

# 中国工程热物理学会

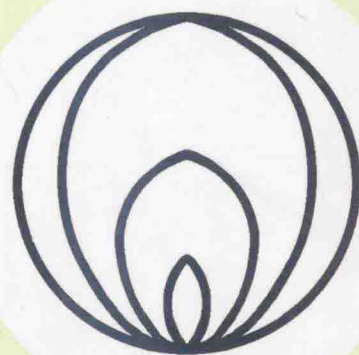
燃烧学学术会议

论文集（上册）

二〇〇六

武汉

中国工程热物理学会编



## 燃烧学学术会议论文集(上册) 目录

### 一. 燃料及可燃物的燃烧特性

- 064001 生物质与富钒石煤混烧及钒的迁移特性实验研究.....  
.....范晓旭 那永洁 矫维红 贺 军 賁小银 吕清刚(1)
- 064002 不同辐射通量下浸没在多孔介质中液体燃料燃烧特性的实验研究.....  
.....陈晓婷 孔文俊 王宝瑞(8)
- 064003 低压下导线绝缘层着火先期征兆研究.....  
.....孔文俊 陈丽芬 王宝瑞 劳世奇 辛 喆(16)
- 064013 乙烯裂解炉燃烧特性的研究.....韩云龙 章名耀 肖 睿(22)
- 064015 西藏高原环境下国家标准火 SH4 燃烧特性的实验研究.....  
.....于春雨 张永明 刘 勇 刘申友 刘炳海 王进军(28)
- 064017 利用同步辐射研究汽油及其混合物的火焰成分特征.....姚春德 李 簪  
.....李 琦 黄超群 卫立夏 王 晶 田振玉 李玉阳 齐 飞(35)
- 064040 电站锅炉煤质燃烧特性的研究.....宋启磊 肖 睿 李延兵 邓中乙(45)
- 064048 甲烷对冲扩散火焰 NO<sub>x</sub> 生成特性研究.....  
.....曹玉春 吴金星 马新灵 王保东 魏新利(51)
- 064049 煤油氧气脉冲爆震火箭发动机爆震特性.....  
.....李 强 范 玮 严传俊 胡承启 李建玲(59)
- 064067 上升热流下木材表面及内部温度的研究.....  
.....杨立中 周宇鹏 郭再富 邓志华(65)
- 064089 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 还原 NO<sub>x</sub> 的表观动力学特性研究.....  
.....张忠孝 陶晓华 陈国艳 周 托 陈 龙(70)
- 064100 DME 浓度对 DME/LPG 混合燃料 HCCI 燃烧的影响.....罗马吉 黄 震(75)
- 064105 不同氧浓度下稻壳燃烧特性的实验研究.....  
.....王恩禄 金小峰 徐旭常 章明川 陈开潮(80)
- 064125 包覆药等离子体点火特性的实验研究.....杨春霞 栗保明(86)
- 064141 水处理污泥燃烧过程中孔隙变化过程研究.....  
.....李培生 胡 益 李 洁 向 军 孙路石 胡 松 熊友辉 孙学信(90)
- 064155 基于缸内直喷的汽油 HCCI 燃烧特性的研究.....王建昕 帅石金 王 志(95)
- 064161 生物质种类与气化参数对焦油和气化气热值的影响.....  
.....董长青 杨勇平 张俊姣 段立强 徐二树 金保升(102)
- 064163 微型燃气轮机燃烧室进气温度对燃烧特性影响的实验研究.....  
.....汪凤山 孔文俊 王宝瑞 劳世奇 张培元(109)
- 064166 湿空气燃烧的研究进展.....张哲巖 王 岳 肖云汉(116)

### 二. 煤的燃烧技术

- 064018 流化床煤气化-熔融焚烧飞灰试验研究.....  
.....王学涛 金保升 仲兆平 徐 斌 吴 健(122)
- 064044 微细煤焦再燃还原 NO 的反应动力学机制.....  
.....刘 忠 闫维平 赵 莉 宋 蕾 姚 强(129)
- 064047 激光感生击穿煤粉的等离子体特性研究.....  
.....谢承利 陆继东 李 捷 陈 文 余亮英 李 娉 刘 彦(136)

|        |                                                              |  |
|--------|--------------------------------------------------------------|--|
| 064051 | 甲烷浓度对煤热解过程中碳氢组分分析出规律的影响.....                                 |  |
|        | .....索 娅 张建民 连 辉 康利荣 高梅杉(143)                                |  |
| 064052 | GC-TG 联用研究高温下甲烷在煤焦表面的积碳特性.....                               |  |
|        | .....连 辉 张建民 索 娅 康利荣 罗 鸣(149)                                |  |
| 064055 | O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 煤粉燃烧时矿物质的转变和细灰颗粒的生成特性.....   |  |
|        | .....盛昌栋 吕玉红 李 意(156)                                        |  |
| 064061 | 煤焦孔隙结构的影响因素研究.....                                           |  |
|        | .....曹 倩 徐明厚 姚 洪 于敦喜 俞 云(163)                                |  |
| 054062 | 利用 CCSEM 对煤中矿物特性及其燃烧转化行为的研究...于敦喜 徐明厚                        |  |
|        | .....Lian Zhang 姚 洪 刘小伟 Qunying Wang Yoshihiko Ninomiya(170) |  |
| 064064 | 多媒种燃烧过程中超微米颗粒物特性的比较分析.....                                   |  |
|        | .....刘小伟 徐明厚 姚 洪 于敦喜 高翔鹏 曹 倩 蔡筱敏(178)                        |  |
| 064065 | 运行工况对燃煤锅炉 PM <sub>10</sub> 排放特性影响的试验研究.....                  |  |
|        | .....高翔鹏 徐明厚 姚 洪 隋建才 郝 炜 赵 锋(185)                            |  |
| 064078 | 煤颗粒热膨胀量与破碎特性的研究.....                                         |  |
|        | .....姚 海 傅培舫 周怀春 余 娜 马启磊(191)                                |  |
| 064079 | 煤粉燃烧 SCT 模型氧气可达比表面积的实验研究.....                                |  |
|        | .....余 娜 傅培舫 周怀春(198)                                        |  |
| 064080 | 煤粉燃烧过程中相转变点的小波识别.....汪华剑 傅培舫 周怀春(205)                        |  |
| 064090 | 煤粉燃烧碳氢组分转化机理的模拟研究.....                                       |  |
|        | .....樊俊杰 金 晶 张建民 代纪邦(211)                                    |  |
| 064091 | 再燃条件下燃料燃尽特性的试验研究.....                                        |  |
|        | .....代纪邦 金 晶 樊俊杰 李 立 李珊珊(216)                                |  |
| 064097 | 典型煤种热解、燃烧、二氧化碳气化实验研究.....                                    |  |
|        | .....陈 伟 向 军 石金明 赵清森(220)                                    |  |
| 064108 | 铝基矿物在钙基固硫过程中的固相反应机理分析.....                                   |  |
|        | .....刘 豪 邱建荣 孔凡海 谢峻林 曾汉才 成 斌 谢长生(226)                        |  |
| 064122 | 煤焦燃烧过程中的亚观和微观形态与反应机理.....                                    |  |
|        | .....傅培舫 周怀春 方庆艳 姚 海(231)                                    |  |
| 064124 | 煤中汞、矿物、灰分的相关性研究.....                                         |  |
|        | .....张 成 陈 刚 杨 婷 吕国庆 徐政和(240)                                |  |
| 064127 | 煤粉再燃对 600 MW 锅炉 NO <sub>x</sub> 排放的影响.....                   |  |
|        | .....邱朋华 刘 辉 吴少华 孙绍增 杨龙滨 王国忠(246)                            |  |
| 064128 | 粒度对元宝山褐煤热解影响的热重分析.....                                       |  |
|        | .....刘 辉 邱朋华 朱群益 吴少华 秦裕琨(253)                                |  |
| 064133 | 燃煤电站锅炉高温腐蚀机理探讨.....                                          |  |
|        | .....高 全 张军营 丘纪华 赵永椿 郑楚光(258)                                |  |
| 064134 | 煤热解不同形态氮转化特征的研究.....                                         |  |
|        | .....干宗华 张军营 何北惠 邹红果 赵永椿 郑楚光(266)                            |  |
| 064135 | 燃煤超细颗粒物团聚絮凝机理研究.....                                         |  |
|        | .....张军营 赵永椿 陈 俊 魏 凤 郑楚光(272)                                |  |
| 064136 | 燃煤黄铁矿迁移转化模拟的研究.....                                          |  |
|        | .....赵永椿 张军营 李 扬 高 全 郑楚光(278)                                |  |

