

柴油在热壁面上的着火

栗元龙, 陆守香, 范维澄

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 研究了柴油机燃料泄漏后在热壁上的着火, 利用统计方法得到着火的临界温度。发现样品燃料的热壁着火温度与自燃点的差值比其它燃料热壁着火的相应值要小得多, 而且着火方式也有很大差异。详细解释了泄漏后的液体在热表面上的沸腾蒸发模式, 给出了燃料蒸气的质量流率推导公式。

[关键词] 热壁面; 着火实验; 沸腾

[中图分类号] X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)11-0063-03

1 前言

机舱是船舶中的核心部位, 其火灾防护尤为重要。国内外对机舱中火灾的发生和防治已有很多研究, 但是对机舱燃料着火机理的研究却非常少。通常在机舱内, 热壁和电路故障是主要的着火源, 作者主要讨论高温热壁上泄漏燃料的着火机理。在船舶机舱内存在许多高温热表面, 比如柴油机排气管和汽轮机蒸汽管的管壁。这些热表面平时大都被包裹起来, 不会释放太多热量。但是, 仍然会有小部分裸露在空气中。如果泄漏的油料接触到这些热表面, 就可能着火。这通常是造成机舱火灾的重要原因。

一般来说, 热壁着火的起始位置都是在离热壁非常近的热混合气层内, 而且着火时热壁的温度比着火物质的自燃点要高许多。Eckhoff 和 Thomassen 介绍^[1], 丙烷自燃点低于 500 °C, 而在热壁上着火的温度一般需要 800~1000 °C。对于汽油类燃料, 热壁的温度也需要大于燃料自燃点几百度着火才能发生^[2]。作者采用柴油作为实验对象, 研究泄漏燃料在热壁面上的着火, 结果同以往的相比有很大的不同。

2 实验介绍

2.1 燃料

选用船舶机舱柴油机常用柴油作为研究对象, 油料的特性参数见表 1。

表 1 样品柴油的特性参数

Table 1 Characteristic parameter of the experimental diesel

样品	柴油
闪点/°C	66
沸程/°C	180~370
凝固点/°C	-10
动力粘度/mm ² ·s ⁻¹	3.5
密度/g·cm ⁻³	0.8
比热/kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1.8
传热系数/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.126

2.2 实验装置

自制一套泄漏燃料热壁着火的实验装置, 主要包括铜板, 控制板和泄漏模拟器。铜板的面积为 25 cm×50 cm, 厚 3 cm, 水平放置。板内分别埋入了一个控制热电偶和一个 6 kW 的加热圈。板的热容很大, 以保证冷液接触后温度变化不大。热板

[收稿日期] 2004-01-05

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409600)

[作者简介] 栗元龙(1976-), 男, 安徽淮南人, 中国科学技术大学博士研究生

的温度可以在 15~600 ℃ 内调节。热板热量的损失主要是朝上的一面向周围释放热量。程序控制使得热板温度保持稳定,即在 5 min 内上下波动不超过 2 ℃。同时测得热板朝上壁面的温度与板内温度相差不超过 1%。燃料从泄漏模拟器中流出,该模拟器可控制泄漏流率在 0.5~5 ml/s 内变化,并且保证连续流动。泄漏口距离热板壁面 1 cm 处,以防止燃料接触到热板后溅开。实验过程通过一个 25 帧/s 的摄影机进行记录。实验过程中控制环境气体对流,减小外界气体流动的影响。

3 实验方法与结果讨论

3.1 着火温度

水平热板周围的空气在对流、扩散作用下运动非常复杂,尚无精确描述,加上持续液流在热壁面上的蒸发和随后蒸气与空气的卷吸作用的不确定性,使得着火的发生条件的确定变得困难许多。实验中发现,燃料着火的发生在一定温度范围内会出现摆动。为了准确判断着火温度,采用布鲁斯顿 (Bruceton) 统计处理方法。实验中先确定开始水平温度 t_h 和温度间隔 Δt , 其中 Δt 是对数等间隔配置,其值应近似于标准偏差。随后的实验水平则为 $t_h \pm \Delta t$, $t_h \pm 2\Delta t$, $t_h \pm 3\Delta t \dots$ 。例如,第一个实验在 t_h 水平进行,若着火,则用符号“√”表示,那么下次实验应在 $t_h - \Delta t$ 水平进行,若“不着火”,则用符号“×”表示,再下次实验应在 $t_h + \Delta t$ 水平进行,依次类推,凡是“不着火”时下次实验应增加温度,凡是“着火”时下次实验降低温度。实验结果见表 2。

将实验数据代入如下统计公式,可求得 50% 燃烧的温度 t_m (临界温度)。

$$t_m = c + \Delta t \left[\frac{1}{N(0)} \sum in_i(0) + \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

