

中国工程热物理学会

燃烧学学术会议

论文集

一九九七

北京

中国工程热物理学会编



燃烧学目录

一. 燃烧及可燃物的燃烧特性

984080	自然对流对非金属材料受热升温着火的影响	杜文锋、张孝谦	I -1-8
984083	添加剂对乳化油着火延迟影响的研究	王利坡、付维标	I -9-8
984033	煤燃烧过程矿物质行为研究	李帆、邱建荣、郑瑛、郑楚光	I -17-4
984066	煤粉在热解和燃烧过程中孔隙结构变化的研究	张静英、冯波、周英彪、刘迎晖、郑楚光	I -21-7
984031	激光点火煤粒着火的模型分析	刘迎晖、邢华伟、周英彪、柳朝晖、于勇、郑楚光	I -28-7
984011	湍流扩散火焰大涡拟序结构的波动特性研究	徐益谦、顾璠、杨宏旻、刘勇、杨勇、马为民	I -35-6
984010	湍流预混火焰细微结构几何特性分析	马为民、杨勇、杨宏旻、刘勇、顾璠、徐益谦	I -41-6
984082	超音速混合层中、上游氧原子对氢气火焰着火距离的影响	田振华、傅维标	I -47-8
984090	催化着火的实验研究	覃川、傅维标、李长乐、葛阳	I -55-8
984012	温度对城市生活垃圾热解特性的影响	吴家正、朱彤、王晓舸、张鹤声	I -63-5
984037	煤中碱金属存在形式的研究	汉春利、张军、刘坤磊、徐益谦	I -68-5
984013	城市固体废物 (MSW) 热解特性研究	金保升、仲兆平、周山明	I -73-8
984041	炭 / 碳粒在 O_2/CO_2 气体中燃烧速率的研究	刘彦丰、阎维平、宋之平	I -81-8
984042	大加速度场中熄火试验的研究	吴晋湘、王恩宁、刘联胜	I -89-6
984086	预混气体燃烧火焰闪烁现象分析	孔文俊、张孝谦	I -95-8
984087	V 型预混火焰锋面动态特性分析	孔文俊、张孝谦	I -103-6
984047	生活垃圾中可燃物的热解动力学研究	郭小汾、杨雪莲、熊祖鸿、徐雪莹、陈勇	I -109-7
984049	造纸污泥在回转窑中热解的试验研究	李水清、李爱民、任远、严建华、池涌、李晓东、岑可法	I -116-6

二. 煤粉及水煤浆燃烧

984027	带旋流燃烧器的 W 型火焰炉冷态空气动力场的试验研究	周志军、朱自力、赵翔、姚强、曹欣玉、岑可法	II -1-7
--------	----------------------------------	-----------------------	---------

984007 煤粉的煤岩和燃烧特性研究	范宏丽、徐旭常、王世昌	II -8-8
984016 旋流煤粉浓淡燃烧器出口区域两相流场的 PDA 实验研究	李志强、李荣先、崔龙铨、周力行、李文健、陈泽荣、张恩仲	II -16-6
984039 670t/h 锅炉燃烧经济性的关联分析与评价	朱建宁	II -22-7
984072 齿形中心扩锥对旋流煤粉燃烧器气固两相流动特性影响的 PDA 试验研究	李争起、孙绍增、孙锐、万志欣、张泽、陈力哲、吴少华、秦裕琨	II -29-7
984028 炉内防磨用撞击式分离器的试验研究	王树荣、骆仲泐、方梦祥、卓建坤、周劲松	II -36-8
	倪明江、岑可法、边疆、张勇胜	
984089 逆向复式射流预燃室燃烧器煤粉颗粒行为预报	赵启伟、赵惠富	II -44-6

三. 流化床燃烧

984054 生活垃圾 / 煤混烧流化床焚烧试验研究	蒋旭光、池涌、李晓东、严建华、杨家林、黄国权、倪明江、岑可法	III -1-6
984093 焦油裂解循环灰的催化失活研究	吕俊复、岳光溪	III -7-6
984094 循环灰积碳失活后再生特性研究	吕俊复、岳光溪	III -13-4
984008 内旋流流化床中气泡特性的实验研究	孙满弟、田文栋、魏小林、盛宏至	III -17-6

四. 燃烧过程数值计算

984032 管排绕流的格子 Boltzmann 模拟	阮剑、郑楚光、邢华伟、柳朝晖	IV -1-8
984029 煤粉炉内弥散介质辐射传热的综合模拟	柳朝晖、邢华伟、周英彪、郑楚光	IV -9-6
984065 用双流体模型计算 CFB 炉膛出口区域的颗粒场	李向阳、张绪祯	IV -15-5
984064 颗粒在炉膛内运动轨迹的数值模拟	李向阳、张绪祯	IV -20-5
984058 气固射流流化床中流体动力学特性的数值模拟	钱诗智、陆继东、刘西策、周浩生、赫俏、刘德昌、林志杰	IV -25
984060 煤燃烧 NO _x 生成湍流反应率的二阶矩 -PDF 模型	殷健、胡俊玲、周力行、郑楚光	IV -33-8
984014 循环流化床锅炉流体动力特性模型	王勤辉、骆仲泐、李绚天、方梦祥、倪明江、岑可法	IV -41-8
984085 轴对称突扩燃烧室内液雾燃烧的数值模拟	郭印诚、王冬	IV -49-8