|                    |                                             |                         |
|--------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| 064154             | 水煤浆燃烧小颗粒排放规律的试验研究.....                      | 张光学 刘建忠 周俊虎 叶琳 岑可法(284) |
| 064156             | 氧气浓度对煤粉燃烧动力学参数影响规律的研究.....                  | 马启磊 傅培舫 周怀春(290)        |
| <b>三. 燃烧过程数值计算</b> |                                             |                         |
| 064010             | 湍流燃烧模型对合成气燃烧室模拟结果的影响.....                   | 崔玉峰 徐纲 聂超群 黄伟光(296)     |
| 064020             | 燃烧烟气汞反应的量子化学计算方法研究.....                     | 刘晶 郑楚光 邱建荣 陆继东(305)     |
| 064024             | 船用增压锅炉燃烧系统的数值模拟.....                        | 彭泽均 姜任秋 李彦军(310)        |
| 064029             | 移动火焰锋面(MFF)模型火焰锋面确定条件的进一步改进.....            | 张健 章明川 丁娟 齐永锋 林郁郁(315)  |
| 064032             | 湍流燃烧模型对直喷柴油机火焰 Lift-off 长度和燃烧特性预测的影响研究..... | 虞育松 李国岫 孙晶晶 徐宇工(321)    |
| 064034             | 压入式巷道通风中瓦斯稀释行为.....                         | 由长福 徐旭常(328)            |
| 064035             | 压入式与抽吸式通风过程中瓦斯浓度变化过程对比分析.....               | 由长福 徐旭常(333)            |
| 064036             | 数值研究湍流结构对两相流场中颗粒团聚的影响.....                  | 王永康 石磊 刘向军(338)         |
| 064041             | 多工况下 220 t/h 四角切圆锅炉数值模拟.....                | 邓中乙 肖睿 金保升 李延兵(346)     |
| 064043             | 回转窑内生物质高温空气燃烧 NO <sub>x</sub> 生成模型与验证.....  | 楼波 罗玉和 马晓茜 蔡睿贤(352)     |
| 064045             | 开式旋流预混燃烧的数值模拟.....                          | 殷亮(360)                 |
| 064056             | 超细颗粒在交变电场中团聚过程的数值模拟...公利平 盛昌栋 沈湘林(367)      |                         |
| 064063             | 基于自适应方法的 Sn/O/H/N/C/Cl 反应机理简化.....          | 乔瑜 徐明厚 姚洪 王臣(373)       |
| 064068             | 超声速气流中脉冲正爆震波起爆详细化学动力学数值模拟.....              | 李牧 严传俊(380)             |
| 064069             | 部分充填下脉冲爆震发动机的热力循环性能分析.....                  | 邱华 严传俊 熊姹(388)          |
| 064070             | 实心与空心锥形喷雾与热多孔介质相互作用的数值研究.....               | 赵治国 解茂昭(396)            |
| 064071             | 聚氨酯泡沫反向阴燃的数值模拟.....                         | 贾宝山 解茂昭(402)            |
| 064087             | 电站锅炉炉内 NO <sub>x</sub> 生成特性研究.....          | 安恩科 丁娟 宋谦 史萌(408)       |
| 064092             | 里克管声学特性数值研究.....                            | 钟英杰 张国俊 张雪梅 徐璋 任建莉(414) |
| 064096             | 中庭火灾围护结构温度场的动态特性.....                       | 张小英(422)                |
| 064098             | $k-\epsilon$ 湍流模型可压缩性修正在超音速混合层中的应用研究.....   | 韩省思 叶桃红 朱旻明 陈义良(430)    |
| 064099             | U-RANS/PDF 方法计算钝体火焰驻定器后漩涡脱落.....            | 朱旻明 陈义良 叶桃红 韩省思 陈辉(436) |
| 064103             | 基于详细化学反应机理的 DME 发动机三维湍流燃烧模拟.....            | 莫春兰 张煜盛 张辉亚 徐波(442)     |