公式 (1) 中 c 表示零水平的温度; Δt 表示温度间隔; $N(0)$ 表示燃烧的总数; i 表示水平数。标准偏差通过式 (2) 计算,其中 S 由式 (3) 给出,式 (3) 中 M 由式 (4) 给出。

$$\sigma = Sd \quad (2)$$

$$S = 1.60 \times (M + 0.04) \quad (3)$$

$$M = \frac{\sum i^2 n_i}{N} - \left[\frac{\sum in_i}{N} \right]^2 \quad (4)$$

将表 2 中的值代入相应公式,最后得到着火临界温度 (燃烧 50% 着火的温度) 为 346 ℃,其标

准偏差为 9.86。

表 2 柴油热板着火实验结果

Table 2 Ignition result of the diesel on hot plate

$t/^\circ\text{C}$	350	340	330	320
1			√	
2				×
3			√	
4				×
5			×	
6		√		
7			×	
8		√		
9			×	
21	√			
22		×		
23	√			
24		×		
25	√			
燃烧	4	5	3	0
不燃烧	0	4	6	3

柴油的自燃点在 300 ℃ 左右。可以看出该实验条件下,着火发生时的热壁温度非常接近于柴油的自燃点 (差值为几十度),而以前的燃料热壁着火实验得到相应差值都在几百度;另外,其着火的起始位置也不同。

3.2 着火起始位置

实验发现热板上的着火过程非常特别。柴油蒸气着火时,着火核心距热板相当远,火焰再向下传播,使得所有随后蒸发的蒸气开始燃烧。每次着火的位置都不相同,摄像记录发现着火核心最远可距热板 30 cm。图 1 上下各 3 张图记录的是两次着火的发生过程 (热壁温度 350 ℃, 燃料流率 5 ml/s)。

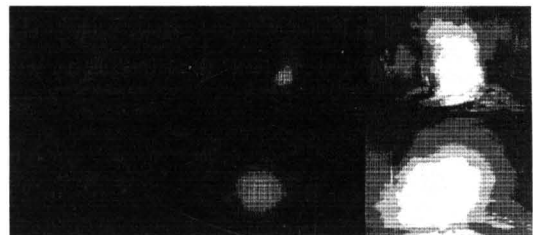


图 1 热壁上蒸气不同着火过程 (从左到右: 着火前 1/25 s, 着火, 着火后 1/25 s)

Fig.1 Ignition of vapor in different shape
(From left: 1/25 s before the ignition, ignition, 1/25 s after ignition)

从图中可以看到两次实验虽然初始条件都相同，但是热壁上蒸气的形状却大不同。图 1 上部 3 张图中蒸气呈现羽流状，着火发生在距离热壁约 10 cm 处。下部 3 张图中，蒸气呈团状，着火发生在蒸气图中部，距离热壁约 5 cm 处。

4 热壁上泄漏燃料的蒸发与着火

很明显，实验中着火的发生与热壁上的蒸发紧密相关。在实验温度下，柴油绝大部分处于沸腾状态，蒸气的产生主要是通过沸腾蒸发。热壁的温度不同，其沸腾的模式也不同。如果壁温很高，在壁面与液体之间就会形成一个蒸气层，阻碍壁面向液体传热，称为膜沸腾。膜蒸发一直持续到 Leidenfrost 点，在此温度以下，就进入过渡沸腾。在过渡沸腾模式下，液体能够有效地润湿壁面，因此可以增加热壁对液体的热传导。当壁温继续下降，经过临界热流点 (CHF) 后，所有的壁面都能够被液体润湿，热传导速率达到最大值。这种模式称为泡核沸腾。该沸腾模式下，壁面与液体之间的温度与液体沸点之间相差不大。

Xiong 和 Yuen^[3]报道柴油在 356 °C 以前是泡核沸腾，过渡沸腾是从 356 °C 持续到 440 °C 左右。以后就是膜沸腾了。因此作者实验中的液体蒸发大都处于泡核沸腾模式下。液体流到壁面上后，热量先通过扩散对其进行加热；当液体被加热到沸点以上后，就会形成气泡，在浮力的作用下上升，然后被上层冷液冷凝。着火一般不会发生在这一阶段。此后，全部液体都被加热到沸点，产生的大量气泡就会冲出液体，再破裂，在液体上空释放出高温蒸气。热壁面给液体的热量全部用于蒸发所需的蒸发潜热。Johnson 和 Moussa^[4]发现对于该类燃料，泡核沸腾的传热常数约为 569 ~ 17 079 W/m²·K。所以根据式 (5) 就可以计算得到蒸气的质量流率。

$$\dot{m} = h \cdot \Delta T / L \quad (5)$$

式中 \dot{m} 是蒸气流率， h 是传热常数， ΔT 是热壁温度与沸点之差， L 是液体的蒸发潜热。

Johnson and Moussa^[4]提出了悬浮在热表面上的液滴的蒸发和着火机理，假设液滴的扩散和加热过程是球面对称的。按照热板表面边界层温度及温度边界层高度和液滴中心位置得到液滴周围的空气温度，并以燃料燃烧反应的量浓度作为着火判据。实验得到的着火延迟和着火位置与根据模型计算得到的结果比较接近。然而，热板上泄漏燃料形成的油池与液