984084	马蹄形火焰玻璃熔窑燃烧空间流动及传热的数值模拟	郭印诚	IV -57-7
984006	煤粉在四角切向燃烧煤粉锅炉炉膛内的燃烧行为		
	 刘向军、徐旭常、范宏丽	IV -64-8	
984005	改进的随机轨道模型	张会强、陈昌麒、柳开瑞	IV -72-8
984004	两相混合层中颗粒运动的数值模拟		
	 王希麟、王赫阳、张会强、郭印诚、林文漪	IV -80-6	
984018	湍流气粒两相流动有燃烧颗粒相概率密度函数输运方程理论		
	 周力行、郑楚光、柳朝晖	IV -86-7	
984002	用气体可燃极限概念修正简单化学反应系统模型及其数值分析		
	 李军、周怀春、柳朝晖、盛锋、姚洪、郑楚光	IV -93-6	
984020	旋流两相流动的 DSM-PDF 两相湍流模型	周力行、李勇	IV -99-6
984036	文丘利油燃烧器内外部等温流场的数值模拟		
	 姚寿广、李宗羲、朱德书、仲华	IV -105-7	
984092	石灰颗粒孔隙分形 Bethe 网络模拟及对 HCl 气体吸收过程的预测		
	 陈德珍、张鹤声	IV -112-8	
984003	Li(1)/SF ₆ (g) 气液浸没燃烧双流体模型的数值模拟		
	 张会强、周力行、王希麟、林文漪	IV -120-8	
984024	湍流两相流动的 PDF 二阶矩模型	徐一	IV -128-6
984017	甲烷-空气同轴突扩湍流燃烧的二阶矩-概率密度模型的数值模拟		
	 陈兴隆、周力行、张健	IV -134-8	
984081	以混合层模型模拟真实超音速燃烧器的研究	田振华、傅维标	IV -142-8
984053	PDF 方程中小尺度混合模型的研究	黄鹰、陈义良、李艺	IV -150-8
984070	流化床气固两相流动颗粒刚性碰撞模型		
	 周浩生、陆继东、钱诗智、林良	IV -158-6	
984077	主燃烧室壁温的数值计算	富丽新、徐让书、张宝诚	IV -164-6
984019	三维湍流回流气相和煤粉燃烧辐射传热离散坐标模型和热流模型比较		
	 李力、周力行、张健、李荣先	IV -170-6	
984073	气相多组分反应流场的一种新算法	任安禄、彭杰、戴志潜	IV -176-8
984095	先进燃烧室涡流杯流场计算	赵坚行、伍艳玲	IV -184-6
984096	气氢亚燃冲压燃烧室三维流场计算	周峰轮、赵坚行	IV -190-6

五. 燃烧污染控制

984026	煤在链条炉内燃烧过程中氟排放规律及抑制研究		
	 刘建忠、吴晓蓉、姚强、曹欣玉、岑可法	V -1-8	

- 984025 煤燃烧过程中硫动态析出特性的试验研究
 程军、吴晓蓉、姚强、曹欣玉、汤龙华、赵翔、岑可法 V -9-6
- 984079 控制 NO_x 生成的天然气再燃烧技术
 Edmundo R. Vasquez、李松庚 V -15-8
- 984067 蒸汽活化钙基吸收剂用于干法烟气脱硫的实验研究
 时黎明、徐旭常 V -23-8
- 984057 钙基脱硫剂掺加粉煤灰在 $450 \sim 850\text{ }^\circ\text{C}$ 下的脱硫研究
 庞亚军、徐旭常 V -31-8
- 984052 煤的挥发份对 NO_x 再燃特性的研究 钟北京 V -39-6
- 984021 NO_x 生成湍流反应率数值模拟的进展 周力行 V -45-7
- 984091 中低温下酸性气体干式净化剂的改良研究 陈德珍、张鹤声 V -52-6
- 984044 不同煤种 NO_x 生成量的实验研究
 朱全利、曾汉才、聂明局、徐涛 V -58-5
- 984099 不同煤种 NO_x 生成机理的研究
 朱全利、程峻峰、胡俊玲、肖理生、姚斌、曾汉才 V -63-8
- 984034 煤粉炉喷钙脱硫过程的总体模型与模拟
 郑瑛、柳朝晖、容伟、史学峰、周英彪、李帆、郑楚光 V -71-8

六. 液雾燃烧

- 984045 气泡雾化喷嘴雾化特性的实验研究
 刘联胜、吴晋湘、傅茂林、王恩宇、李树源、张宇哲 VI -1-6
- 984074 在汽油机气道内实施二次喷油以实现稀混合气燃烧的实验研究
 范永健、刘书亮、裴普成 VI -7-6
- 984063 涡流控制阀对四气门汽油机缸内空气运动影响的研究
 李玉峰、宫卫东、刘书亮、史绍熙、许振忠 VI -13-6
- 984038 电站锅炉燃用奥里油试验研究 赵虹、翁善勇、魏勇 VI -19-8
- 984075 四气门火花点火式发动机着火前后缸内气流运动的研究
 刘书亮、冯明志、李玉峰、许振忠、史绍熙 VI -27-8
- 984076 一种高效全流程可调燃烧器的设计 王达文、富丽新、张宝诚 VI -35-8

七. 其它燃烧问题及燃烧测试技术

- 984046 垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的 GC-MS 分析
 严建华、谷月玲、李斌、池涌、蒋旭光、徐旭、 VII -1-4
 李晓东、黄国权、杨家林、倪明江、岑可法