|                                                                                  |                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 064104 DME 直喷式发动机滞燃期的光电检测与数值模拟研究.....                                            | 戈 锐 张煜盛 张 鹏 周光明(448)               |
| 054111 多孔介质内火焰传播与稳定机理的研究.....                                                    | 赵平辉 陈义良 姜 海 张根烜 丁 敏(456)           |
| 064114 涡喷加力燃烧室湍流燃烧数值模拟.....                                                      | 叶桃红 洪家荣 陈义良(463)                   |
| 064115 可燃制冷剂泄漏燃烧的数值与实验研究.....                                                    | 邸倩倩 吴晋湘 王恩宇(470)                   |
| 064120 不同重力下薄燃料表面火焰传播的相似性.....                                                   | 张 夏 胡文瑞(476)                       |
| 064129 不同燃料空气供给条件对声学驱动不稳定燃烧影响的研究.....                                            | 李祥晟 丰镇平(483)                       |
| 064130 湍流场中被动标量的细微结构.....                                                        | 王子国 柳朝晖 刘亚明 贺 铸 郑楚光(489)           |
| 064131 煤气化固碳一体化的热力学研究.....                                                       | 潘 霞 张军营 徐 俊 王志亮 郑楚光(495)           |
| 064138 大型地下车库火灾情景及消防措施的研究.....                                                   | 张晓鸽 郭印诚(502)                       |
| 064139 扩散燃烧大涡模拟中 Lewis 数对结果的影响研究.....                                            | 杨武兵 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪(510)           |
| 064140 湍流燃烧中放热对湍流的影响机制研究.....                                                    | 杨武兵 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪(515)           |
| 064146 颗粒增强湍流的模型和气固流动的湍流变动.....                                                  | 周力行 曾卓雄 张 健(521)                   |
| 064147 等温反应流动直接模拟与亚网格模型检验.....                                                   | 王 方 许春晓 周力行(527)                   |
| 064148 丙烷-空气旋流扩散燃烧的 LES- EBU 和 RANS-SOM 模拟的比较.....                               | 王文丽 周力行 李荣先(532)                   |
| 064152 丙烷/空气预混在堆积床内燃烧特性的实验研究与数值模拟.....                                           | 姜 海 赵平辉 张根烜 陈义良 刘明侯(537)           |
| 064153 管内层流火焰传播中的 Lewis 数影响.....                                                 | 丁 敏 陈义良 赵平辉(544)                   |
| 064159 旋流扩散火焰结构的大涡模拟.....                                                        | 胡琢元 罗永浩 周力行(550)                   |
| 064162 单管式微型燃气轮机燃烧室流场全尺寸数值模拟.....                                                | 王宝瑞 汪凤山 孔文俊(557)                   |
| 064165 合成气稀释对冲扩散火焰的数值研究.....                                                     | 惠 鑫 王 岳 张哲巛 肖云汉(565)               |
| 064167 中和颗粒可压缩性颗粒层模型.....                                                        | 龙正伟 姚 强 黄 斌 宋 蕾(574)               |
| 064169 燃煤烟气降温过程汞的均相化学反应动力学模拟.....                                                | 陈 雷 姚 强 褚玉群 赵香龙(580)               |
| 064171 固体氧化物直接碳燃料电池的模型计算.....                                                    | 赵欣宇 李水清 赵香龙 姚 强(589)               |
| 064175 气固稀相流中颗粒沉积和团聚的分子动力学模型.....                                                | 李水清 J.S.Marshall A.Ratner 姚 强(595) |
| 064176 凹腔结构超燃冲压发动机燃烧室数值模拟.....                                                   | 陈 方 张新宇(603)                       |
| 064180 热重分析过程中 DTG 曲线多峰现象研究.....                                                 | 唐君实 宋 蕾 何百磊 姚 强(611)               |
| 064187 气体 NO/SO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 等离子体反应机理及动力学分析..... | 李婷婷 王心亮 魏冬香 魏燕丽 顾 璠(616)           |

# 生物质与富钒石煤混烧及钒的迁移特性实验研究

范晓旭<sup>1</sup>, 那永洁<sup>2</sup>, 矫维红<sup>2</sup>, 贺军<sup>2</sup>, 负小银<sup>2</sup>, 吕清刚<sup>2</sup>

1. 中国科学院 研究生院 北京 10080

电话 010-62538778 E-mail: fanxiaoxu@cfb.etp.ac.cn

2. 中国科学院 工程热物理研究所 北京 10080

**摘要** 针对石煤富钒的特点, 利用实验室规模的循环流化床燃烧装置, 进行了生物质与富钒石煤的混烧实验以及炉内脱硫的实验研究, 以期通过富集钒和回收热量达到资源综合利用的目的。实验结果表明: 所实验的富钒石煤容易着火, 燃烧稳定, 燃尽性好, 包括与生物质混烧是如此; 经过燃烧后, 石煤中的钒大部分转换为五氧化二钒, 并在灰渣中富集; 石煤颗粒尺度大小、燃烧温度对钒的迁移特性没有显著影响; 通过向炉内加入石灰石进行炉内脱硫, 当 Ca/S 摩尔比为 3 时, 烟气中的二氧化硫排放浓度低于国标。

**关键词** 富钒石煤; 循环流化床; 生物质; 混烧; 钒迁移

## 1 前言

富钒石煤是一种矿物资源, 也是一种低热值燃料, 单独采用石煤作为锅炉燃料并不经济<sup>[1]</sup>, 从富钒石煤提取钒是综合开发石煤资源的一个重要方面<sup>[2]</sup>。如果能够将石煤燃烧热回收与钒的富集起来, 就能够实现资源的综合利用, 因此有必要研究石煤的燃烧特性和钒的迁移特性。此外, 如果将石煤产区的生物质燃烧作为辅助燃料, 可提高混合燃料热值, 因此提高整个技术经济性, 不但具有理论研究价值, 而且具有实际应用意义。

循环流化床燃烧技术具有很强的燃料适应性和很好的环保特性<sup>[3,4,5]</sup>, 通常工作在 850~900℃, 床内温度分布均匀, 底渣和飞灰便于综合利用。采用循环流化床燃烧方式, 在燃烧过程中将石煤中不易提取的低价钒转变成容易提取的高价钒, 目前国内外虽然对循环流化床石煤燃烧技术已经做了一些研究<sup>[6,7]</sup>, 并得到了一些石煤燃烧以及提取钒的经验, 但是缺乏全面研究其燃烧特性和钒迁移特性。本实验的目的是, 在实验室尺度的循环流化床燃烧装置上进行不同比例的生物质、石煤混烧实验, 综合研究混烧特性、排放特性和钒的迁移特性等。

## 2 实验

### 2.1 实验装置与实验方法

生物质、石煤和煤的混烧实验是 0.2 MWt 循环流化床燃烧实验台上完成的。这个实验台(如图 1 所示)的炉膛高度为 6000 mm, 内径为 300 mm, 外部保温, 流化风全部从炉膛底部的布风板加入炉膛, 详细描述参见文献<sup>[8]</sup>。

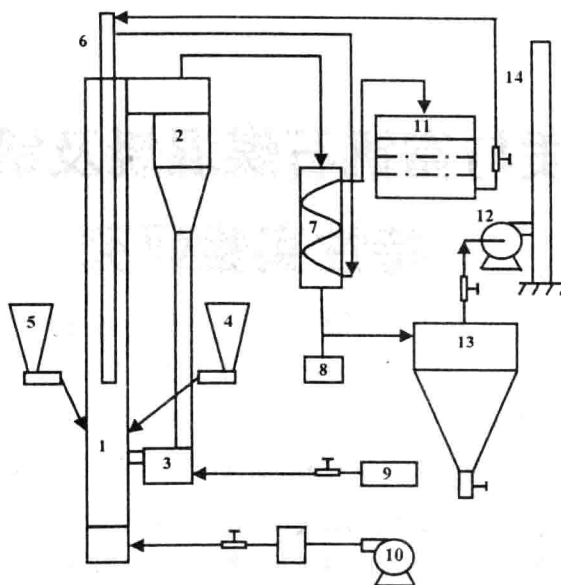


图 1 0.2MWt 循环流化床燃烧实验台示意图

1—炉膛, 2—旋风分离器, 3—返料器, 4—料斗 1, 5—料斗 2, 6—冷却水管, 7—烟气冷却器, 8—烟气取样点, 9—空气压缩机, 10—一次风机, 11—冷却水箱, 12—引风机, 13—布袋除尘器, 14—烟囱

