

中国工程热物理学会

第十届年会论文集

燃 烧 学

二〇〇一

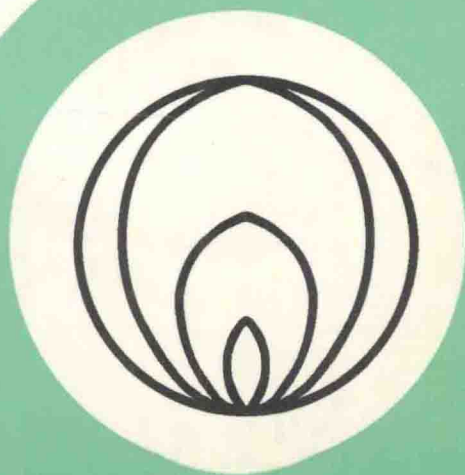
青 岛

中国工程热物理学会 主办

青岛海尔集团

山东工业大学能源与动力工程学院

提供资助



燃烧学学术会议论文目录

一. 燃料及可燃物的燃烧特性

- 014001 受限空间中 PMMA 着火时间的模拟研究.....
.....刘江虹 廖光煊 厉陪德 范维澄 陈长坤(1)
- 014005 生物质复合型煤(BCC)的燃烧特性研究.....
.....何方 王华 姚刚 马文会 胡建杭(6)
- 014009 新世纪我国电站煤燃烧技术发展探讨.....冯俊凯(11)
- 014030 变氧浓度下煤焦燃烧的实验与模拟.....
.....刘彦丰 方立军 李永华 阎维平 宋之平(16)
- 014034 煤燃烧过程中硫化物的生成特性研究.....王雁 郑楚光 游小清(21)
- 014036 一种预混火焰稳焰器的试验研究.....宋燕民 马人熊(27)
- 014038 Na_2CO_3 调质钙基脱硫剂硫化机理实验研究.....王春波 沈湘林 缪明烽(31)
- 014057 垃圾焚烧过程中重金属分布特性的研究.....
.....张若冰 池涌 徐旭 陆胜勇 何杰 严建华 岑可法(38)
- 014060 湍流火焰自相似临界微尺度分析.....杨宏旻 刘勇 顾璠 徐益谦(44)
- 014070 垃圾焚烧灰渣的成分分析及其熔融特性.....
.....阎常峰 林伯川 何立波 陈恩鉴 陈勇(50)
- 014075 火焰的非线性现象和一个新的不稳定性机理.....
.....琚诒光 Sergey Minaev Chung K. Law(55)
- 014077 煤粉掺入钙基复合添加剂的燃烧特性研究.....
.....刘豪 邱建荣 吴昊 熊方丽 李治雄(61)
- 014084 沥青燃料的热解规律研究.....龚景松 傅维标(66)
- 014092 垃圾与煤混烧的燃烧特性实验研究.....娇维红 吕清刚 那永洁(71)
- 014119 喷流-移动床 RDF 热解燃烧特性研究.....
.....王志奇 李海滨 黄海涛 吴创之 陈勇 李保庆(79)

二. 煤粉及水煤浆燃烧

- 014003 六角燃烧煤粉炉炉内空气动力特性的研究与应用.....
.....李瑞扬 吕薇 赵玉晓 秦裕琨(85)
- 014015 采用偏置射流预燃室稳定燃烧水煤浆的原理及应用研究.....
.....原鲲 陈丽芳 吴承康(90)
- 014016 水煤浆多级气动喷嘴的喷雾特性研究.....原鲲 陈丽芳 吴承康(96)
- 014017 煤粉低尘燃烧器热态实验研究.....
.....林伯川 陈恩鉴 阎常峰 杨卫斌 左军(103)
- 014053 焦煤混粉燃烧试验研究.....杨亚平 罗永刚 蔡崧(108)

三. 流化床燃烧及气化

- 014010 循环流化床焚烧生活垃圾气体污染物排放研究.....
.....董长青 金保升 仲兆平 兰计香 岳俊锋 黄亚继 李 锋(120)
- 014013 煤焦中 CaS 在 CFBC 中的反应模型.....李定凯 吕子安(129)
- 014056 循环流化床焚烧炉多环芳烃排放的试验研究.....
.....陆胜勇 李晓东 严建华 池 涌 岑可法(135)
- 014063 循环流化床锅炉燃烧专家控制系统开发.....
.....陆继东 沈 凯 陈交顺 罗海岩 董统永 陈 明(141)
- 014098 固体废弃物在循环流化床中的运动特性实验研究.....
.....姜 凡 刘 石 王海刚 燕桂章 潘忠刚(147)
- 014122 管式布风流化床的初步试验研究.....
.....陈 亮 江爱朋 马增益 严建华 池 涌 岑可法(152)

四. 燃烧过程数值计算

- 014011 障碍物管道中湍流火焰发展的数值模拟.....余立新 孙文超 吴承康(158)
- 014018 套筒式燃烧器燃烧室内气体燃烧场的仿真.....
.....雍玉梅 吕清刚 李文忠 谢安国(168)
- 014023 循环流化床内颗粒团运动的数值模拟.....刘向军 徐旭常 潘小兵(174)
- 014024 有限分析法 Simple 类算法比较计算...徐江荣 周志军 周俊虎 岑可法(181)
- 014031 旋流数对湍流燃烧中 NO 生成影响的研究.....陈兴隆 周力行 张 健(185)
- 014032 旋流煤粉燃烧器出口区域三维气粒两相流动与煤粉燃烧的数值模拟.....
.....李志强 李荣先 周力行(192)
- 014033 采用条件矩(CMC)模型模拟 CH₄-Air 射流扩散燃烧.....
.....邹 春 郑楚光 周力行(201)
- 014037 受限空间中典型固体热释放速率的研究.....
.....刘江虹 廖光煊 范维澄 陈长坤(207)
- 014045 微重力下材料极限氧浓度的数值模拟研究.....杜文锋 张孝谦 胡文瑞(212)
- 014046 局部全息格式用于扇形顶盖驱动流的模拟.....
.....吴 江 陈启峰 章明川 尹 斌 高 茂 何 磊(218)
- 014050 爆震波传播速度同阻力和热损失的一般关系.....刘 颖 孙英英 琚诒光(227)
- 014055 基于最小均方差估计的非线性 IEM 模型.....李 艺 陈义良(235)
- 014061 玻璃窑炉纯氧燃烧过程数值模拟.....郭印诚 林文漪(242)
- 014064 钙基脱硫剂孔结构分形维数的近似计算.....缪明烽 沈湘林 王春波(248)
- 014073 二维槽道湍流拟序结构的大涡模拟.....向 屏 郭印诚(253)
- 014074 燃气轮机燃烧室扩散燃烧的数值模拟.....张文普 李祥晟 丰镇平(261)