984097	基于相关结构模型的气固流化床颗粒结块故障诊断研究	黄海	VII -5-7
984062	窗玻璃热破裂模型及其行为的研究	李建华	VII -12-8
984051	应用离焦散斑技术测量瞬态蒸发喷雾的研究		
	 杨延相、叶志生、李万众		VII -20-6
984030	激光全息干涉法测量煤粒周围的温度场		
	 刘迎晖、郑瑛、周英彪、柳朝晖、于勇、郑楚光		VII -26-6
984078	超长 (大) 建筑物的抑燃泄压试验研究		
	 王宝兴、黄伟、李景成		VII -32-6
984043	圆湍射流拟序结构的频谱特性研究		
	 范全林、王希麟、郭印诚、张会强、林文漪		VII -38-5
984023	突扩湍流气粒流动两相脉动速度关联和颗粒速度概率密度分布的 PDPA 实验研究	徐一、周力行、曹政	VII -43-7
984056	流化床中瞬态颗粒浓度信号的小波分析		
	 钱诗智、陆继东、刘西策、周浩生、赫俏、刘德昌、林志杰		VII -50-8
984009	测量内旋流流化床颗粒运动的 DPIV 系统		
	 田文栋、魏小林、孙满弟、盛宏至		VII -58-5
984048	垃圾焚烧炉的设计原则及应用		
	 杨振良、方建华、曹俊斌、陈超、翟华、金坚、潘忠刚		VII -63-6
984050	辐射图像法测量火焰断面温度场的实验研究		
	 薛飞、马增益、李晓东、王飞、卫成业、严建华、岑可法		VII -69-5
984001	充满灰性发射、吸收、散射介质的二维炉膛中温度分布和光学参数同时重 建方法	姚洪、周怀春、盛锋、李军、郑楚光	VII -74-5

自然对流对非金属材料受热升温着火的影响

杜文锋 张孝谦

(中国科学院工程热物理研究所)

一、前言

电气元部件在工作过程中会发热升温。在 $1g$ 环境中, 自然对流能将一部分热量散失出去。但在 μg 环境中, 基本不存在自然对流, 因此, 热量会在电气元部件内部聚集。这说明, 在 μg 环境中, 自然对流的消失使电气元部件的热传递发生了很大的变化。对同一电气元部件和相同的工作载荷, 在 μg 环境中工作时, 物体内部的温度比在 $1g$ 环境中工作时升高得快, 且最终温度也会比在 $1g$ 环境下高, 这就使 μg 环境中的电气元部件以及紧靠电气元部件的可燃物容易受热着火或出现问题。例如, 根据NASA公布的资料, 美国航天飞机在截止1992年6月的50次飞行中, 至少发生了5次失火事件(平均每十次飞行就发生一次失火), 这五次失火事件均是由于电气元部件的短路和过载发热引起的: 对“阿波罗-13”飞船事故的分析表明, 飞船爆炸的原因是由于服务舱液氧箱中两个纽扣大小的恒温器开关出了毛病, 导致加热系统管组长时间加热产生高温, 破坏了附近电动机线路的绝缘性, 以致引起氧气爆炸。而实际上在发射前三、四天, 当液氧箱加上氧气, 电动机开动后, 加热系统管组即开始长时间加热, 只是由于自然对流的散热, 温度没有上升到失控的高度, 故问题的严重性没有充分暴露出来。因此, 为确保航天飞行的火灾安全, 必须对微重力条件下电气元部件的发热升温 and 着火过程进行深入的研究。

由于电器元部件发热升温过程持续时间较长, 目前的地基微重力设施仅能提供10秒的微重力条件, 且无法得到航天飞机和空间站的搭载机会, 这给问题的研究带来了困难。作者首先建立了非金属材料受热升温 and 着火的数学模型, 通过计算分析了自然对流对由电气元部件发热引起的材料内部的温度变化的影响以及对材料受热自燃的影响, 并采用功能模拟概念进行了初步的实验模拟。本文将简要地介绍这部分工作。

二、理论分析

1、着火前物质受热升温分析

在着火前假定没有化学反应发生, 受热过程中物体内部仅发生热传导现象。为研究方便, 这里只研究一维导热问题。如图1所示, 热量从无限大平板一侧传入, 从另一侧以对流和辐射方式传出。导热微分方程及其相应的初始条件和边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 \leq x \leq l, t > 0) \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0 \quad (0 \leq x \leq l) \quad (2)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_f^4) + \alpha (T - T_f) \quad (3)$$

其中 $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{l}$

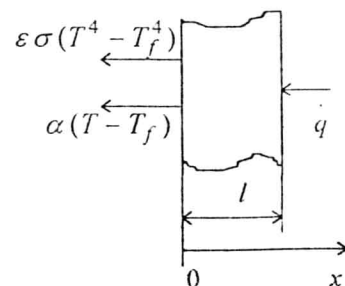


图1 一维导热示意图

$$Nu = 0.62(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \dot{q} \quad (4)$$

下面分别计算正常重力环境中向上加热的平板物质和没有表面对流换热的平板物质的温度上升过程以及各种因素对物质内部温度变化过程的影响。计算过程中取平板厚度为 $l = 0.05m$ ， $\lambda = 0.05W/(m \cdot C^{\circ})$ ， $a = 1.25 \times 10^{-6}m^2/s$ ， $\varepsilon = 0.85$ 。加热功率为 $q = 500W/m^2$ ，初始温度和环境温度 $T_0 = T_f = 20^{\circ}C$ 。无自然对流时取 $\alpha = 0W/(m^2 \cdot K)$ 。计算表面自然对流换热系数时，平板边长取为 $0.15m$ 。

图2所示为表面具有向上自然对流散热和消除自然对流时（ $\alpha = 0W/(m^2 \cdot K)$ ）材料中心点和表面温度随时间的变化。从图知，自然对流换热使材料温度上升速度下降，材料内部各点的稳态温度也比无对流换热时低。