石煤燃烧的脱硫实验是在 0.02 MWt 循环流化床燃烧实验台 (如图 2 所示) 上完成的。这个实验台的结构与 0.2 MWt 循环流化床燃烧实验台的相同, 只是尺寸不同, 炉膛横截面的内径为 100 mm, 高为 3000 mm。

0.02 MWt 循环流化床燃烧实验台的辅助系统包括给料系统、供风和排烟系统、冷却系统、烟气分析系统和测量系统等。一次风和返料风都由空气压缩机提供, 一次风经过预热后进入炉膛。在进行脱硫实验时, 石灰石按设定  $\text{Ca/S}$  摩尔比均匀掺混在石煤中, 由螺旋给料机加入炉膛。烟气取样探头位于布袋除尘器后, 与在线烟气成分分析仪相连, 烟气中  $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  等的浓度由计算机实时检测和记录。烟气中飞灰的样品取自布袋除尘器底部的排灰口, 底渣取自炉膛底部的排渣口。

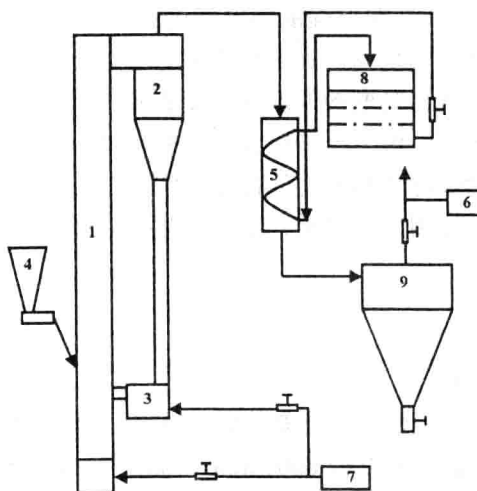




图2 0.02 MWt 循环流化床燃烧实验台示意图

1—炉膛, 2—旋风分离器, 3—返料器, 4—煤斗, 5—烟气冷却器, 6—烟气取样点,  
7—空气压缩机, 8—冷却水箱, 9—布袋除尘器

本文中烟气排放浓度为时间均值, 已换算到标准状态(过量空气系数 1.4, 干燥)。石煤中的钒含量是先反应生成  $V_2O_5$  再分析的, 飞灰和底渣的钒含量是直接分析其中的  $V_2O_5$  含量而得出的。

对不同石煤比例(石煤占混合燃料的质量比例)的混合燃料、炉膛温度、石煤粒径进行了系列实验, 并按照不同的 Ca/S 摩尔比对石煤单独燃烧进行了脱硫实验。在实验过程中, 控制炉膛温度为设定温度, 对其进行调节和控制。为了保证炉膛内床料能够被石煤灰渣充分置换, 每个实验工况都持续了 4 个小时, 飞灰和底渣的取样都取自工况结束前 1 小时内。

## 2.2 燃料特性

实验所用的石煤产自湖南安化, 有 2 种粒径: 一种粒径小于 4 mm, 50%切割粒径约为 0.59 mm; 另一种粒径小于 8 mm, 50%切割粒径约为 3.3 mm。作为辅助燃料的无烟煤粒径小于 4 mm, 50%切割粒径约为 0.31 mm。生物质燃料有木屑和稻秆, 工业分析和元素分析见表 1。石煤的灰分为 72.2%, 低位发热量为 6.38 MJ/kg。木屑和稻秆中的硫含量分别为 0.03% 和 0.04%, 比石煤中的硫含量 2.7% 低很多。石煤中钒的含量为 4625  $\mu\text{g/g}$  (收到基), 远高于无烟煤中的钒含量 74  $\mu\text{g/g}$  (收到基)。

表 1 石煤、无烟煤、木屑和稻秆的工业分析和元素分析

| 项目        | 单位    | 石煤    | 无烟煤   | 木屑    | 稻秆    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 元素分析(收到基) |       |       |       |       |       |
| 碳         | %     | 19.03 | 76.53 | 46.2  | 34.59 |
| 氢         | %     | 0.4   | 2.98  | 5.25  | 4.38  |
| 氧         | %     | 0.59  | 3.31  | 39.47 | 29.8  |
| 硫         | %     | 2.7   | 1.31  | 0.03  | 0.04  |
| 氮         | %     | 0.28  | 0.84  | 0.43  | 1.08  |
| 工业分析(收到基) |       |       |       |       |       |
| 水分        | %     | 4.8   | 5.2   | 7.72  | 11.76 |
| 灰分        | %     | 72.21 | 9.82  | 0.9   | 13.37 |
| 挥发分       | %     | 3.44  | 6.97  | 78.68 | 65.63 |
| 固定碳       | %     | 19.55 | 78.01 | 12.71 | 9.24  |
| 低位发热量     | MJ/kg | 6.38  | 29.59 | 18.24 | 14.16 |

## 3. 实验结果与讨论

### 3.1 石煤的混烧特性

石煤含有 72.2% 的灰分, 挥发分含量仅为 3.4%, 但是在循环流化床中的着火特性很好, 可以直接由热烟气点燃启动; 进入工况后能够稳定的燃烧, 可以方便控制炉膛温度。这二点与普通无烟煤相差很大。图 3 为典型的石煤点火启动温度曲线。



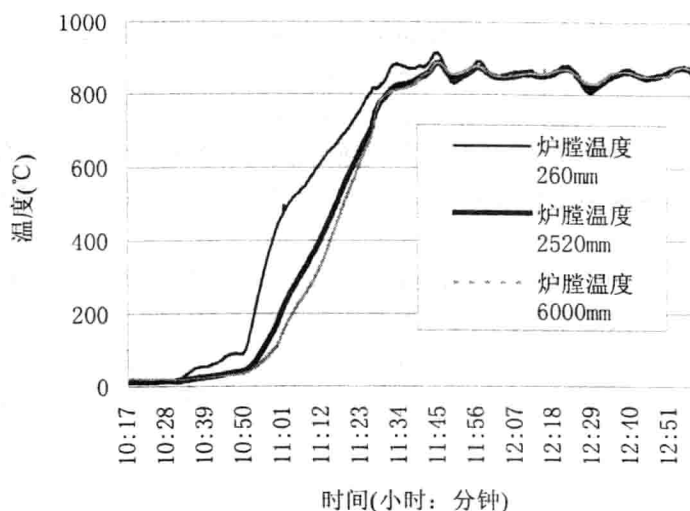


图3 典型的石煤点火启动温度曲线

沿炉膛高度温度分布的典型情况见图4。可以看出,无论石煤单独燃烧,还是与其它燃料混烧,温度沿炉膛高度分布非常均匀。主要原因是炉膛内灰浓度很高,而且石煤的燃烧活性并不低。均匀的炉膛温度为石煤在炉内充分燃烧以及钒由低价态转变成高价态提供了良好的反应条件。