014087 碳酸钙颗粒煅烧过程的统一数学模型·····	谢建云 傅维标 (267)
014089 高温低氧燃烧炉的实验与数值计算·····	
·····杜以恒 周 雁 龚景松 何裕昆 陈力田 傅维标 (274)	
014099 切向燃烧锅炉上炉膛区域两相流场的数值模拟·····	张 泽 徐旭常 (284)
014100 用简化的联合 PDF 模型计算 CH_4 扩散燃烧·····	
·····郭治民 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪 (291)	
014102 几种轨道模型的比较研究·····	杨武兵 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪 (296)
014107 二维气固射流流化床流体动力特性的欧拉-离散单元方法模拟及其气泡特 性的频谱分析·····	刘安源 刘 石 姜 凡 潘忠刚 (301)
014115 辛烷、空气混合物爆燃爆震转换的数值模拟·····	闫 朝 严传俊 徐建中 (310)
014121 环形燃烧室性能计算·····	赵坚行 雷雨冰 周峰轮 (317)
014123 铬在氢氧扩散火焰中氧化的数值研究·····	于溯源 杨 龙 (323)
014124 WJ5A -1 发动机燃烧室气动计算分析·····	周 雁 党道远 周 红 傅维标 (328)

五. 燃烧污染控制

014008 CFB-FGD 热态中试研究及理论分析·····	
·····高继慧 秦裕琨 马春元 吴少华 赵旭东 董 勇 (336)	
014020 炉内喷钙温度点的合理选取·····	贾 瑜 张同翔 任有中 (343)
014021 复合固硫剂煤粉炉炉内脱硫试验·····	任有中 钱剑青 张同翔 (348)
014025 NH_3 脱除烟气中气态污染物的应用前景·····	
·····何伯述 郑显玉 王淑娟 陈昌和 (353)	
014028 电站烟气中二氧化碳减排新技术双重效益的研究·····	
·····张 昀 李振中 李成之 张经武 Jim Zhou 李 欣 张志明 陈冠雄 (358)	
014029 直喷细钙基吸着剂烟气脱硫研究·····	张忠孝 金 昌 周爱兰 黄志强 (366)
014039 电场及电极物理几何特性对 SESDP 脱硝影响研究·····	
·····余 刚 颜 峥 胥 飞 杨宏旻 顾 璠 徐益谦 (372)	
014040 烟气中 Hg 的氧化机理的研究·····	
·····冯 荣 徐明厚 乔 瑜 程俊峰 姚成军 詹 靖 (377)	
014041 Hg/O/H/CI 系统中汞的氧化动力学研究·····	
·····乔 瑜 徐明厚 冯 荣 程俊峰 詹 靖 薛 玮 毛 军 (383)	
014043 燃煤锅炉中痕量元素排放因子的研究·····	
·····韩 军 徐明厚 程俊峰 乔 瑜 曾汉才 (389)	
014044 还原和氧化气氛下 CaS 固硫: 模型及其应用技术的研究·····	
·····赵惠富 赵启伟 吕清刚 (394)	
014049 流态化吸收式垃圾焚烧烟气净化试验研究·····	
·····仲兆平 金保升 兰计香 董长青 肖 睿 李 锋 (399)	

014058 煤燃烧过程中氯化氢的析出试验研究.....
.....何 杰 蒋旭光 徐 旭 严建华 池 涌 岑可法(405)

014062 燃烧废气中的氮氧化物(NO_x)在非平衡态等离子体中分解与转化的实验研究
.....张 强 顾 璠 余 刚 李彦鹏 徐益谦(411)

014068 循环流化床反应器干法烟气脱硫实验研究.....
.....雷福林 肖云汉 朱廷玉 陈 凡 贾建国(416)

014069 活性矾土吸收高温烟气中二氧化硫机理研究.....
.....汉春利 张 军 颜 峥 顾 璠 刘坤磊 徐益谦(421)

014076 自由基氧化结合化学吸收脱除烟气中的 NO_x.....
.....林 赫 高 翔 骆仲泱 倪明江 岑可法(426)

014079 增湿活化反应器内喷水脱硫试验研究.....
.....赵长遂 吴树志 刘现卓 段钰锋 陈晓平 吴 新(435)

014080 NO₂ 对中温干法脱硫反应影响的实验研究.....
.....宋 蓄 杨小勇 孙幸超 陈昌和 徐旭常(441)

014081 利用甲醇氧化烟气中 NO 的实验研究.....
.....宋 蓄 何百磊 杨小勇 陈昌和 徐旭常(446)

014085 氧化铁浆液脱硫的实验研究与理论分析.....
.....龚景松 傅维标 何裕昆 钟北京 周明德(452)

014086 石灰石煅烧过程中等效扩散系数的测量.....谢建云 傅维标 史 愿(457)

014093 关于碳氢燃料燃烧过程中的烟炱生成.....
.....王皆腾 祁海鹰 李宇红 由长福 徐旭常(463)

014094 生石灰颗粒中温脱硫过程数值计算.....
.....由长福 祁海鹰 徐旭常 凌晓聪 马千里(469)

014095 烟气中的凝结水对 SO₂ 浓度测量的影响.....
.....樊保国 祁海鹰 由长福 徐旭常(475)

014096 中温条件下氧化铁对氧化钙脱硫的催化作用.....
.....杨立寨 祁海鹰 由长福 徐旭常(480)