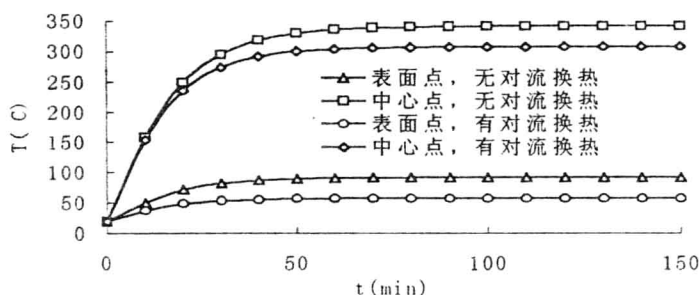


图2 对流换热对温度随时间变化的影响

图3给出了材料的导热系数对物质内部稳态温度分布的影响。从图可知，其他条件不变时，物体表面的温度不受导热系数变化的影响，而内部各点的温度随导热系数的增大而减小。

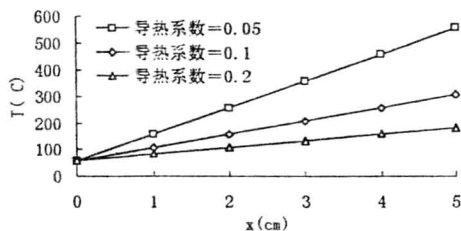


图3 导热系数对温度分布的影响

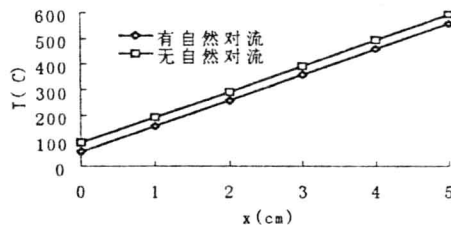


图4 自然对流对温度分布的影响

图4给出了具有自然对流和消除自然对流后的材料内部的稳态温度分布曲线。具有自然对流时，物体内部各点温度降低，且各点温度降低幅度相同。表面无对流换热时，热量以辐射方式散失，物体内部各点温度最高。当达到稳定状态时，物体表面的散热速度与物体内部的加热速度相等，因此有

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_f^4) + \alpha (T - T_f) \quad (5)$$

迭代求解即可得到物体表面的最终温度。

消除自然对流后 ($\alpha = 0$)，物体表面的稳态温度为

$$T_{\max} = (T_f^4 + q / (\varepsilon \sigma))^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时，式 (5) 中的辐射换热项可以忽略不计，表面温度等于环境气体温度，即 $T = T_f$ 。

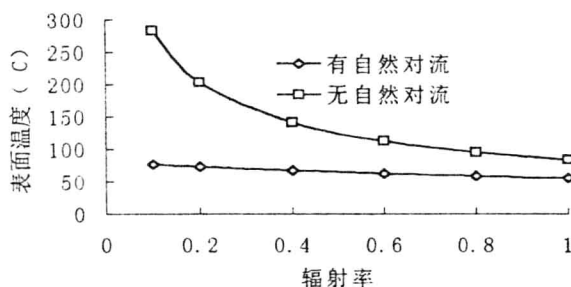


图5 表面温度随辐射率的变化

图5分别给出了具有自然对流和消除自然对流两种条件下物体表面温度随表面辐射率 ε 的变化。从图知，存在自然对流时，表面温度随辐射率变化较小，而消除自然对流后，表面温度随辐射率变化明显。说明存在自然对流时，自然对流换热和热辐射是热损失的两种主要形式，而消除自然对流后，物体表面的散热方式发生了很大的变化，热辐射是热损失的主要形式。

以上结果表明，物体表面的温度大小只取决于物体内部的加热率和物体表面的散热状况，而与物质的性质无关，但物体内部的温度却与物质性质有关。在相同的加热速率和表面散热条件下，物质的导热系数越小，物体的内部温度越高。无对流换热时，提高物体的表面辐射率，可降低物质内部的温度。因此，在微重力环境中，为保证电器元件的火灾安全，不仅应使电器元件有较好的表面散热状况（强制对流换热和较高的辐射率），而且材料要有较好的导热性能。

2、物质受热着火条件分析

可燃物受到加热时，一方面由于与空气中的氧气发生化学反应放热升温，温度的升高又加速化学反应速度。另一方面，物体会通过对流换热、辐射和导热向周围环境散热，限制温度的进一步升高。如果物体不具备着火条件，则物质内部温度分布最终将趋于稳态；否则，温度会不断地上升，直至物质发生着火。在后一种情况下，物质在着火之前，物质内部的温度分布为非稳态状态。因此，与研究对象相适应的非稳态导热方程与边界条件和初始条件是否具有最终稳态解就成为判断物质体系是否着火的依据。

为便于分析，作如下假设：

1. 反应速率服从质量作用定律和 Arrhenius 定律，热释放速率为：

$$Q_c = \Delta H_c k_n C_{AO}^n \exp(-E / RT) \quad (7)$$

2. 物质着火前，反应物消耗量很小，可假定反应物浓度 C_{AO} 为常数。

3. 物质的热力学参数为常数，不随温度发生变化。

一维非稳态导热方程为：

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_c \quad (8)$$

体系的左边界条件为:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_f^4) + \alpha (T - T_f) \quad (9)$$

定义左边界的总换热系数为:

$$\alpha_t = \alpha + \varepsilon \sigma (T^4 - T_f^4) / (T - T_f) \quad (10)$$

则体系的左边界条件为:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_t (T - T_f) \quad (11)$$

体系的右边界条件为:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = q \quad (12)$$

初始条件为:

$$T(x, 0) = T_0 \quad (0 \leq x \leq l) \quad (13)$$

定义如下无量纲参数:

$$\theta = \frac{E(T - T_f)}{RT_f^2}, \quad x_1 = \frac{x}{l}, \quad t_1 = \frac{at}{l^2} \quad (14)$$

利用无量纲参数对方程(8) — (13)无量纲化, 得:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t_1} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_1^2} + \delta \exp(\theta) \quad (15)$$

式中:

$$\delta = \frac{l^2 \cdot E \cdot \Delta H_c \cdot k_n \cdot C_{AO}^n}{\lambda RT_f^2} \cdot \exp(-E / RT_f) \quad (16)$$