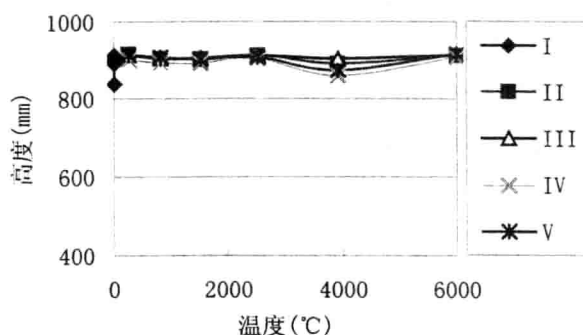


图4 炉膛温度分布图

(I: 100%石煤; II:85%石煤+15%无烟煤; III:70%石煤+30%木屑;

IV:65%石煤+20%木屑+15%稻秆; V: 70%石煤+8%无烟煤+12%木屑+10%稻秆)

除掺烧无烟煤工况外,其他工况的飞灰含碳量都在6%以下;所有工况的底渣含碳量都小于1.6%。这说明利用循环流化床混烧石煤可以保持很高的燃烧效率。

### 3.2 烟气排放特性

石煤单独燃烧、Ca/S 摩尔比为 2 和 3 的脱硫实验工况中,  $\text{NO}_x$  排放浓度分别为  $699 \text{ mg/m}^3$ 、 $752 \text{ mg/m}^3$  和  $771 \text{ mg/m}^3$ , 略高于国家排放限制标准<sup>[9]</sup> ( $650 \text{ mg/m}^3$ )。  $\text{NO}_x$  排放浓度偏高的主要原因是本实验台没有将空气分级供入。

由于石煤中硫含量较高,在没有加入石灰石的实验工况,烟气中二氧化硫的排放浓度都超标,在单独燃烧石煤的工况,烟气中二氧化硫浓度更是高达  $12.6 \text{ g/m}^3$ , 远高于国家排放限制标准<sup>[9]</sup>  $800 \text{ mg/m}^3$ 。对单独燃烧石煤进行了脱硫实验,脱硫效率曲线见图5(以纯

烧石煤的  $\text{SO}_2$  浓度为原始排放浓度)。随着  $\text{Ca/S}$  摩尔比的上升, 脱硫效率逐渐增大; 但在  $\text{Ca/S}$  摩尔比由 3 变为 4 的过程中, 脱硫效率增加不大。在  $\text{Ca/S}$  摩尔比是 3 时, 烟气中  $\text{SO}_2$  的浓度为  $510 \text{ mg/m}^3$ , 满足排放要求。

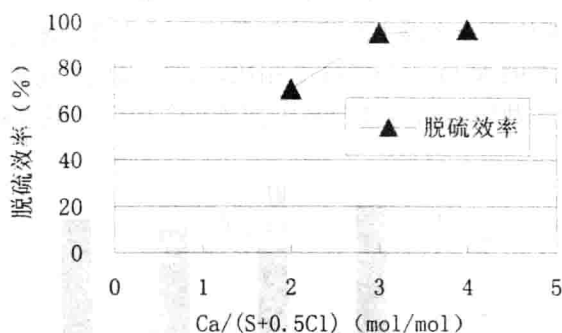


图 5 脱硫效率图

### 3.3 石煤中钒的迁移特性

钒的迁移特性是指石煤中低价钒转化成高价钒的比例以及钒在飞灰和底渣中的分布等。在所有混烧粒径  $0\sim 4 \text{ mm}$  的石煤颗粒的工况中, 石煤中的钒大部分 (70%) 都转化为高价钒: 五氧化二钒。虽然飞灰的钒含量达到  $0.7\sim 0.8\%$  左右, 但是飞灰只占总灰量的 30% 左右; 尽管底渣的钒含量低, 但是底渣却占总灰量的 70% 左右, 综合结果是飞灰和底渣中钒的总量相当。

飞灰中钒含量较高的现象与 Sang-Rin<sup>[10]</sup>和 Wu, C.Y.等人<sup>[11]</sup>的研究结果类似。原因可能是石煤中的钒在高温和氧化性气氛下反应生成  $\text{V}_2\text{O}_5$ 、蒸发并随着烟气离开炉膛, 在烟气管道中随着温度降低,  $\text{V}_2\text{O}_5$  冷凝后附着在飞灰上, 导致底渣中钒含量低、飞灰中钒含量高的结果。

飞灰和底渣中钒含量与炉膛温度的关系见图 6。从图 6 可以看出, 在燃烧温度处于  $850\sim 950^\circ\text{C}$  的范围内, 尽管混合燃料中石煤的比例不同, 燃烧温度的变化对飞灰和底渣中钒含量的影响较小。

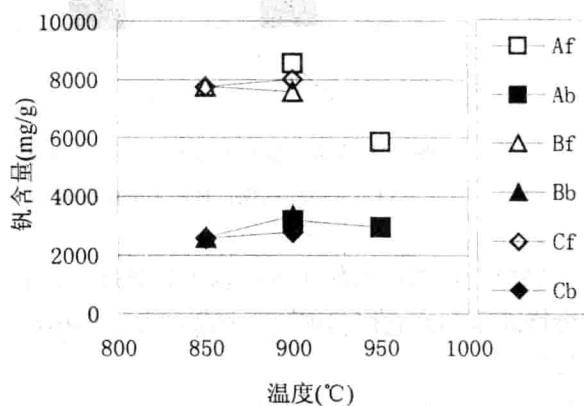


图 6 飞灰和底渣中的钒含量与炉膛温度关系

(A: 100%石煤, B: 70%石煤+30%木屑, C: 65%石煤+20%木屑+15%稻秆;  
f: 飞灰, b: 底渣)

飞灰和底渣中钒含量与混合燃料的种类的关系见图 7。I、II、III、IV 和 V 这 5 个工况，炉膛温度都为 900℃。在单独烧石煤的工况 I 中，飞灰中的钒含量最高；在石煤和无烟煤混烧的工况 II 中，飞灰中的钒含量最低，原因可能是飞灰未燃尽碳含量太高（16%），含碳量高一方面稀释了飞灰中金属钒含量，另一方面也说明燃尽性不是很好，可能因局部 CO 含量高，影响低价钒在高温下与氧接触和混合，造成一部分石煤中的钒在高温下没有完全被焙烧成高价态的  $V_2O_5$ 。与工况 I 相比，石煤掺烧生物质的工况 III、IV，飞灰的钒含量没有明显减少，数值上略有减少是生物质灰的稀释作用造成的。