014097 蒸汽活化改善中温烟气脱硫的机理.....祁海鹰 由长福 王爱军 徐旭常(490)

014101 高压沿面放电烟气脱硫技术可行性冷态实验研究.....
.....鲍爱楠 王希麟 张会强 王 兵 任凯峰 郭印诚 林文漪(496)

014105 流化床中固体废弃物与煤混烧的技术经济分析.....
.....田文栋 金关麟 魏小林 黎 军 盛宏至(501)

014106 固体废弃物与煤混烧技术的环境影响分析.....
.....田文栋 金关麟 魏小林 黎 军 盛宏至(506)

014108 改性石灰中高温净化 HCl 的试验研究.....
.....汪雄平 陈德珍 周小海 陈 超 张鹤声(511)

六. 液雾燃烧

- 014002 柴油引燃天然气的双燃料燃烧机理的研究.....
.....姚春德 刘增勇 高昌卿 孙家峰(516)
- 014006 气泡雾化喷嘴出口下游液雾流强特性实验研究...刘联胜 吴晋湘 韩振兴(521)
- 014007 气泡雾化喷嘴混合室内两相流型及喷嘴喷雾稳定性研究.....
.....刘联胜 吴晋湘 韩振兴(526)
- 014012 旋流多级气动喷嘴设计和喷雾特性研究.....
.....樊未军 萧琦 杨阳 杨茂林(532)
- 014014 新型三组元喷嘴雾化特性研究.....李清廉 田章福 周进 王振国(537)
- 014059 四气门发动机可变涡流稀薄燃烧特性研究.....
.....刘书亮 刘伍权 刘德新 李志军(544)
- 014065 细水雾抑制障碍物稳定火焰的实验研究.....
.....崔正心 廖光煊(550)
- 014066 激光多谱勒测量细水雾流场...秦俊 廖光煊 王喜世 崔正心 刘江虹(555)
- 014082 水对未来汽车实现低油耗及超低排放至关重要.....傅维标(560)
- 014083 含氧燃料与催化重整燃烧相结合是未来汽车实现低油耗及超低排放的新思路
.....傅维标 欧阳明高 王建昕 马凡华 宁智 帅石金 侯凌云(565)
- 014091 直喷式柴油机中壁面催化重整反应对乳化油燃烧影响的数值研究.....
.....侯凌云 傅维标(570)

七. 其它燃烧问题及燃烧测试技术

- 014004 应用预蒸发技术燃烧液体燃料—应用冷焰燃烧现象实现液体燃料的预蒸发
.....何宏舟 H. Koehne(575)
- 014019 回转窑内 MSW 轴向传输和扩散的随机颗粒轨道模型.....
.....李水清 严建华 黄景涛 李润东 池涌 岑可法(582)
- 014026 固体燃料燃烧过程的控制研究.....吕清刚 那永洁 包绍麟 高鸣(589)
- 014027 昭通褐煤温和气化挥发物产率影响因素分析.....
.....陈永国 田子平 郭森魁 赵刚 陈俊(595)
- 014035 超声速预混可燃气流的点火与燃烧.....孙英英 韩肇元 司徒明 琚诒光(601)
- 014047 直径对脉冲爆震发动机性能的影响.....张群 严传俊 范玮 黄希桥(606)
- 014048 不同阻挡介质气体放电 NO_x 脱除特性研究.....
.....颜峥 余刚 胥飞 杨宏旻 顾璠 徐益谦(612)
- 014051 印刷线路板废弃物热解特性的实验研究.....
.....孙路石 陆继东 王世杰 余亮英 张娟(617)
- 014052 圆柱火焰的可燃极限及稳定性分析.....陈正 琚诒光 S. Minaev(624)
- 014054 含氮的 CH₄/Air 燃烧的 14 步简化机理.....任祝寅 董刚 陈义良(631)

014067 代用燃料与汽车排放初探·····	吕兆华 (638)
014078 光学分层热成像法重建火焰三维温度场分布的研究·····	
·····	王式民 陆永刚 赵延军 汪凤林 陆 勇 徐益谦 (644)
014088 催化剂对贫煤焦还原 NO 动力学参数的影响·····	钟北京 张怀山 (650)
014090 催化剂作用下贫煤焦对 NO 还原的实验研究·····	钟北京 张怀山 (655)
014103 旋流燃烧室内湍流燃烧的 PDA 实验研究·····	普 勇 张 健 周力行 (660)
014104 多功能旋流燃烧器的工业性试验研究·····	金 燕 郑洽余 徐秀清 杨瑞昌 (665)
014109 浮力对皱折锋面预混 V 形火焰的影响·····	
·····	王 岳 雷 宇 张孝谦 J. König C. Eigenbrod (670)
014110 层流预混气体多棱火焰燃烧现象的分析·····	顾明言 陈 光 许诗双 (678)
014111 层流预混 V 形火焰中火焰-流动相互作用·····	
·····	张孝谦 雷 宇 王宝瑞 王 岳 (683)
014112 预混层流 V 形火焰的流场特性实验研究·····	
·····	雷 宇 王宝瑞 王 岳 张孝谦 (693)
014113 微重力落塔双舱轴向间距的计算·····	郝庆洲 吴 海 张孝谦 (698)
014114 微重力燃烧实验平台 NMLC 落塔自由落体实验装置的下落加速度特性	
·····	吴 海 郝庆洲 袁龙根 吴文东 张孝谦 (705)
014116 催化重整反应在燃烧研究中的潜在应用·····	傅维标 (710)
014117 迭代法 ECT 对循环流化床底部固体浓度的测量·····	
·····	刘 石 王海刚 姜 凡 杨五强 (716)
014118 电容层析成象在流化床两相流测量装置中的应用·····	
·····	姜 凡 刘 石 王海刚 燕桂章 潘忠刚 (726)
014120 燃气轮机燃烧室燃烧天然气和燃烧中低热值煤气的比较·····	
·····	徐 纲 聂超群 黄伟光 陈静宜 (731)
014125 根据燃烧产物组成计算燃料空气混合比的方法研究·····	
·····	李兴虎 雷 艳 张博彦 韩爱民 金克成 (738)