左边界条件为:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = -Bi\theta \quad (17)$$

其中 $Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$

右边界条件为:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \right|_{x_1=l} = -q' \frac{lE}{\lambda RT_f^2} = -q' \quad (18)$$

q' 为无量纲加热速率。

初始条件为:

$$t_1 = 0 \text{ 时, } \theta = 0 \quad (19)$$

从以上无量纲方程可以看出, 方程的解完全取决于 q' 、 Bi 数、 δ 三个参数, 而与物质的性质无关。分析式(16)还可发现, δ 表征物体内部化学发热和通过边界向外传热能力的相对大小。因此, 当 δ 大于某一临界值 δ_{cr} 时, 化学发热速率大于通过边界

向外传热的能力，物质最终将会着火；反之，当 δ 小于该临界值 δ_{cr} 时，物体内部化学发热与通过边界向外传热将最终达到平衡，物质不可能着火。 δ_{cr} 的值由 q' 和 Bi 数确定。

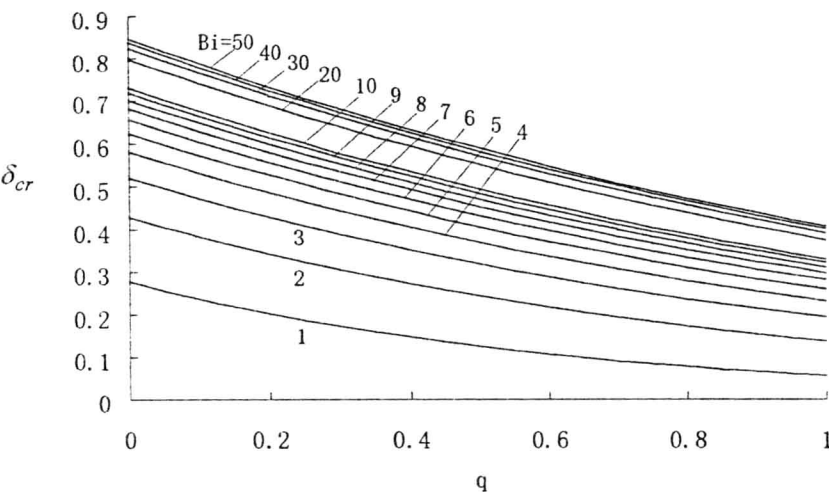


图6 δ_{cr} 与 q' 、 Bi 之间的关系

对方程进行数值求解得到了不同的 q' 和 Bi 对应的 δ_{cr} 值，如图6所示。图中 q' 值越大，或者 Bi 数越小， δ_{cr} 值越小，即物质越易着火。在临界着火条件下， δ_{cr} 的表达式为：

$$\delta_{cr} = \frac{l_{cr}^2 \cdot E \cdot \Delta H_c \cdot k_n \cdot C_{AO}^n}{\lambda R T_{f,cr}^2} \exp(-E / RT_f) \tag{20}$$

此式表明，对相同的内部加热速率（ q' ）和外表面传热条件（ Bi ），物体的厚度、燃烧热越大和环境温度越高，物质受热越易着火；物质的导热能力越大，物质内部散热越迅速，物质越不易着火。

三、材料受热着火实验

1、实验描述

由于电器元部件发热升温过程持续时间较长，目前的地基落塔设施不能提供足够长的时间进行微重力环境中的物质受热升温 and 着火实验，且无法得到航天飞机和空间站的搭载机会，因此，我们采用下面的功能模拟装置研究对流换热对电器元部件及其周围的非金属材料的加热升温过程和受热自然着火的影响。

如图7所示，实验系统由非金属材料加热装置和数据采集系统两部分组成。其中，非金属材料加热装置由两套完全相同的桶形容器和加热元件对称安装而成。加热元件为电阻加热片，用以模拟发热电器元部件，其发热功率可通过调节电阻加热片两端电压来控制。材料试样紧靠电阻加热片，模拟电器元部件的非金属材料部分，以及紧靠电器元部件的非金属材料。在非金属材料的内部设置若干个热电偶，测定电阻加热片通电后不同时刻非金属材料内部的温度变化。对称的电阻加热片由隔热石棉板隔开。这种对称结构的一个优点是能最大限度地避免因加热片两边传热不对称引起的两层加热片间的传

热,使电阻加热片对非金属材料的实际加热功率与通过电压与电流(或电阻)计算得到的名义加热功率尽可能一致。这种对称结构的另一个优点是如果上下实验段内部的材料试样完全相同,则通过一次实验即可得到在相同的加热条件下,具有自然对流和消除自然对流两种情况下的物质受热升温 and 着火的结果,从而保证两种情况下的加热功率相同,消除单独实验时产生的加热功率实验误差。实验过程中,试样内部各点温度随时间的变化过程由数据采集系统自动记录。

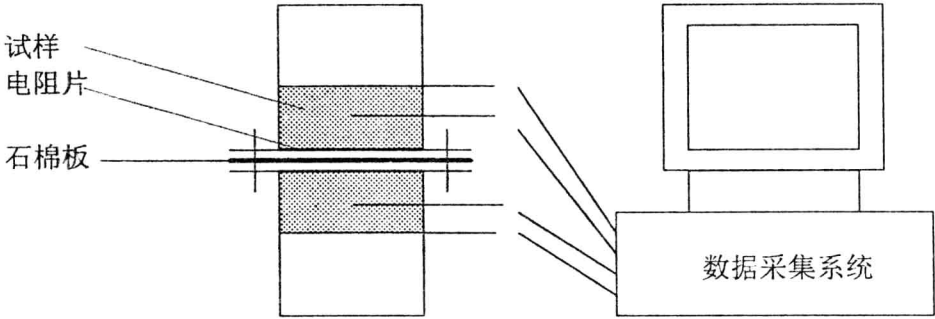


图7 实验系统示意图

当实验装置垂直放置时,置于下半实验段内的非金属材料在容器的最上层,容器内部的温度从下到上逐渐升高,这能有效地消除由于温度分布不均匀和重力共同作用产生的自然对流,从而可以模拟微重力环境中的电器元部件受热升温 and 受热着火的全过程。当然,由于容器表面温度小于内部非金属材料 and 空气的温度,因此,不可避免地还会有较弱的自然对流存在。对置于上半实验段内的非金属材料,其内部温度从下到上逐渐降低,这种温度分布与重力共同作用将产生正常重力下的自然对流。