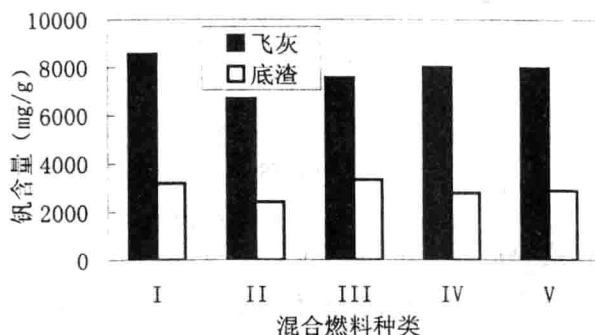


图 7 灰渣中钒含量与混合燃料种类关系

（工况 I、II、III、IV 和 V 含义与图 4 相同）

从图 8 中可以看出，石煤颗粒的大小对飞灰和底渣中钒含量影响较小。只是工况 B 中底渣的钒含量更低，可能是由于底渣颗粒变粗，发生反应的比表面积变小，导致燃烧不完全所致。

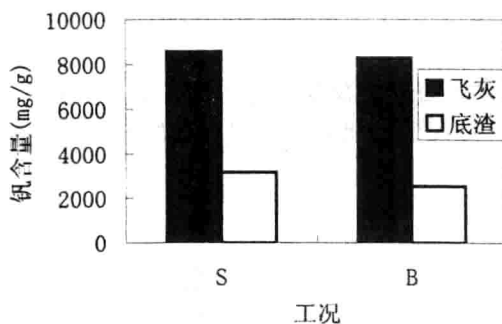


图 8 灰渣钒含量与石煤颗粒大小的关系

（S:0~4 mm 石煤；B:0~8 mm 石煤）

### 3.3 结论

- (1) 石煤很容易着火燃烧，在循环流化床内可以单独燃烧，炉膛温度可以调节控制。
- (2) 无论石煤单独燃烧还是和其它燃料混烧，都能够满足燃烧稳定性的要求，炉膛温度沿炉膛高度分布均匀。
- (3) 在没有添加石灰石的情况下， $SO_2$  排放浓度超标；采用石灰石作为脱硫剂直接加入炉膛而且 Ca/S 摩尔比大于 3 时，烟气中  $SO_2$  排放浓度低于国家排放标准；除单独燃烧石煤的工况中  $NO_x$  排放浓度略微超标外，其余工况的  $NO_x$  排放浓度均不超标。

- (4) 飞灰中钒含量为 0.7~0.8%左右; 石煤颗粒尺度大小、混烧比例、温度对钒的迁移及分布没有显著影响; 混烧燃料种类的变化也对灰渣中钒含量的影响不大; 但是无烟煤的掺入会显著影响灰渣中  $V_2O_5$  的生成。

致谢: 感谢海粤能源资源发展有限公司为本实验提供了石煤、无烟煤和稻秆。

#### 参考文献

- 
- [1]施正伦, 骆仲决等, 石煤流化床燃烧重金属排放特性实验研究, 煤炭学报, 2001, 26(2).
- [2]岑可法等, 循环流化床理论与设计运行, 中国电力出版社, 1998
- [3]Tsai, M. Y., K. T. Wu, C. C. Huang. Co-firing of paper mill sludge and coal in an industrial circulating fluidized bed boiler. Waste Management [J]. 2002, 22: 439-442
- [4] Lu Qinggang, et al. Preliminary experiments of co-firing of wet sewage sludge and coal or sawdust in circulating fluidized bed [C].
- [5]L. S. Jouko, I. K. Esko and V. Tuomas, The ash formation during co-combustion of wood and sludge in industrial fluidized bed boilers. Fuel Processing Technology [J], 1998, 54: 79-94.
- [6]张志宝、彭涛等, 石煤专烧型 35 t/h 内循环流化床锅炉结构特点和运行分析, 电站系统工程, 2000, 16(1), 15-22
- [7] 康齐福, 岑可法等, 石煤沸腾自热钠化焙烧五氧化二钒  $V_2O_5$  的热工实验, 浙江大学学报, 1978 No.4:1-30
- [8] 吕清刚 等, 城市垃圾与煤在 CFBC 实验台上的混烧实验, 工程热物理学报, 2003,24(2): 347
- [9]火电厂大气污染物排放的国家标准 (《火电厂大气污染物排放标准》(排放限值) GB 113223-2003, 20040101 执行)
- [10]Sang-Rin Lee, Chang-Yu Wu, Study of vanadium emission control in combustion systems by thermodynamic equilibrium analyses, Advances in Environmental Research, 2002, 12(3):1-10
- [11]Wu, C.Y., Biswas, P., 2000. Lead species aerosol formation and growth in multicomponent high temperature environments. Environ. Eng. Sci. 17(1), 41-60.

# 不同辐射通量下浸没在多孔介质中液体燃料燃烧特性的实验研究\*

陈晓婷<sup>1,2</sup> 孔文俊<sup>1</sup> 王宝瑞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039

联系电话: 010-62561434, Email: wjkong@mail.etp.ac.cn

## 1 前言

浸没在多孔介质中的液体燃料燃烧是一类特殊的燃烧现象。它常常发生在燃料泄漏的场合。液体燃料在使用、储存及运输过程中经常会发生泄漏事故, 这些泄漏的燃料能渗入到土壤或者其他多孔性介质中。这些液体在周围环境温度下极易挥发, 此时如果有外热源存在且与泄漏燃料靠得足够近, 就有可能将燃料引燃, 从而使火焰沿土壤或者其他多孔性介质表面传播, 如果没有采用正确方法控制火焰传播, 可能造成生命财产的重大损失。同时, 对于泄漏到土壤中的液体燃料, 如果采用燃烧的方法进行清理, 也要求对其燃烧特性进行研究。因此, 研究浸没在多孔介质中的液体燃料燃烧特性对于火灾防治和土壤的低污染化具有重要意义。

相对于液体燃料燃烧特性研究而言, 浸没在多孔介质中的液体燃料燃烧研究还较少, 上世纪八十年代中期日本几位学者对液体燃料浸润床层的燃烧特性进行了研究, Ishida等<sup>[1-4]</sup>对燃料浸没在多孔床中燃烧做了早期研究, 他们通过实验研究了多孔介质的粒径, 温度, 表面热传导率和表面倾角等因素对火焰传播特性的影响。此外还对被雪覆盖的沥青路面上的火焰传播特性进行了研究, 实验分析了火焰传播特性与雪层厚度, 燃料闪点以及路面多孔性的相互关系。Hirano等对这一领域也做了类似实验<sup>[5,6]</sup>, 研究了反向气流作用下浸没在沙子中煤油的火焰传播特性, 利用烟雾示踪可视化技术和细丝热电偶探针研究了火焰锋面附近空气动力特性和温度场特性。最近, 我们对此也进行了研究<sup>[7-10]</sup>。在实验中, 我们采用非传播的扩散火焰型式, 在静止的环境气氛下, 对浸没在多