滴在几何形状以及蒸发过程上存在着非常大的差异，因此该模型不能用于解释作者的着火实验结果。

虽然没有准确的数学或经验公式，但是已经知道，水平热表面上存在着非常陡的温度边界层梯度。这个梯度的大小由于热壁面上复杂的空气对流可能对于壁面不同位置而有所区别。周围的空气会从壁面周边流动到壁面中心处，被加热，然后向上运动。热板温度越高，大于蒸气着火温度的气体距离热壁面的高度就有可能越大。同时，从热壁上蒸发出来的蒸汽在向上扩散，其浓度也是随着高度的增加而逐渐减少的。在热壁上空某处，浓度就会降低到着火极限范围内，如果这时混合气的温度在燃料自燃点以上，就有可能发生着火。当然，着火是否发生还和着火延迟有关。对于低温链反应，反应非常复杂，造成着火延迟也难以确定，因此给准确建立模型增加了难度。

5 总结

作者研究了燃料流在热壁上的着火，通过 Bruceton 法得到了柴油热壁着火的临界温度。这个温度的提出可以为机舱火灾安全评估提供准确的依据。另外在实验中发现了不同于以往的热壁着火结果，即着火热壁温度与燃料自燃点的差较小，而且燃料蒸气是在距离热壁较远处的空中发生着火。作者讨论了热壁上燃料流的蒸发与着火过程，根据前人的经验公式得出了蒸气的质量流率计算方法。

参考文献

- [1] Eckhoff R K, Thomassen O. Possible sources of ignition of potential explosive gas atmospheres on offshore process installations [J]. J Loss Prev Process Industry, 1994, 7(Special Issue on Safety on Offshore Process Installations: North Sea): 281~294
- [2] Vaivads R H, Bardon M F, Bttista V. A computational study of the flammability of methanol and gasoline fuel spills on hot engine manifolds [J]. Fire Safety Journal, 1997, 28:307~322
- [3] Xiong T Y, Yuen M C. Evaporation of a liquid droplet on a hot plate [J]. Inc J Heat Mass Transfer, 1991, 34(7): 1881~1894
- [4] Johnson A M, Moussa N A. Hot surface ignition test of aircraft fluids[R]. Final Report for period may 1987 to may 1988. AFWAL - TR - 88 - 2101

- [5] 肖贵平, 侯福均. 计算机辅助事故树分析中的图形输入法 [J]. 中国安全科学学报, 2001, 11 (4): 53~56
- [6] 曹青. Visual Basic6.0 程序设计教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 10~116

Development and Application of Fault Tree Analysis System Based on Visualization

Shi Shiliang Lu Bentao

(Energy & Safety School Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[Abstract] The Fault Tree Analysis (FTA) is one of the most important methods in the safety system engineering. With FTA, the fatalness of the various kinds of system can be distinguished and evaluated, not only the direct causes of the accidents but also the potential causes can be deeply opened out. The consequences of accidents described with FTA are intuitional, intelligible, clear thinking and logical. The FTA can finish the qualitative analysis and the quantitative analysis. In this paper, the model of the Fault Tree visualization system is established based on the theory and technology of the visualization, the system functions are determined, the design of the system structure is finished and the FTA visualization system is developed. Furthermore, the integrated analysis environment that combines the Fault Tree graph creation and Fault Tree dynamic analysis is constructed based on computer. The FTA visualization analysis system supplies high efficiency and correct technology and measures for accidents analysis and safely assessment.

[Key words] safety technology and engineering; safety assessment; FTA; visualization; analysis system

(cont. form p. 65)

Ignition of Diesel by Heated Surface

Li Yuanlong, Lu Shouxiang, Fan Weicheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

[Abstract] The ignition of leaked fuel of the diesel engine is studied experimentally. The critical ignition temperature is calculated statistically. The difference between the ignition temperature and auto-ignition temperature of diesel is much less than that of other fuels. The ignition mode is also much different from its counterpart. The paper describes the detailed boiling mode of the leaked fuel on a hot surface. The equation to get the mass flux of the fuel vapor is given.

[Key words] hot surface; ignition test; boiling