2、实验结果

本文作者利用上述装置对棉布 and 聚氨酯泡沫塑料进行了加热升温着火实验研究。其中棉布的孔隙率较小,代表可燃的密实材料,而聚氨酯泡沫塑料具有较大的孔隙率,代表可燃的多孔介质材料。

图8所示为棉布的实验结果,棉布由四层纯棉床单布叠加而成,总厚度为2 mm。图中曲线分为两部分,第一部分加热功率为 2500 W/m^2 ,加热114分钟后内部温度达到稳态,棉布没有着火。向上加热的棉布中心点和表面温度分别为 197°C and 137°C ,向下加热的棉布中心点和表面温度分别为 225°C and 160°C 。从第114分钟开始为第二部分,加热速率增大为 2800 W/m^2 。此时向下加热的棉布温度发生陡升现象,表明内部存在化学反应,且反应放热速率与电阻加热功率之和大于通过表面 and 边界的热损失,因此内部出现热量积累而着火。而向上加热的棉布开始时温度上升,上升速度逐渐减小,随后温度出现陡升着火现象。这说明消除自然对流有利于棉布着火。

图9给出了部分消除自然对流 and 具有自然对流两种条件下聚氨酯泡沫塑料受热升温着火过程中材料中心和表面温度随时间的变化过程。泡沫塑料厚度为2 cm,加热速率为 900 W ,温度测量点位于泡沫塑料对称轴的中点 and 表面。图中曲线所示温度上升过程可以分为两个阶段。第一阶段为聚氨酯泡沫塑料初始受热温度上升阶段。在该阶段,由于温度较低,聚氨酯与氧气的化学反应速率很低,可以认为无化学反应发生,物体只受电

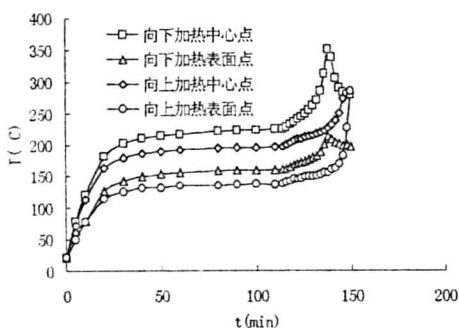


图8 棉布受热着火实验曲线

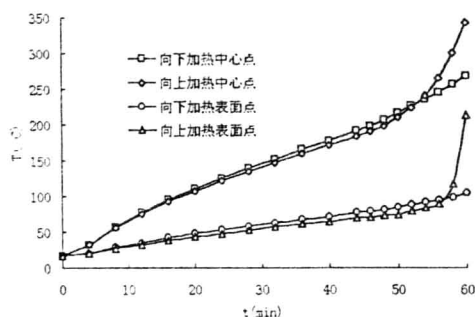


图9 泡沫塑料受热升温着火实验曲线

阻加热片的加热升温。对相同的加热功率，无自然对流时，材料的升温过程比有自然对流时快，且各点的温度也比有自然对流时大。第二阶段为着火燃烧阶段。该阶段有一个显著的特点，即泡沫塑料和氧气发生化学反应，向上加热的泡沫塑料内部温度呈加速上升趋势，并最终出现温度陡升现象，这标志受热着火的开始。而向下加热的泡沫塑料在同一加热的速率下温度虽继续上升，但上升速度比向下加热时小，无温度陡升现象发生。大量的实验表明，即使向下加热出现着火现象，燃烧所达到的最高温度也比向上加热着火燃烧时的温度低。这可以解释为消除自然对流后，虽然由自然对流引起的热损失消除了，但材料内部的氧气消耗只能通过扩散得到补充，物质的着火燃烧受氧气扩散速率的制约，化学反应过程为氧气扩散控制过程，因此在整个着火燃烧阶段，前述理论分析中的基本假设2不成立。而具有自然对流时，虽然有较大的热损失，但由于自然对流能源不断地补充燃烧区消耗的氧气，一旦温度达到足够的高度，聚氨酯泡沫塑料与氧气的化学反应发热速率和电阻片加热功率之和就会大于自然对流散热速率，温度迅速提高，反应加速进行直至着火。可见，在静止的微重力环境和正常重力环境两种条件下，物质受热着火的机理具有较大的差别。为弄清微重力环境中物质受热着火的机理，还需从理论和实验两个方面进行深入细致的研究。

四、小结与讨论

对比具有自然对流和消除自然对流两种情况下棉布和聚氨酯泡沫塑料的受热升温 and 着火过程，并结合理论分析，可以得出如下结论：

1、自然对流的存在与否对电气元件的散热机理有很大的影响。无自然对流时，物体表面主要以辐射换热方式向环境散热，物体内部温度上升速度较快，最终稳态温度也较大。有自然对流时，物体以自然对流和热辐射向环境散热，物体表面散热速度较大，物体内部温度上升速度较小，最终稳态温度也较低。

2、在1g条件下，电气元件以自然对流和热辐射的形式散热，因此，在相同的工作载荷下，其稳态温度比 μg 条件下低得多，这就使 μg 条件下电气元件发热升温引起的失火危险性在地面模拟实验中被掩盖。“阿波罗-13”爆炸事件即是典型例证。因此，对载人航天飞行器中的任何电气元件过热现象都必须给予高度的重视。