\*国家自然科学基金资助, 资助号: 50406028

孔床中的液体燃料的燃烧特性进行了研究,获得了多孔介质粒径、床层厚度、多孔介质材料性质以及液体燃料特性等影响因素对液体浸没在多孔介质中的燃烧特性的影响。在理论方面做了两相Stefan问题假设提出了一个近似分析模型,定量预测了单位时间内燃料消耗量和气液界面位置,预测结果也证实床层导热和毛细作用力两种作用机制对燃烧的影响,并归纳出采用导热系数很小的多孔介质可以有效地扑灭池火,采用导热系数大的多孔介质更有利于采用燃烧技术进行土壤的低污染化。

以上的这些研究主要集中在单独的易燃性液体燃料浸没于多孔性固体床层中的火焰传播、燃烧特性的研究,没有考虑外界因素比如外界热辐射对它的影响。当发生大面积燃料泄漏后,已燃区域对邻近区域有显著的辐射加热作用,同时,太阳辐射对泄漏燃料的加热作用对于泄漏燃料的燃烧特性也有一定的影响。研究这种环境下浸没燃料的燃烧特性,对于火灾安全和土壤低污染化有重要意义,而这种情况下的研究工作却尚未见过报道。因此,本文的工作是在我们以往工作的基础上<sup>[7-10]</sup>,研究外界辐射环境下,浸没在多孔介质中的液体燃料的燃烧特性。

## 2 试验装置和方法

实验系统示意图如图1所示。实验在一风洞中进行,风洞分三部分,第一部分是沉降室及缩口段,长1米,主要作用是导引空气进到实验段;第二部分是实验段(长×宽×高 = 1500mm × 250mm × 150mm),实验段侧壁采用4mm厚的石英玻璃(可透光),实验段顶部装有陶瓷辐射加热器,辐射热强度通过一个调压器来调节。第三部分是出口段,用以排出烟气。采用一内直径为100mm,高100mm的不锈钢容器盛装多孔介质

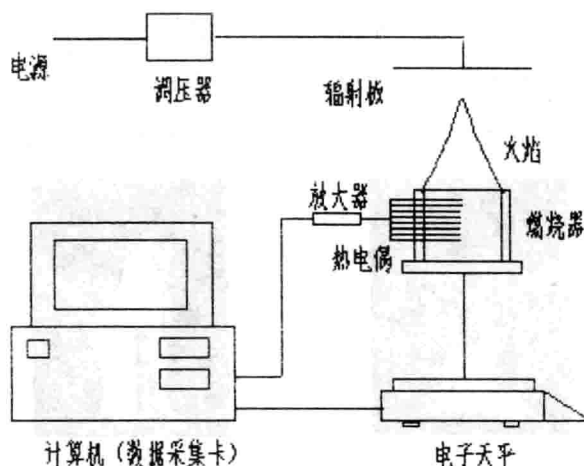


图1 实验系统示意图

和液体燃料,该容器壁厚为1mm。为减少燃烧过程中通过壁面的热损失,容器所有壁面均采用10mm厚的岩棉包裹。实验中,多孔介质分别选用平均粒径为2mm的沙子,沸石,钢珠,液体燃料为甲醇,乙醇,丙醇。本文对同种多孔介质中浸没的不同液体燃料的燃烧特性进行了研究,对比实验是在有、无辐射条件下进行。

试验中采用了甲醇、乙醇和丙醇三种醇类燃料，燃料的物性参数在我们以前的论文中可以查到<sup>[9,10]</sup>，这里不再重复。在每次实验中，多孔介质盛装在同一容器中，每次床层的高度都保持不变。液体燃料直接注入到多孔介质中，每次注入燃料时，正好浸没多孔介质的表层。实验中燃料质量及质量的变化量采用电子天平实时称量。实验中多孔床层温度变化采用细丝K型热电偶测量，为获得床层不同高度的轴向温度分布，采用阵列热电偶检测，同时热电偶的测点均位于容器的中心，如图1所示，轴向方向以y表示，多孔介质表面为y=0，实验中热电偶位于y=-5mm、-15mm、-25mm、-35mm、-45mm、-55mm、-65mm、-75mm八个位置。

试验开始采用点火枪点燃液体，待整个燃烧过程自然熄灭后试验结束。在有辐射情况下采用长×宽=235mm×60mm，额定电压为220v，额定功率为1000w的辐射陶瓷板加热，辐射板距多孔介质表面232mm，实验过程中通过调解电压来改变功率，从而改变陶瓷辐射板的辐射通量，辐射通量采用热辐射计测量直接读取。

### 3 结果及分析

#### 3.1 燃烧现象

实验中，三种燃料点火后，火焰迅速覆盖整个容器表面，这是因为甲醇，乙醇，丙醇的闪点都低于室温，因此，在室温下容器上方已经存在挥发出来的可燃液体的蒸汽，一旦有外界点火源接近，就会很快着火、燃烧。根据实验现象，我们将浸没在多孔介质中的液体燃料的燃烧过程分为三个阶段：着火、燃烧和燃尽。如图2所示。



图2 乙醇浸没在沙子中燃烧时的三个过程

这三种燃料的着火过程基本类似，但着火后的火焰颜色是有区别的，甲醇着火后，火焰颜色是蓝色，但是偶尔也夹杂着黄色火苗；而乙醇点燃后蓝色火焰持续几秒就转变为黄色，此时只有床层表面呈现蓝色；丙醇在着火几秒后整个火焰都呈现亮黄色。随着



燃烧的进行。在燃烧后期，三种浸没在多孔介质中的液体燃料燃烧的火焰颜色都呈现蓝色，主要是因为此时燃料的供给变弱，氧气供给相对于燃料来说是充足的，因此燃烧完全。

不同燃料浸没在不同多孔介质中的火焰形状和燃烧现象基本一致，都是在着火燃烧后，火焰很快就达到最大高度，随着时间的推移，火焰高度逐渐下降，趋于接近多孔介质表面，此后，部分表面不再覆盖火焰，火焰的熄灭首先发生在容器的中部，在熄灭前，只有容器壁面周围有一圈很微弱的火焰。这与我们以前的实验结果<sup>[10]</sup>是一致的。但是，不同的燃料火焰熄灭的时间是不同的，这在后面我们还将作进一步的讨论。