受限空间中 PMMA 着火时间的模拟研究

刘江虹 廖光焯 厉陪德 范维澄 陈长坤

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室 230026)

(Email: jhongliu@mail.ustc.edu.cn)

摘 要 着火时间是可燃物燃烧的一个非常重要的参数。PMMA (polymethyl methacrylate) 是一种典型的固体易燃材料, 俗称有机玻璃。本文利用基于耗氧原理的锥形量热计系统模拟受限空间火灾环境, 在不同的外加辐射热作用下, 对 PMMA 的着火时间进行了数值与实验模拟研究。

关键词 着火时间, PMMA, 锥形量热计, 外加辐射热

1 引言

火灾的发生总是源于可燃物的着火与蔓延, 火灾的发展又与火灾现场的可燃物的燃烧密切相关。因此研究可燃物燃烧的早期特性具有极其重要的意义。

着火过程是指可燃物从无化学反应状态向稳定的强烈放热反应状态的过渡过程。可燃物要发生着火必须具备相应的着火条件, 着火条件是指实现反应系统在某个瞬间或空间的某部分达到高温反应态(即燃烧态)的初始条件或边界条件。燃烧着火的方法很多, 主要有化学自然、热自然和点燃三类。本文主要研究的是 PMMA (polymethyl methacrylate) 在受限空间火灾环境下的点燃着火时间。点燃是指用电火花、电弧、热板等高温源使混合气局部地区受到强烈的加热而首先着火、燃烧, 随后, 这部分已然的火焰传播到整个反应体系的空间。影响燃料着火的因素很多, 例如燃料的性质、燃料与氧化剂的成份、环境压力及温度、气流速度、燃烧室尺寸等。

本文对在不同外加辐射热及固定电火花点火作用下 PMMA 的着火时间进行研究。

2 点火模型分析

首先, 对 PMMA 试样在点燃前的热过程进行分析, 如图 1, 对点火初始时的各边界条件进行合理的简化, 从而使对复杂的物理过程分析的更加容易。假设 (1) 初始时 PMMA 试样的下表面还未受外加热影响其温度为 $T_L = T_0$; (2) 此热过程是沿竖直方向一维热传导; (3) 物性参数是常数; (4) 换热系数是均匀一致的。

由热扩散方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

其中 T 为温度, t 为时间, $\alpha = k / (\rho C_p)$ 为热扩散系数, y 为离表面处的距离。用方程 1 分析 y 从 0 到 δ 的表面薄层, 如图 1 所示,

$$\delta \cong \sqrt{6\alpha t} \quad (8)$$

将式 8 代入式 5, 且 $y = 0$ 时有:

$$T_{ig} - T_o = \frac{\dot{q}\delta}{2k} = \frac{\dot{q}}{2k} \sqrt{6\alpha t_{ig}} \quad (9)$$

或者

$$t_{ig} = \frac{2}{3} (k\rho c_p) \left(\frac{T_{ig} - T_o}{\dot{q}} \right)^2 \quad (10)$$

将方程 4 代入上式有:

$$t_{ig}^{-\frac{1}{2}} = \left[\frac{\varepsilon}{\sqrt{\frac{2}{3}} k\rho c_p (T_{ig} - T_o)} \right] \dot{q}_{ext} - \left[\frac{h_c (T_{ig} - T_o) + \varepsilon \sigma T_{ig}^4}{\sqrt{\frac{2}{3}} k\rho c_p (T_{ig} - T_o)} \right] \quad (11)$$

3 实验测量

本文的实验是在锥形量热计的实验间内进行, 如图 2 示, 受限空间的几何尺寸为 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.7\text{m}$, 燃料试样放在电子称重装置上, 正上方是辐射加热锥用来为燃料提供不同的热通量。燃烧产物收集后经排气管到分析段测试分析, 管路中安装抽气机并经实验间底部从环境中补充新鲜空气, 流量可以调节, 本文选择为 24 升/秒的空气流率作为通风条件。并使燃料的上表面与锥型加热器的下表面的距离为 25 毫米。

PMMA 试样为 100 克, 表面积为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。先选择确定热通量的外加辐射热, 自动点火装置工作后开始计时, 所有原始数据经计算机自动采集分析存盘, 经后期处理即可得到外加辐射热对可燃物热释放速率影响的信息。实验室相对湿度约为 65%, 环境温度约为 16°C 左右。

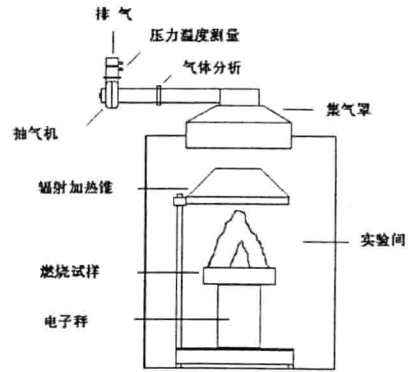


图 2 实验装置示意图

4 数值与实验结果分析

PMMA 点火模型的精确性很大程度上取决于它所使用的热物理参数的来源。根据相关文献[1, 2]和实际测量可以得到公式 11 中所需 PMMA 的热物理参数, 从而可以计算出点火时间与外加辐射热之间的关系, 见图 4。

实验中通过热释放速率的变化来确定 PMMA 材料上表面着火时间, 如图 3 所示, 从左边图可以看出外加辐射热为 20KW/m^2 , 当加热时间达到 220s 时, PMMA 式样的热释放速率明显有一个跳跃; 从右边图可以看出外加辐射热为 40KW/m^2 , 当加热时间达到 40s 时, PMMA 式样的热释放速率有一个明显的跳跃。因此, 着火后 PMMA 的热释放速率值会明显有一个升高, 据此可以来确定 PMMA 式样的点火时间。

