联立圆柱模型方程和比率方程^[16-17],确定其“安全距离-时间”临界曲线,如图6所示。

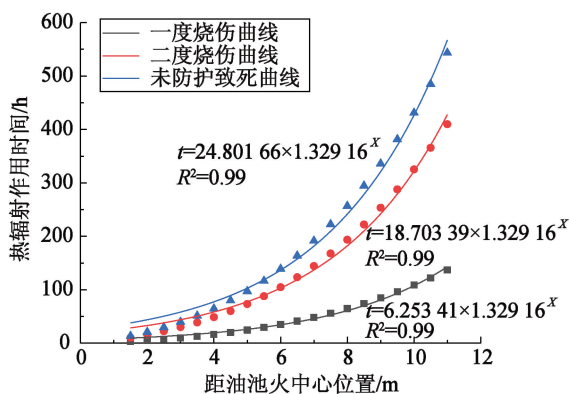


图6 Test 8“安全距离-时间”临界曲线

Fig. 6 Critical curves of “safe distance-time” in Test 8

通过“安全距离-时间”临界曲线可以直观地看出在距火源中心不同位置处人员可以暴露的时间,这对于科学地预防次生灾害发生和消防救援意义重大。

3 结论

本文通过对室外开放空间油池火的实验研究与数值模拟,得到以下结论:

(1) 低硫原油和高硫原油的燃烧过程均出现三个燃烧阶段。在燃烧初期发展阶段,燃烧速率近似线性趋势增大,稳定燃烧阶段不明显,且未出现明显的多个稳定燃烧阶段,重石脑油出现沸腾燃烧现象。

(2) 油盘中心温度随高度的增加先增大后减小,火羽流外部温度随高度的增加而减小,且下降趋势先急后缓。在连续火焰区高温集中,在间歇火焰区和浮力羽流区温度变化较大。

(3) 将实验得到的燃烧速率曲线自定义到FDS中,可以实现对测点接收热辐射通量的准确模拟。火源功率越大,圆柱模型的计算值与实验值越接近。

(4) 同等条件下,重石脑油产生的危害大于低硫原油和高硫原油,大尺寸油池火产生的危险远远大于小尺寸油池火。

(5) 对于大功率原油池火灾,可以确定“安全距离-时间”临界曲线,以直观地掌握距火源中心不同位置处人员可以暴露的时间。

参考文献

- [1] 朱建华,褚家成. 池火特性参数计算及其热辐射危害评价[J]. 中国安全科学学报,2003,13(6):25-28.
Zhu Jianhua, Chu Jiacheng. Calculation of characteristic parameters of pool fire and assessment of its thermal radiation hazard [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6):25-28.
- [2] 孔得朋,刘鹏翔,王昌建,等. 小尺度沸溢油池火灾燃烧速率特性试验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2017,41(3):136-143.
Kong Depeng, Liu Pengxiang, Wang Changjian, et al. Small scale experiment study on burning rate characteristics of boilovers [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2017, 41(3):136-143.
- [3] 吴向君,丁立斌,孟峰,等. 不同羽流模型在封闭空间池火灾中的应用[J]. 海军工程大学学报,2015,27(2):95-98.

- Wu Xiangjun, Ding Libin, Meng Feng, et al. Application of different plume models for closed-space fire [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(2):95-98.
- [4] 陈阵,王霖,张苗. 池火辐射强度计算模型的适用性分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6):76-79.
Chen Zhen, Wang Ji, Zhang Miao. Practical analysis model for calculating the pool fire radiation intensity [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6):76-79.
- [5] 张培红,张怡,张云粟. 不同通风条件下柴油池火的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6):145-149.
Zhang Peihong, Zhang Yi, Zhang Yunli. Experimental study on diesel pool fire under different ventilation conditions [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6):145-149.
- [6] 张云杰,梁霄,王旭. 不同尺寸的油盘池火灾临界参数研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3):306-309.
Zhang Yunjie, Liang Xiao, Wang Xu. Study on the critical parameters of oil pool fire with different sizes [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(3):306-309.
- [7] 康泉胜. 小尺度油池火非稳态燃烧特性及热反馈研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
- [8] Sikanen T, Hostikka S. Modeling and simulation of liquid pool fires with in-depth radiation absorption and heat transfer [J]. Fire Safety Journal, 2016, 80:95-109.
- [9] 周健楠,姜雯,谢飞,等. 基于 FDS 模拟的超大丙烷储罐罐内池火火灾事故后果研究[J]. 南开大学学报:自然科学版, 2017, 50(6):95-98.
Zhou Jiannan, Jiang Wen, Xie Fei, et al. Study on the consequences of fire accident in super-large propane storage tank based on FDS simulation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2017, 50(6):95-98.
- [10] Shen Gansu, Jiang Juncheng, Zhou Kuibin, et al. Analysis for fire plume temperature in developing area and radiation heat flux distribution in small-scale pool fire [J]. Procedia Engineering, 2018, 211:606-613.
- [11] McGrattan K, McDermott R, Hostikka S, et al. Fire dynamics simulator technical reference guide [M]. Sixth Edition. Maryland: US Department of Commerce, NIST, 2017.
- [11] McGrattan K B, McDermott R, Weinschenk C, et al. Fire dynamics simulator technical reference guide (volume 1) [R]. National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [12] Shi Congling, Liu Wei, Hong Wenjie, et al. A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 379:1-12.
- [13] 康泉胜,陆守香,陈兵. 小尺度庚烷池火燃烧速率实验研究[J]. 科学通报, 2010, 55(1):87-93.
Kang Quansheng, Lu Shouxiang, Chen Bing. Experimental study on burning rate of small scale heptane pool fires [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(1):87-93.
- [14] 高云骥,朱国庆. 火羽流轴向温度大涡模拟与实验比较[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(8):857-859.
Gao Yunji, Zhu Guoqing. Comparing the model and simulation results of fire plume axial temperature [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(8):857-859.
- [15] Hurley M J, Gottuk D, Hall J R, et al. SFPE handbook of fire protection engineering [M]. New York:Springer New York, 2016.
- [16] Pietersen C M. Consequences of accidental releases of hazardous material [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1990, 3(1):136-141.
- [17] 宇德明,冯长根,曾庆轩,等. 热辐射的破坏准则和池火灾的破坏半径[J]. 中国安全科学学报, 1996, 6(2):5-10.
Yu Deming, Feng Changgen, Zeng Qingxuan, et al. Thermal radiation damage criteria and pool fire damage radius [J]. China Safety Science Journal, 1996, 6(2):5-10.

(责任编辑:陈贵仁)