燃烧过程中，火焰的形状是锥形的。图 3 给出了不同外界辐射热通量下的火焰形状。从实验结果可以看出，在有外界辐射下，火焰顶部变宽，火焰颜色变得更为明亮，由橘黄色变为亮黄色，这说明在有外界辐射加热下，火焰温度升高了，燃烧也更为剧烈，多孔介质中燃料的残余量必然下降，这将在后面进一步讨论。

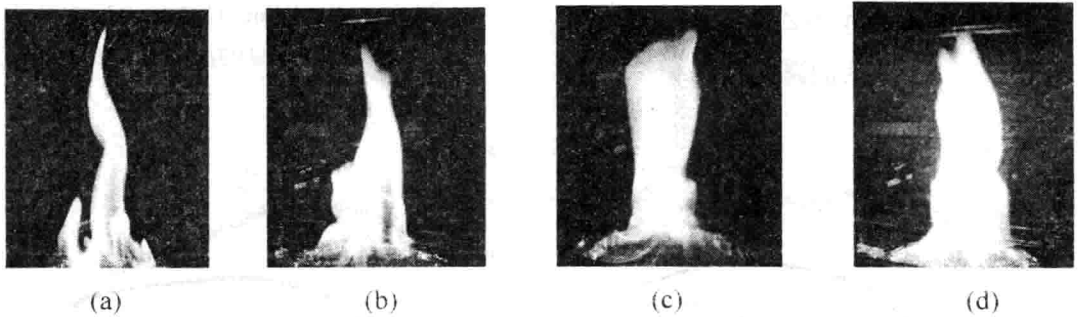


图 3 不同辐射通量下乙醇浸没在沙子中燃烧时的火焰

实验中发现，三种燃料燃烧时火焰的最大高度是不同的，甲醇的约为 200mm，乙醇、丙醇的火焰最大高度约为 250mm。随着外界辐射热通量的增强，火焰高度略有增大。同时，三种燃料浸没在多孔介质中燃烧时存在明显的火焰闪烁，火焰闪烁频率随着外界辐射热通量的增强逐渐增大。实验中还发现，在三种燃料燃烧过程中，甲醇几乎不产生烟黑，乙醇燃烧 5min 后，多孔介质表层就有碳黑生成，燃烧 20min 左右时，整个床层表面都呈现黑色，而且燃烧后在风洞顶部也存在明显的烟黑。丙醇火焰在点燃 2min 后床层就开始出现碳黑，在燃烧 15min 后床层表面基本上都呈现黑色，燃烧后风洞顶端则存在更多的烟黑。这些现象说明，随着燃料含碳量的增大，扩散火焰的不完全燃烧现象更为明显。

### 3.2 不同辐射通量下乙醇浸没在沙床中燃烧时的温度分布

多孔介质吸收燃料燃烧时的部分热量,浸没其中的液体燃料受热蒸发,并通过毛细作用向表面传递质量维持燃烧。图 4~7 是辐射通量分别为  $0\text{kW/m}^2$ 、 $0.71\text{kW/m}^2$ 、 $1.33\text{kW/m}^2$ 、 $2.27\text{kW/m}^2$  时乙醇浸没在沙床中燃烧时不同床层深度的温度分布。实验结果表明,燃料着火后,床层温度开始迅速上升,当达到燃料的沸点温度时,温度变化变

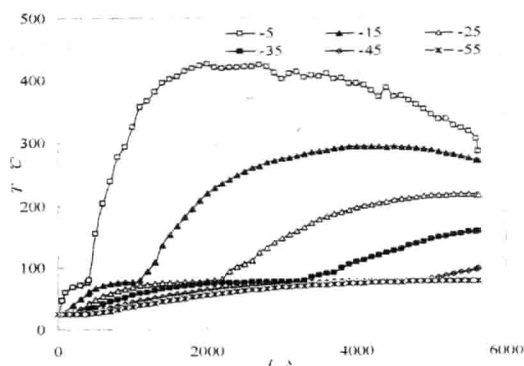


图 4  $0\text{kW/m}^2$  时乙醇浸没在沙床中燃烧时的温度分布

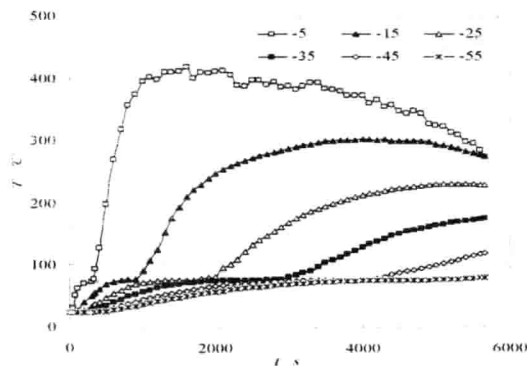


图 5  $0.71\text{kW/m}^2$  时乙醇浸没在沙床中燃烧时的温度分布

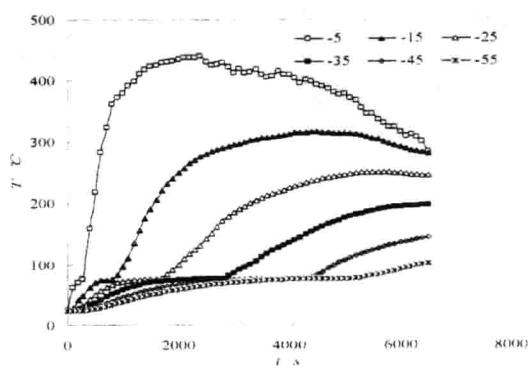


图 6  $1.33\text{kW/m}^2$  时乙醇浸没在沙床中燃烧时的温度分布

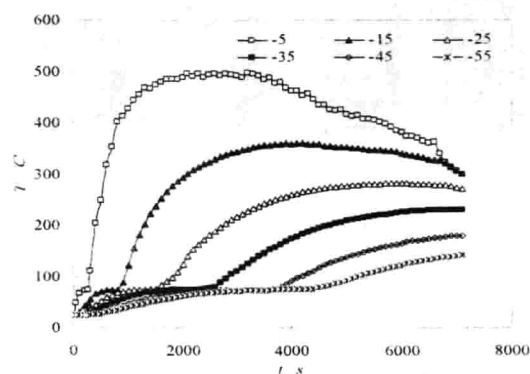


图 7  $2.27\text{kW/m}^2$  时乙醇浸没在沙床中燃烧时温度分布

慢,经过一段平缓的变化后,温度又快速上升达到的最大值。此后温度开始下降,直至火焰熄灭。床层温度变化特性已经在以前的论文中做了阐述<sup>[7~10]</sup>。我们认为,温度上升到燃料沸点后温度平稳变化的那段时间,热电偶所处的位置为气液共存区,此后,温度突然上升,意味着热电偶测点处的液体已经完全蒸发,也就是说,温度高于沸点温度的区域属于燃料蒸气区。温度开始突然上升至最大温度值的时间点为多孔床层中燃料蒸气区的下边界到达测点处的时间。实验结果表明,随着外界辐射通量的增大,燃料蒸气区