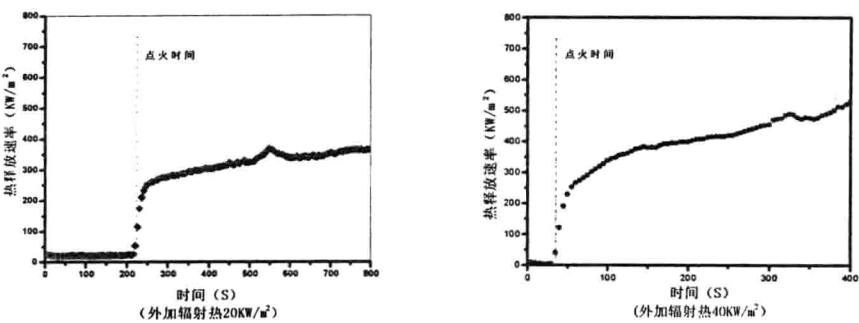


图 3 点火时间测定图

依照上述方法, 可以来确定其他辐射热加工况下的点火时间。点火时间与外加辐射热的关系见表 1, 随着外加辐射热增加, 点火时间逐渐缩短。

表 1 PMMA 试样在不同外加辐射热下的点火时间

$\dot{q}_{ext}$ (KW/m^2)	20	25	30	35	40	50	60	65	70	75
t_{ig} (s)	220	136	93	65	40	27	19	17	14	12

图 4 给出了 PMMA 点火模型的计算值与实验测量值之间的关系。从图中可以看出

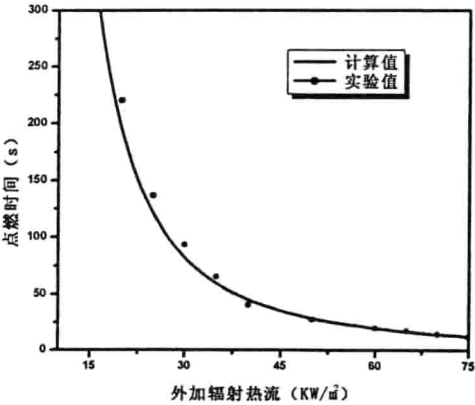


图 4. 点火时间的计算值和实验值比较

方程 11 能较好地反映 PMMA 点火时间变化趋势, 尤其当辐射热增大时, 模型可以更好地反映实际情况。

参考文献

1. Steckler, K. D., Kashiwagi, T., Baum, H. R., and Kanemaru, K., "Analytical Model for Transient Gasification of Non-Charring Thermoplastic Materials", Fire Safety Science Proceedings of Third (International) Symposium, pp. 895-904, G. Cox and B. landford, eds., Elsevier Applied Science, London, 1991.
2. Quintiere, J. G., "A Semi-Qnantitative Model for the Burning of Solid Materials", National Institute of Standards and Technology, NIST-4840, June, 1992.
3. Quintiere, J. G., "A Simulation Model for Fire Growth on Materials Subject to a Room-Corner Test", Fire Safety Journal, Vol. 18, 1992.
4. Karlsson, B. "Modeling Fire Growth on Combustible Lining Materials in Enclosures", Report TVBB-1009, Lund University, Department of Fire Safety Engineering, Lund, Sweden, 1992.
5. Takashi Kashiwagi, The Use of Calorimetry for Fire Materials Research Proccedings on Fire Calorimetry, DOT/FAA/CT-95/46, July 1995.
6. Ivan Milosavljevic and Eric M.Suuberg , The Behavior of Charring Solids under Fire-Level Heat Fluxes ,Work Sponsored by the Building and Fire Research Laboratory-NIST, under grant 60NANB0D1042,1994.
7. 范维澄、王清安、姜冯辉、周建军, 火灾学简明教程, 中国科学技术大学出版社, 1995

生物质复合型煤 (BCC) 的燃烧特性研究

何方 王华 姚刚 马文会 胡建杭

(昆明理工大学环境调和型能源新技术研究所, 昆明 650093)
(联系电话: 0871-5144174, E-mail: wanghuaheat@hotmail.com)

摘 要

通过热分析技术对以农作物秸秆、城市生活垃圾、林业加工废弃物等生物质和云南先锋褐煤为原料制得的生物质复合型煤 (BCC) 的燃烧特性进行了实验研究。结果表明, BCC 的燃烧过程大致可以分为四个阶段, 即脱水干燥、挥发份的析出和燃烧、挥发份燃烧和焦炭表面燃烧并存的过渡阶段、焦炭的表面燃烧; 且 BCC 具有着火温度低、燃尽率高等特点。此外通过对热重 (TG)、差示扫描量热 (DSC) 曲线的深入分析, 对 BCC 的有关燃烧动力学参数进行了研究。

关键词: 生物质复合型煤 (BCC), 热重分析, 燃烧特性, 动力学

1 引言

生物质能源是自然界各种绿色植物通过光合作用将太阳能辐射转换为化学能而固定下来、储存在植物体内的可再生能源。它既可再生又可贮存与运输, 是一种高效、廉价的太阳能储存方式。我国农作物秸秆的年产量约为 6 亿 t, 稻壳约 5000 万 t, 林业加工废弃物约 3000 万 t, 三项总计折合标准煤 2.15 亿 t^[1-2]。除此之外, 我国垃圾的历年堆存量已达 60 亿 t, 垃圾年产量已超过 1 亿 t, 且以约 9.5% 的速度逐年增长, 这些垃圾的约 37.5% 是可以作燃料利用的生物质能^[3]。目前我国生物质能的转化利用不足 10%, 还有一小部分被粗放利用, 其余的绝大多数被白白烧掉或废弃。不仅污染环境, 而且造成了巨大的浪费。如何合理地利用生物质能已引起世界各国的高度重视。与此同时, 我国现有约 43 万台工业锅炉和 11 万台工业炉窑急需燃用洁净型煤。把我国丰富的煤炭和生物质资源加工成复合型煤无疑是一个很有前景的发展方向。复合型煤可望获得比煤和生物质单独燃烧均优越的燃烧特性, 且生物质复合型煤 (Biomass Compound Coal, 简称 BCC) 具有易着火、高效燃烧、低污染和变废为宝等优点。笔者已成功开发了一种将农作物秸秆、城市生活垃圾、林业加工废弃物等生物质及煤炭和适当添加剂复合成为生物质洁净型煤的新技术。本文对用该技术制备的生物质复合型煤 (BCC) 的燃烧特性进行了研究, 为生物质复合型煤工业锅炉的设计和燃烧过程控制技术提供参考依据。

2 实验

2.1 实验仪器

实验仪器是美国 Rheometric Scientific Ltd. 公司生产的 Simultaneous Thermal Analyzers (STA) 同步热分析仪, 该仪器包括热分析仪、联用计算机和联机打印机。它可用于对物质做鉴别分析、组织分析和热参数分析。

2.2 试样

实验采用煤样为云南先锋褐煤, 生物质为木材加工厂的废弃物和一次性木筷, 粒度小于 80 目。所有样品的性质分析见表 1。

表 1 煤样与生物质的性质分析

样品	工业分析 (w%)			元素分析 (w%)				
	M	A	V	C	H	N	S	O
煤	17.19	2.18	43.29	68.75	4.80	2.06	0.90	23.49
木屑	6.69	0.68	77.93	47.25	5.79	0.19	~0	38.82

2.3 实验方法及实验条件

将煤、木屑粉碎研磨筛分，直至样品粒度小于 80 目，用分析天平称取一定质量的煤粉和木屑，按不同配比混合后在研钵内充分研磨、混合均匀，再用分析天平称取 3mg 左右，然后在 10MPa 的压力下成型，放入热分析仪的坩埚内。通以空气，使试样在空气氛围中以 10℃/min 的升温速率连续升温，热分析仪同步记录了试样重量变化（TG 曲线）及反应过程中的差示扫描热量变化（DSC 曲线），实验数据经微机处理后由联机打印机打印出实验结果。为了更好的研究生物质复合型煤的燃烧特性，同时还做了两组纯煤和生物质试样的热重分析作为参照系。

3 实验结果

生物质、煤和生物质复合型煤（BCC）的热重分析实验结果如图 1 所示。

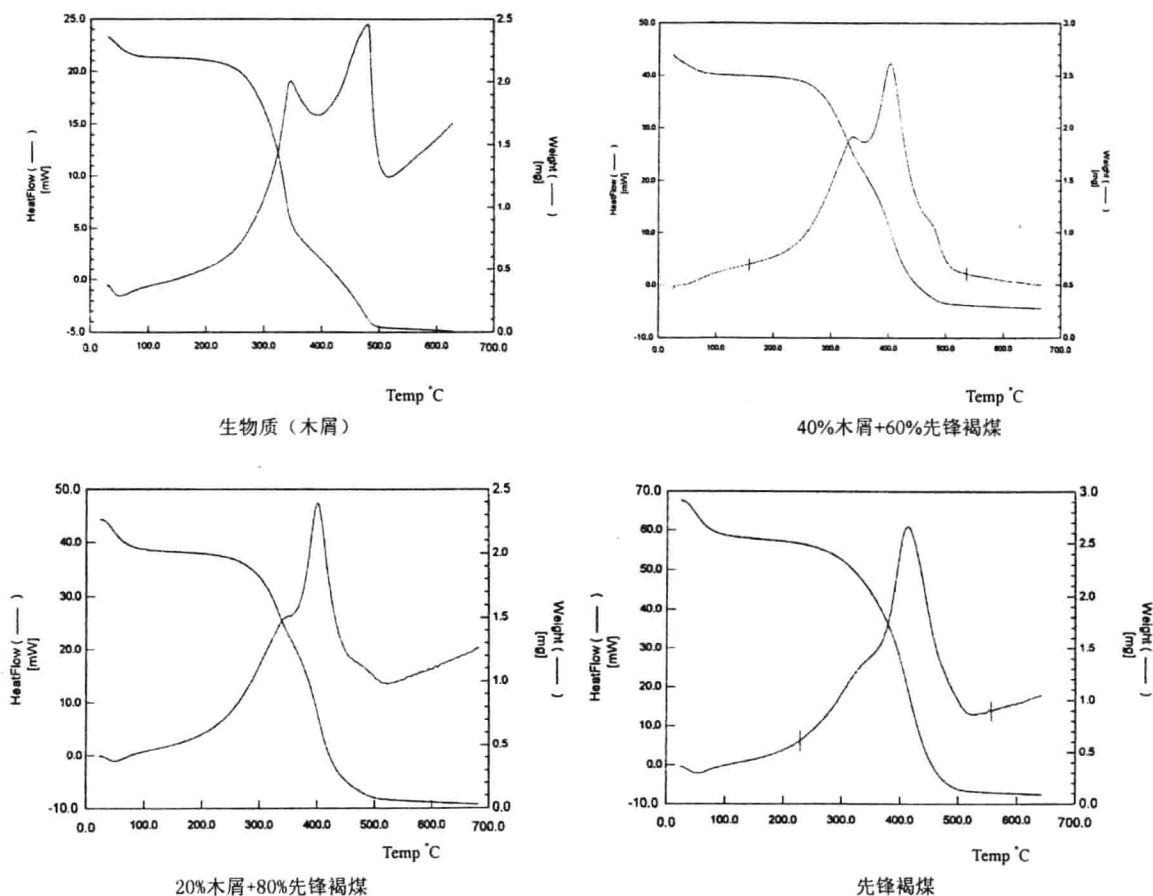


图 1 生物质、煤和生物质复合型煤（BCC）的燃烧特性曲线

4 实验结果分析

4.1 生物质复合型煤（BCC）的燃烧过程

生物质复合型煤（BCC）的燃烧过程同样也是强烈的放热化学反应，是燃料和空气的传热、传质过程。通过分析和比较复合燃料与煤和生物质的燃烧特性曲线，可以得出生物质复合型煤的燃烧过程分为四个阶段。

（1）脱水干燥 生物质材质疏松，易于吸收空气中的水分，煤中本身也有一定的水分，在试验开始阶段，燃料中的水分受热蒸发汽化，温度达到 100℃时水分基本蒸发完毕。水分蒸发所需的汽化潜热约为 2430kJ/kg，与此相对应的 DSC 曲线上在 50~70℃范围内

有一个明显的吸热峰。

(2) 挥发份的析出和燃烧 由于复合燃料中加入了大量的生物质, 挥发份也随之增加。随着温度的继续升高, 燃料中的低分子物质首先开始分解气化。在 250℃ 以前, 挥发份析出非常缓慢, 燃料质量平缓下降; 当温度升至 250℃ 时, 生物质加入量为 40% 的复合燃料的分解速度开始明显加快, 而生物质加入量为 20% 的复合燃料分解明显加快的温度是 275℃。这是因为生物质加入量越多, 挥发份越多, 越容易分解的缘故。当温度达到着火温度时, 气相组分开始燃烧, 在这种火焰温度的影响下, 生物质中的纤维素开始热分解, 煤中的小分子也开始析出, 并开始焦化, 产生大量的挥发性物质, 燃料质量急剧下降, 出现第一个失重速度的峰值。DSC 曲线上也出现了第一个放热峰。

(3) 过度阶段 当温度达到第一个放热峰后, 复合燃料的燃烧进入过度阶段。此时, 纤维素的热分解速度减弱, 但挥发份仍能保持微弱的燃烧火焰, 木质素由于高温而碳化, 煤的表面也已焦化, 但焦碳还是被挥发份包围着, 燃烧室中的氧气很缓慢的渗透到焦碳表面, 焦碳开始着火, 生成辉光炙热火焰。此时出现两种燃烧状态并存现象, 直到燃料中的挥发份物质分解完毕、气相火焰熄灭。TG 曲线上在 330~350℃ 之间有一个明显的拐点, DSC 所示的放热速率也显著下降, 说明燃料燃烧正在由挥发份燃烧转向焦碳燃烧。

(4) 焦碳的表面燃烧 当挥发份燃烧完后, 此时燃料中的木质素已全部炭化, 煤也几乎全部焦化, 空气中的氧气充分接触到了焦碳的表面, 焦碳开始迅速燃烧, 出现第二个反应速度峰。DSC 曲线上在 402℃ 附近出现比第一个放热面积更大的放热峰。此后, 放热速率迅速下降, 反应减慢, 焦碳表面炙热火焰由红变暗, 直至消失。当温度升至 500℃ 时, 燃烧基本结束, 反应终止。焦碳燃烧阶段的失重速率稍低于挥发份析出和燃烧阶段的失重速率, 这是由于生物质先燃烧后产生的灰烬包裹着剩余的焦碳, 妨碍了氧气向焦碳表面的扩散, 使燃烧速率减慢的原因。所以, 在燃用生物质燃料的锅炉设计时应考虑捅火和通风对燃料燃烧速率的影响。

4.2 着火温度

着火温度的定义为在可燃混合物系统内, 化学反应可以自动加速而达到自然着火的最低温度。热重分析中着火温度的确定基本有三种。

(1) 根据国际热分析协会的测试结果, 有人认为, 煤在热天平中的着火温度可由微商热分析 DTA 曲线中吸热转变为放热的转折点的温度来定义。

(2) 着火温度由热重 TG 曲线与其基线的交点和 DTA 曲线由吸热到放热的转变点 (二者对应同一温度) 来同时确定。

(3) TG 曲线下降段切线与基线交点所对应的温度定义为着火温度。

本文采用第三种方法, 把 TG 曲线上发生明显失重的曲线段的切线与燃料脱水干燥后的平滑基线的交点所对应的温度定义为着火温度。该点可由计算机直接在 TG 曲线上做出, 并读出温度。经测得, 木屑的着火温度为 308.17℃, 先锋褐煤的着火温度为 353.89℃; 生物质加入量为 20% 和 40% 的复合煤着火温度分别为 345.93℃ 和 334.92℃。可见, 复合煤的着火点处于生物质和煤的着火点之间, 且生物质加入量越多着火点越低。一般地讲, 煤的着火点随着煤炭中挥发份的增高而降低, 由于生物质含有大量挥发份, 所以生物质的加入使复合煤的着火点降低。因此, 生物质复合煤的着火温度低, 锅炉点火时不用耗用大量木柴引火。

4.3 生物质复合煤的燃烧动力学分析

一般来说, 活化能及频率因子均能决定燃料的燃烧特性, 但目前有关生物质复合煤的燃烧过程还不完全清楚, 很难准确计算出复合煤的活化能和频率因子, 但进行一些近似计算获得相对比较值也是很有意义的。

把复合煤在燃烧过程中重量变化率对时间的导数近似定义为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E/RT}(1-\alpha)^n \quad (1)$$

$$\text{升温速率: } \varphi = dT/dt \quad (2)$$

试样重量变化率 α 可以由 TG 曲线求得:

$$\alpha = \frac{\Delta W}{\Delta W_{\infty}} = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_{\infty}} \quad (3)$$

$$\text{对 (1) 移项、积分得: } \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} dt = \frac{A}{\varphi} \int_{T_0}^T e^{-E/RT} dT \quad (4)$$

式中:

A——频率因子;

E——活化能;

W_0 ——初始重量;

W——时间 t 时的重量;

W_{∞} ——最大始失重的残余质量;

n——反应级数;

根据经验, 反应级数 n 应取 1^[4], 对 (4) 式积分整理得:

$$\ln[-\ln \frac{(1-\alpha)}{T^2}] = \ln[\frac{AR}{\varphi E}(1 - \frac{2RT}{E})] - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

令 $Y = \ln\{-\ln[(1-\alpha)/T^2]\}$, $a = \ln[\frac{AR}{\varphi E}(1 - \frac{2RT}{E})]$, 在本实验条件下 a 可视为常数;

$b = -E/R$, $x = 1/T$, 则有:

$$Y = a + bx \quad (6)$$

上式为一直线, b 为直线的斜率, a 为直线的截距; 在 TG 曲线上取一点, 根据该点的热参数可以求出对应的 Y 、 x 值, 如果多求几对 Y 、 x 的值, 便可作一直线, 该直线的斜率 b 、截距为 a , 根据 a 、 b 的值可以很容易的求出活化能 E 和频率因子 A 。具体计算结果见表 2。

表 2 几种燃料的燃烧动力学参数

燃料	温度范围/℃	a	b	频率因子/min ⁻¹	活化能/KJ.mol
木屑	242-347	-2.59	-1.03×10 ⁴	1.55×10 ⁶	85.68
	347-496	-47.70	-3.32×10 ⁴	1.80×10 ²⁶	276.32
40%木屑+60%先锋褐煤	249-350	-19.97	-1.21×10 ⁴	4.81×10 ¹³	100.61
煤	350-499	-29.00	-1.84×10 ⁴	7.80×10 ¹⁷	152.59
20%木屑+80%先锋褐煤	275-350	-27.01	-1.51×10 ⁴	8.74×10 ¹⁶	125.82
煤	350-500	-32.99	-2.13×10 ⁴	4.88×10 ¹⁹	177.08
先锋褐煤	324-499	-27.39	-2.02×10 ⁴	1.71×10 ¹⁷	168.25

4.4 几种燃料的燃烧特性比较

从木屑的燃烧特性曲线可以看出, 生物质燃烧明显地可分为两个主要阶段, 即热解产物燃烧和碳化产物燃烧, DSC 曲线上有两个清晰的放热峰, 第一个峰的峰值温度为 345.79℃, 第二个峰值温度为 479.83℃。而先锋褐煤的燃烧曲线上不能明显地区分出热解产物燃烧和碳化产物燃烧这两个阶段, 从 275℃热解开始, 到 500℃时反应终止, TG 曲线几乎是按同一速率单调递减; DSC 曲线只出现了一个放热峰, 峰值温度为 413.01℃, 第一个放热峰几乎看不到, 只表现为两个燃烧阶段的放热速率有差异。BCC 的燃烧特性曲线显然兼具二者各自的特点, 从 BCC 的燃烧曲线可以区分出热解产物燃烧和碳化产物燃烧这两个阶段, 和生物质一样, TG 曲线上有一个过渡阶段, 但没有生物质燃料那么明

显; BCC 的 DSC 曲线上有两个放热峰, 第一个峰在 350℃左右, 且复合煤中含生物质越多此峰的峰面积越大, 但仍小于生物质的第一个放热峰; 生物质复合煤的第二个放热峰在 401℃附近, 比生物质的第二个放热峰和煤的放热峰都有所提前。根据 TG 曲线, 可以计算出, 木屑燃尽率为 98.15%, 煤的为 94.50%, 含生物质 40%和 20%的 BCC 的燃尽率分别为 96.04%和 95.93%。因此, 从生物质复合煤的燃烧曲线中可以明显地找到生物质和煤单独燃烧时的燃烧特性, 但都相应地发生了变化, 说明 BCC 在燃烧过程中, 煤和生物质之间发生了一定的协同作用。

此外, BCC 还具有固硫率高、烟尘排放量小等优点^[5, 6]。

5 结论

(1) 生物质复合煤(BCC)的燃烧过程可以分为干燥脱水、挥发份析出燃烧、过渡阶段、焦炭表面燃烧四个阶段。

(2) 生物质复合煤(BCC)的燃烧性能比煤有所改善, 具有易点火、燃尽率高、燃烧效率高等优点。

(3) 生物质复合煤(BCC)的燃烧反应服从燃烧动力学的基本表征方程的规律, 可以用 $(d\alpha)/(dT) = Ae^{-E/RT}(1-\alpha)^n$ 来求算燃烧过程的动力学参数, 并可用一级反应来描述。

参考文献

- [1] 生物质热解、加氢热解及其与煤共热解的热重研究, 李文、李保庆、孙成功等, *燃料化学学报*, 1996, 24 (4), 341-347.
- [2] 中国生物质气化技术的发展前景, 徐冰燕、吴创之、罗曾凡等, *太阳能学报*, Special Issue, Oct. 1999, 162-167.
- [3] 垃圾再生资源化研究现状及应用前景. 刘惠永、廖洪强、孙俊民等, *新能源*, 2000, 22 (4), 31-35.
- [4] 混合垃圾在热重分析仪中的燃烧特性分析, 姜凡、江淑琴、潘忠刚等, *新能源*, 2000, 22 (6), 5-9.
- [5] 生物质型煤固硫规律的研究, 刘伟军、孙庆滨等, *动力工程*, Vol.1999, 19 (5), 410-413.
- [6] Effects on SO_x and NO_x Emissions by Co-Firing Straw and Pulverized Coal, L. S. Pedersen, D. J. Morgan, W. L. Van de Kamp, et.al. *Energy & Fuels* 1997, 11 (2), 439-446.

INVESTIGATION ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF BIOMASS COMPOUND COAL (BCC)

HE Fang WANG Hua MA Wenhui YAO Gang HU Jianhang
(Institute of Environment-Harmonious Energy New Technology,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract: A new kind of clean fuel, biomass compound coal (BCC), was developed from Xianfeng lignite in combination with biomass such as agricultural residues, forest producing wastes, municipal solid wastes (MSW). Experiments were carried out by increasing the temperature from 20 to 700℃ with a heating rate of 10℃/min and at atmosphere pressure. Biomass fractions of 0wt%, 20wt%, 40wt%, 50wt%, 100wt% were used in the experiments. Based on simultaneous thermal analysis, STA, the combustion process of BCC can be broadly separated into four stages: dehumidification, devolatilization and combustion of volatile matter, co-combustion of volatile matter and char, combustion of char. The experiment results indicate that BCC has some better combustion characteristics comparing with the Xianfeng lignite and the biomass individually. It is revealed that BCC has a low ignition point, low ash content and good sulfur fixation quality. The combustion kinetic parameters of BCC combustion process are tested. It is suggested that the kinetic analysis in combustion of BCC can be handled with the first order reaction.

Keywords: biomass compound coal (BCC), thermogravimetric analysis, combustion characteristics, kinetics