3、在稳态条件下，如果材料内部无化学反应发生，材料的表面温度仅取决于材料内部的加热速率和表面的换热条件（如有无自然对流，表面的热辐射率），而与材料的物理化学性质无关。加强空气循环和增大表面辐射率是降低电气元件温度，防止载人航天飞行器失火事故的有效措施。

4、自然对流对物质受热着火有很大的影响。对密实的棉布，着火主要受温度控制。

无自然对流时,材料表面只有辐射热损失存在,材料有较好的蓄热条件,而有自然对流时,材料表面的散热速度较大,因此,消除自然对流有利于物质受热着火。而对孔隙率较大的聚氨酯泡沫塑料,着火受温度和氧气扩散速率的控制。自然对流的存在能迅速补充着火过程中所消耗的氧气,而消除自然对流后,氧气只有通过扩散缓慢补充。因此,当温度达到一定高度,材料内部发生化学反应时,自然对流有利于物质着火。相比较而言,消除自然对流虽然会使材料受热时温度上升较快,但氧气供给不足限制了着火的发生。

5、 本文所述的功能模拟实验装置还不能完全消除自然对流,且大量的热量通过边界向环境散失,对非金属材料的实际加热量与名义加热量间相差很大,这使实验结果缩小了微重力环境中与正常重力环境中电气元部件发热升温的差别,因此,功能模拟实验还需进一步完善。我们计划采用先进的隔热措施或在真空容器中加热非金属材料的方法进一步开展研究工作。

参考文献

1. David C.Walther and A.Carlos, Fernandez-Pello,Smoldering combustion experiments in microgravity,Fourth international microgravity combustion workshop, Cleveland, Ohio, May, 1997.
2. Elizabeth R. Cantwell and A.C.Fernandez-Pello,Smoldering combustion under low gravity conditions, 28th aerospace sciences meeting,Reno,Nevada ,January , 1990.

添加剂对乳化油着火延迟影响的研究

王利坡 付维标

清华大学工程力学系

摘要

在内燃机中应用乳化燃料的一个重要前提是缩短着火延迟时间, 本文尝试在乳化油中加入不同的添加剂, 从实验与计算两方面对此问题进行了研究, 通过比较不同的工况, 探讨了可能影响着火延迟的各种因素及其效果, 取得一些有益的结论。

前言

在内燃机中发生的燃烧过程决定了燃烧的效率与污染的排放。为了实现高效、低污染的燃烧, 长期以来采取了各种措施, 其中乳化油燃烧能够显著降低污染, 但也会带来不易着火、启动困难的问题。

着火延迟能够反映燃料的燃烧特性。在乳化油(含水)燃烧情况下, 如果仍能维持与纯油一样的着火延迟或者更短, 则说明可以克服水分对燃烧的影响。因此研究乳化油(含水)燃烧条件下如何缩短着火延迟, 将对今后在内燃机中使用乳化油有重要意义。

为了解决这一问题, 我们尝试在乳化油中加入不同的添加剂, 从实验与计算两方面探讨了各种结果, 并得出一些有益的结论。

一 实验测量

实验装置如图 1 所示。

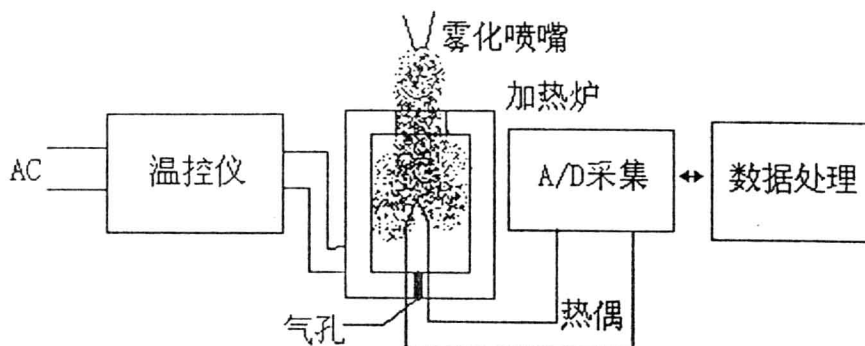


图 1 实验装置示意图

在上述装置图中, 加热炉采用电阻丝加热, 雾化喷嘴为间歇气动式, 为了保证燃烧过程中的氧气供应, 在加热炉底部开有通气孔。

通过 A/D 采集数据处理的图像, 可以确定着火是否发生及着火延迟时间, 图 2、图 3 为典型的采集结果。

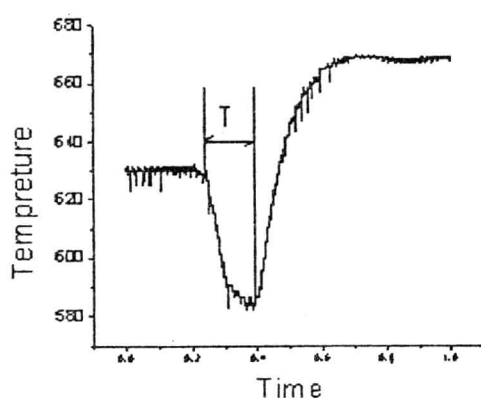


图2 着火发生

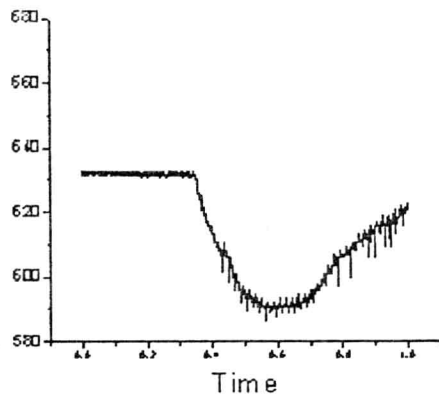


图3 着火未发生

由图2可以判断已发生着火, 其着火延迟为 T (标注于图中), 但图3则没有着火发生, 因为它没有温度的突跃, 两图温升曲线有明显的差别。

运用这种手段, 我们测量了五种添加剂(以下用1—5号来表示)与不同含水量的乳化油组成的混合系的着火延迟, 结果见表1。表1中标注的加入量为添加剂与总体混合系的体积比, 实验中, 乳化油含40%的水分。为了便于对比, 取纯添加剂的延迟时间为1(以下同)。实验曲线见图6—9。结果分析、与计算的对比及机理解释见下文讨论部分。

表1 着火延迟时间 T 测量结果

加入量 种类 T	10%	20%	30%	0 %	00%	柴油
1	2.5	1.01	0.95	1.14	1	0.93
2	1.5	0.45	0.32	0.49	1	0.26
3	1.8	1.23	1.23	1.28	1	1.12
4	1.5	0.61	0.45	0.63	1	0.63
5	2.0	1.32	1.31	1.42	1	1.35

注: 乳化油着火不稳定, 火焰空间分布不均匀。

二 物理模型

为了从理论上解释表1的实验结果及讨论不同参数对着火延迟的影响并预报可能的趋势, 建立了如下物理模型。

假定空间液滴分布均匀, 大小相等。

整个空间可以分为两区, 如图4所示A与B区。其中A区只有纯蒸发而无化学反应, B区有反应, 即着火在滴间气相中发生。在计算过程中B为A提供边界条件, 而A可视为扩散源。

设整个气相过程准静态、静止、常物性。液滴很小, 温度均匀。液滴由三部分组成: 油、水及添加剂, 各组分任意时刻在滴内分布均匀。本文同时考虑了添加剂与油混溶、与水混溶两种情况, 由于液滴很小, 不会发生微爆, 各组分从进入高温环境便开始蒸发直至消失。环境密度不随时间变化。

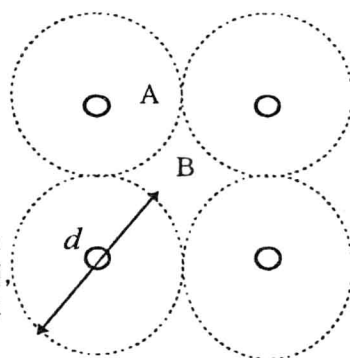


图4 物理模型示意

由前面易知A区的直径 $d = \frac{1}{\sqrt[3]{C}}$, C 为单位体积空间液滴的数量, 是一常数。

下面分 A、B 两区建立基本方程。

(1) A 区

$$\text{质量守恒方程} \quad 4\pi\rho v^2 r^2 = G(t) \quad (1)$$

组份扩散方程

$$\rho v \frac{dY_i}{dr} = \frac{1}{r^2} \left(\rho D_i r^2 \frac{dY_i}{dr} \right) \quad i = w(\text{水}), f(\text{油}), ac(\text{添加剂}) \quad (2)$$

$$\text{能量方程} \quad \rho v c_p \frac{dT}{dr} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(\lambda r^2 \frac{dT}{dr} \right) \quad (3)$$

由(2)从 r (A 区半径) 到 r_p (液滴半径) 积分可得:

$$G_i(t) = 4\pi\rho D \frac{rr_p}{(r-r_p)} \ln \left(\frac{1-Y_{iB}}{1-Y_{is}} \right), \quad i = w(\text{水}), f(\text{油}), ac(\text{添加剂}) \quad (4)$$

Y_{iB} 与 Y_{is} 分别为各组份在 B 区与液滴表面的质量分数, 与组份的分压 P_i 有关。此时要区分油溶与水溶两种情况, 下面分别说明。

如果添加剂与油混溶、与水不混溶, 则:

$$P_i|_s = M_i \langle P_i \rangle, \quad i = ac, f. \quad (5)$$

M_i 表示相溶体系中各组份的摩尔分数, $\langle P_i \rangle$ 表示对应温度下的纯组份的分压, 用 Clausius-Clapeyron 方程表示如下 (P_0 为总压):

$$\langle P_i \rangle = P_0 \exp \left[-\frac{L_i}{R_i} \left(\frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

由于水与挥发份和油不相溶, 故有 $P_w = \langle P_w \rangle$ 。

如果易挥发份与水混溶、与油不混溶, 则:

$$P_i|_s = M_i \langle P_i \rangle, \quad \text{其中 } i = ac, w. \quad P_f = \langle P_f \rangle.$$

$$\text{在计算中简化如下:} \quad Y_i|_s = y_i|_s = \frac{P_i}{P_0}|_s \quad (7)$$

将式(3)从 r 到 r_p 积分可得:

$$G(t) = 4\pi\lambda \ln \left(1 + \frac{c_p(T_B - T_p)}{q_w} \right) \frac{rr_p}{c_p(r-r_p)} \quad (8)$$

其中 q_w 满足 $G(t)q_w = 4\pi\lambda r_p^2 \frac{dT}{dr}|_s$, T_B 与 T_p 分别为 B 区与液滴的温度。

总蒸发量是三部分蒸发量之和:

$$G(t) = G_w(t) + G_f(t) + G_{ac}(t) \quad (9)$$

油滴的能量方程为:

$$\rho\pi c_p \frac{d^3 r_p}{6 dt} = Gq_w - (G_w(t)L_w + G_f(t)L_f + G_{ac}(t)L_{ac}) \quad (10)$$

其中 L_w 、 L_f 、 L_{ac} 分别为水、油、添加剂的蒸发潜热。

在蒸发过程中, 液滴直径 d_p 由初始值 d_0 逐渐减小, 变化规律如下: