

中国工程热物理学会

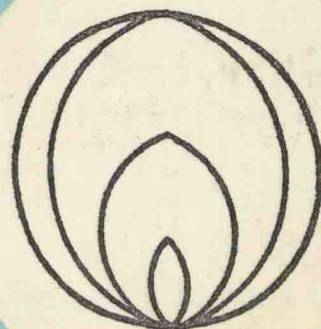
燃烧学学术会议

论文集

一九九七

天津

中国工程热物理学会编



燃烧学目录

一. 固体燃料燃烧特性

- 974042 混煤特性的非线性规律研究
... 周俊虎、汤龙华、曹道卿、殷春根、吴晓蓉、姚强、曹欣玉、岑可法 I -1-7
- 974044 激光点火煤粒周围的温度场
..... 冯波、刘迎晖、周英彪、柳朝晖、郑楚光 I -8-6
- 974045 无声放电场中 OH 自由基发生及其氧化碳烟的动力学模拟
..... 高泰荫、信一兵 I -14-5
- 974061 强迫对流条件下煤粒均相着火规律的研究 徐昌荣、傅维标 I -19-10

二. 煤粉及水煤浆燃烧

- 974006 人工神经网络在状态建模及动力配煤中的应用研究
..... 殷春根、骆仲泐、岑可法、姚强、周俊虎、倪明江 II -1-7
- 974007 锅炉最低稳燃负荷与燃烧稳定性评价指数 CSI^1
..... 周怀春、程浩斌 II -8-6
- 974016 分级着火旋流燃烧方式试验及应用研究
..... 靳世平、陈长栋、钱壬章 II -14-6
- 974049 混煤煤灰在加热过程中矿物质行为研究
..... 李帆、邱建荣、郑瑛、郑楚光 II -20-5
- 974055 多相燃烧分形模型及其实验研究 陈智波、任有中 II -25-6
- 974077 轴向叶片式旋流煤粉燃烧器出口区域两相流场的 PDPA 实验研究
.... 李荣先、崔龙铨、罗纲、周力行、张斌、李文健、陈济荣、张恩仲 II -31-5
- 974079 锅炉内煤粉燃烧的通用计算方法 葛阳、傅维标 II -36-8
- 974080 双通道燃烧器内煤粉气流的着火与锅炉燃烧稳定性分析
..... 葛阳、傅维标 II -44-6

三. 流化床燃烧

- 974001 多室流化床内颗粒的流动特性
..... 周肇秋、吴创之、徐冰燕、陈勇 III -1-6
- 974005 用神经网络优化方形分离器的运行参数
王树荣、方梦祥、骆仲泐、李绚天、殷春根、程乐鸣、倪明江、岑可法 III -7-7
- 974011 新型流化床颗粒层过滤器过滤性能的研究
..... 张世红、陆继东、刘德昌、林志杰、郑楚光 III -14-6
- 974032 差速循环流化床锅炉的模型与性能仿真 张永哲、徐向东 III -20-8
- 974036 模糊控制在循环流化床中的应用
..... 宋锦海、陆继东、林志杰、伍尉恒 III -28-6
- 974040 振动流化床冷渣器试验研究
..... 段钰锋、刘安源、章名耀、姚志彪、唐惠芬、刘前鑫、钱瑞明 III -34-6

974041	循环流化床锅炉总体数学模型及其与工业试验比较的研究	王勤辉、骆仲决、方梦祥、李绚天、程乐鸣、倪明江、岑可法	III -40-13
974052	循环流化床换热壁面上热发展区及局部换热系数的研究	赫俏、陆继东、钱诗智、林志杰、王小珊	III -53-6
974057	煤颗粒形貌特征与流化床锅炉床内埋管布置	刘柏谦	III -59-4
974058	循环流化床膜式壁传热试验与模型	程乐鸣、骆仲决、李绚天、倪明江、岑可法	III -63-8
974064	用连续波和动力波研究气固磁流化床的稳定性	巢江辉、归柯庭、虞维平、施明恒	III -71-8
974030	循环流化床煤热解 — 碳燃烧技术实验研究	方建华、王博、潘忠刚、王达三	III -79-6
974028	循环流化床 (CFB) 密相区颗粒横向扩散的研究	肖平、燕桂章、王达三	III -85-8
974050	循环流化床锅炉物料平衡	燕桂章、薛以泰	III -93-6
974024	出口几何结构对循环流化床锅炉性能影响的试验研究	金燕、郑洽余	III -99-5

四. 燃烧过程数值计算

974003	多孔介质中预混火焰传播速度的预示	吕兆华、孙思诚	IV -1-5
974014	四气门汽油机中滚流运动的三维数值模拟	刘书亮、孙晓燕、史绍熙、冯明志、李康	IV -6-8
974019	循环流化床气固两相流中稠密颗粒间碰撞的数值模拟	张鑑、由长福、徐旭常	IV -14-6
974066	宽筛分煤粉颗粒间相互作用的数值研究	李向阳、沈明忠、张绪祯	IV -20-6
974060	可调煤粉浓度撞击式分离器的数值研究	徐江荣、姚强、周俊虎、曹欣玉、岑可法	IV -26-5
974072	原型辐射传热模型在炉内数值模拟中的应用研究	李永华、姚文达	IV -31-6
974075	用统一二阶矩模型模拟强旋湍流气粒两相流动的初探	陈涛、周力行	IV -37-6
974087	微重力环境下辐射传热对火焰的影响分析	孔文俊、黄以民、韦明昱、解轸、张培元、杨平、张孝谦、田宗漱	IV -43-6
974088	重力对预混、层流 V 型火焰影响的数值分析	孔文俊、黄以民、韦明昱、解轸、张培元、杨平、张孝谦、田宗漱	IV -49-6
974059	用非正交曲线坐标系数值计算航空发动机加力燃烧室无化学反应的湍流流场	叶桃红、过明道、陈义良	IV -55-6

- 974020 四角切向燃烧煤粉锅炉炉膛内空气动力场的数值研究 刘向军、徐旭常 IV -61-8
- 974084 一种新型柴油机电控单体喷油器燃油系统的计算机模拟研究 孙芳、汪洋、谢辉、苏万华、李绍安 IV -69-6

五. 燃烧污染控制

- 974002 多组分粒子流化床半湿式烟气脱硫研究 雷震东、郑舜鹏、吴创之、陈勇 V -1-6
- 974012 造纸污泥与废水污泥流化床焚烧时 NO_x 和 SO_2 的排放特性比较 李斌、池涌、曾庭华、严建华、蒋旭光、岑可法 V -7-5
- 974022 乳化重油含水量对锅炉 NO_x 和 SO_x 排放的影响 钟北京、傅维标 V -12-6
- 974023 煤的挥发份组分对 NO_x 和 SO_x 排放的影响 钟北京、杨静、傅维标 V -18-6
- 974035 NO_x 生成的有限反应速率二阶矩封闭模型 郭印诚、王希麟、周力行、林文漪 V -24-8
- 974038 二维 SO_2 准静态扩散 MgO 固硫的分布孔模型 李成之、朝泽军 V -32-9
- 974039 气—固反应的终止判断与烟气中酸性气体干式净化的能限分析 陈德珍、张鹤声 V -41-7
- 974054 洁净型煤中提高碳酸钙脱硫性能的新技术 董佳芳、任有中、曹源泉、钱剑青 V -48-6
- 974062 循环床锅炉循环灰对焦油裂解的催化影响 吕俊复、岳光溪 V -54-6
- 974071 菱镁石煅烧产物孔结构及其对固硫反应的影响 朝泽军、李成之、胡成 V -60-7
- 974021 蒸汽活化对钙基脱硫剂孔结构及固硫能力影响的实验研究 唐庆、徐旭常、顾一兵 V -67-7

六. 液雾燃烧

- 974043 一种液体单元推进剂滴的蒸发燃烧计算 聂万胜 庄逢辰 VI -1-8
- 974051 煤粉锅炉液化气点火装置的理论与实践 刘圣勇、陈开璇、李宝娜 VI -9-5
- 974053 含能液滴着火过程的实验研究 余永刚、金志明、刘峰、贺安之、姚卫 VI -14-4
- 974067 柴油压力喷射破碎特性试验研究 魏建勤、傅维标 VI -18-5
- 974068 柴油混合闪蒸喷雾的探索研究 魏建勤、傅维标 VI -23-6
- 974069 水闪蒸喷雾的试验研究 魏建勤、傅维标、阎德中 VI -29-6
- 974073 水分解催化剂对高含水量乳化燃油燃烧的影响 贺占博、刘海波、刘健 VI -35-4

974074	新型低压空气雾化喷嘴的雾化机理和雾化特性实验研究	刘伟军、马其良	VI -39-6
974078	醇类燃料发动机的早燃及消除	严昀、张锐、王岳、潘奎润	VI -45-6
974085	突扩区 / 火焰筒头部流动特性研究	赵坚行、胡劲、丁万山、赖寿昌、邓淑文、邓武	VI -51-6
974018	油品引燃时间的影响因素研究	李建华、黄郑华	VI -57-6
974017	火花点火发动机爆震燃烧特性的研究	王良煜、尚秀镜、刘文胜、李建权、傅维标	VI -63-5
974025	乳化燃料滴的蒸发与着火的研究	葛阳、王利波、傅维标	VI -68-6
974026	乳化油滴微爆规律的研究	葛阳、王利波、傅维标	VI -74-8
974027	单滴乳化燃料的微爆模型	葛阳、傅维标	VI -82-8
七. 燃烧测试技术与其他燃烧技术			
974033	圆湍射流控制的实验研究	范全林、段新平、郭印诚、王希麟、林文漪	VII -1-5
974010	湍流预混火焰结构的测度分形研究	杨宏旻、唐晓军、刘勇、顾璠、徐益谦	VII -6-6
974013	利用激光及 PSD 元件测量射流平均密度场		
— 湍流密度场测量方法研究报告之一		陈俊、王建华、陈义良	VII -12-6
974015	废轮胎的热裂解回收技术研究	王文选、仲兆平、陈晓平、蓝计香、赵长遂	VII -18-8
974029	城市生活垃圾的燃烧性能研究	江淑琴、矫维红	VII -26-8
974031	方管内气固两相流动平板边界层三维特性的试验研究	邱坤赞、严建华、梁绍荣、李晓东、倪明江、岑可法	VII -34-6
974063	用往复运动火焰沉积金刚石薄膜的一种新方法	赵继英	VII -40-3
974065	超长建筑物爆炸泄压特性的试验研究	王宝兴、龚延晖、张银花、马克辛	VII -43-6
974076	旋流数为 1 的湍流强旋两相流动的 PDPA 实验研究	徐一、曹东、周力行	VII -49-6
974082	用低通滤波法处理内燃机缸内流场的 LDA 测量数据	李玉峰、刘书亮、史绍熙、许振忠	VII -55-6
974083	剪切干涉测温方法的研究	刘德新、付茂林、熊树生	VII -61-6
974086	微重力燃烧实验落塔技术改进	张孝谦、韦明昱、张培元、解轸、黄以民、杨平、孔文俊、孙秀婵、华泳、华宏荪、田宗瀚	VII -67-7
974034	突扩两相湍流流动的 PDPA 实验研究	古红霞、郭治民、郭印诚、王希麟、林文漪	VII -74-6

混煤特性的非线性规律研究

周俊虎 汤龙华 曹道卿 殷春根

吴晓蓉 姚 强 曹欣玉 岑可法

(浙江大学热能工程研究所, 310027)

摘 要

实验研究及其理论分析表明, 混煤与单煤特性指标之间的关系是非线性的。作者尝试用线性拟合、神经网络方法等手段来描述这种非线性, 摒弃了目前广泛应用的用单煤指标加权平均值表示混煤特性的不可靠方法。尝试结果表明, 神经网络方法用于描述混煤特性这样复杂的难于用具体函数式表达的非线性关系是成功的。随后对如何定量得到混煤煤质特性以及燃烧过程特性的具体方法进行了讨论和实践, 而以往基本上宥于定性地讨论这些特性。混煤特性的非线性规律研究对目前正在发展的优化动力配煤技术建立正确的数学模型提供了重要的基础条件。

一、前言

在我国的燃煤消费中, 出现了用户使用二种或多种不同煤掺合的混煤这种引入注目的现象。燃用混煤有两种情况: 一种是被动地燃用混煤。这主要是由于随着国民经济的发展, 煤的消耗量越来越大, 而煤炭运输能力不足以及国家有关电站燃烧用煤政策等方面的原因使许多电厂不得不燃用混煤; 另一种是主动地燃用混煤, 这是利用优化配煤技术将若干种不同种类、不同性质的煤按优化原理找到最佳配比, 掺配加工成在综合性能上呈“最佳状态”的新“煤种”, 并取得经济上的优势。这是一种很有实际用途的煤炭加工技术, 作为能尽快投入使用的洁净煤技术之一, 优化配煤技术已引起国内相关行业的日益重视, 并在一些大型配煤场投入或将要投入使用^[1-6]。无论是主动地燃用混煤还是被动地燃用混煤, 我们必须对混煤的各种特性有一定程度的了解, 才能谈得上使用优化方法实现动力配煤, 同时也能为被动燃用混煤的电厂锅炉提供运行依据。

二、混煤特性的非线性研究

现有优化配煤技术的数学模型在表达混煤各质量指标与单煤对应质量指标间的关系时都处理为简单的加权关系式。因此, 优化配煤数学模型基本上是一个线性规划的数学问题^[5,6]。混煤的主要质量指标与单煤对应质量指标按配比大小是否具有可加性, 这是应用线性规划做动力配煤的关键前提。实际上混煤与单煤之间是一种非线性关系, 也有其他研究者从试验结果上定性讨论过^[7]。

混煤的质量指标包括两方面: 混煤的煤质分析数据(工业分析、发热量)和涉及到炉内化学过程的特性数据(如灰成分分析、燃烧特性、灰熔融特性, 污染物排放特性等)。下面将分别讨论这两种混煤煤质指标的非线性规律。

1. 混煤煤质分析的非线性规律

迄今为止, 国内外一般都采用算术平均方法计算混煤的煤质分析数据, 算术平均

法简单方便, 在缺乏混煤试验实际数据的情况下成为理所当然的选择。由于动力配煤工作的实际需要以及对混煤质量的进一步深入要求, 我们对混煤的煤质分析数据做了大量的实际测试, 并通过混煤的实验数据来验证算术平均法的正确与否。

本文研究对象为华东地区常用的 16 种煤, 取其中 3 种煤按不同比例配制成的 48 个混煤进行了工业分析(M_{ad} , A_{ad} , V_{ad} , FC_{ad})和发热量数据的试验研究, 以便研究混煤与单煤的煤质分析数值间的关系。试验数据点示于图 1a ~ 1d 中。图中横坐标表示实测值, 纵坐标表示加权平均值。曲线 2 为理想曲线, 即实测值与加权值相同时的曲线。由离散数据点分别作了线性回归(曲线 1)、二次回归(未画出)和三次回归(曲线 3)。回归后发现, 线性回归曲线 1 与理想曲线 2 并吻合, 斜率也有变化, 曲线 3 则显示出了非线性。这表明, 用加权值来表示混煤的煤质分析数据并不准确。确切地说, 混煤与单煤的煤质分析数值之间实际上是一种非线性映射关系, 至于这种非线性映射关系如何表示, 有待进一步研究讨论。

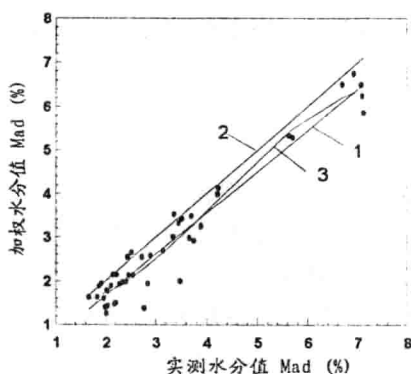


图 1a

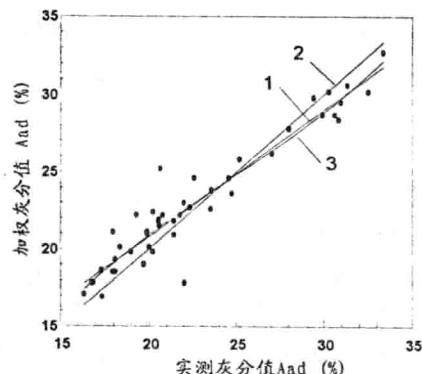


图 1b

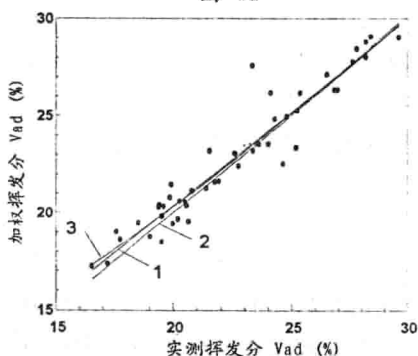


图 1c

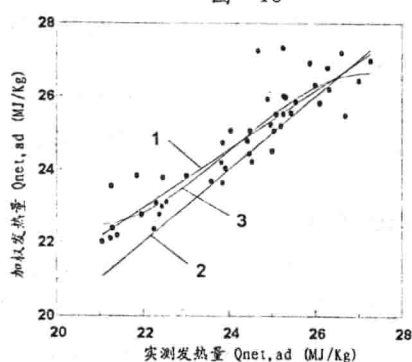


图 1d

图 1 混煤煤质分析实测值与加权值比较

2. 混煤燃烧过程中某些特性

单煤着火、燃烬、结渣、污染物排放等特性十分复杂, 目前还找不到一个统一的可靠表示方法, 混煤对应的这些特性就更为复杂。如果说混煤煤质的分析值用单煤的加权形式表示的方法还大致可以接受的话, 那么, 对混煤燃烧过程中的特性也用算术平均

法则缺乏足够的依据,得到的结果甚至是错误的。例如,混煤的着火温度、灰熔点并不是组成单煤的着火温度和灰熔点的加权和,而是呈现典型的非线性映射关系;如果用结渣综合判别指数 $R^{[8]}$ 表示煤的结渣特性,那么混煤的结渣综合判别指数 R 也并不是组成单煤的 R 值的简单加权和。

但是,象寻找混煤煤质分析值与单煤煤质分析值之间的非线性关系那样,试图通过理论和实验直接找到混煤燃烧特性指标与单煤对应指标之间的非线性关系,似乎并不可取。因为,煤的燃烧过程中的一些特性与煤质分析数据、灰成分分析等一些分析数据有关,混煤应遵循同样的规律。也就是说,由混煤的组成(单煤及其配比)得到混煤的煤质分析值、灰成分分析等一些分析数据,再由这些基本数据得到混煤的燃烧过程中的一些特性。通过这种间接的方法来表示混煤与单煤特性指标间的非线性关系。因此,要得到混煤燃烧过程中的某些特性,其关键是:将混煤作为一种新“煤种”,按单煤的相同处理方法,由煤质分析数据(工业分析、发热量、元素分析)、灰成分分析等基本数据来得到燃烧特性,而不是直接按配比简单地将单煤的某个特性(如着火温度、灰熔点、结渣指数 R)加权。

那么,如何由单煤的煤质分析数据、灰成分分析及配比得到混煤的对应数据(它们之间的关系是非线性的)呢?混煤与单煤的煤质分析数据关系已在 1 节中讨论过,还要研究讨论的是混煤与单煤的灰成分分析之间的关系。灰成分分析值是得到灰熔点、灰熔融性、结渣积灰等特性的关键数据。

为研究混煤与单煤的灰成分之间的关系,本文做了三种单煤(枣庄烟煤,乐陵烟煤,潞安贫煤)以及由它们按不同比例配制的五种混煤的灰成分分析。实测数据及加权值列于表 1 中。将 SiO_2 和 Al_2O_3 数据点示于图 2a ~ 2b 中。图中,曲线 2 表示理想曲线(即加权值与实测值相同时的曲线),曲线 1 为线性拟合曲线,从图 2a ~ 2b 可以看出,即使用线性拟合它也不与理想曲线 2 重合。从图 2b 看, Al_2O_3 成分线性拟合较好,煤灰成分中 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 等灰成分含量较少,测量的数据相对误差较大,用加权的方法比较合理,也是线性关系。但即使混煤某些灰成分与单煤灰成分之间是线性关系,混煤与单煤的燃烧过程中的一些特性也不是线性关系,因为这些特性与成分之间本身就存在非线性关系,混煤与单煤之间仍是非线性关系。

表 1. 试验单煤及混煤的灰成分、灰熔点实测及加权值

编号	煤样名称	SiO ₂		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		CaO		MgO		TiO ₂		Na ₂ O+K ₂ O		ST	
		实测	加权	实测	加权	实测	加权	实测	加权	实测	加权	实测	加权	实测	加权	实测	加权
1	枣庄烟煤	52.3		25.7		8.32		3.52		1.56		1.08		1.41		1360	
2	乐陵烟煤	40.7		19.8		16		8.45		1.04		0.8		1.38		1150	
3	潞安贫煤	49.8		34.8		2.92		3		0.82		1.4		1.78		1500	
4	枣30乐30潞40	47.6	47.8	26.9	27.5	9.21	8.46	4.8	4.79	1.09	1.11	1.1	1.12	1.43	1.55	1330	1353
5	枣20乐30潞50	47.2	47.6	27.9	28.5	8.64	7.92	4.86	4.74	1.03	1.03	1.04	1.16	1.55	1.59	1350	1367
6	枣30乐40潞30	47	46.9	25.6	26	10.6	9.77	5.29	5.34	1.1	1.13	1.04	1.06	1.41	1.51	1260	1318
7	枣50乐30潞20	48	48.3	25.4	25.7	10.1	9.54	4.72	4.9	1.19	1.26	1.04	1.06	1.47	1.47	1280	1325
8	枣20乐20潞60	47.8	48.5	29.4	30	7.16	6.67	4.32	4.19	1.02	1.01	1.2	1.22	1.65	1.63	1420	1402

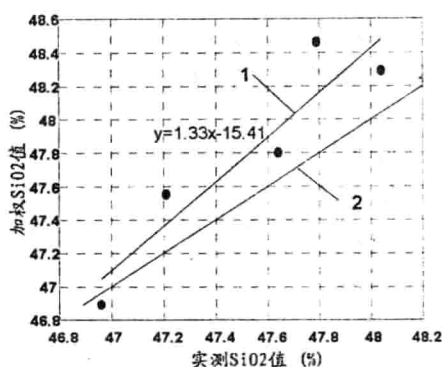


图 2a

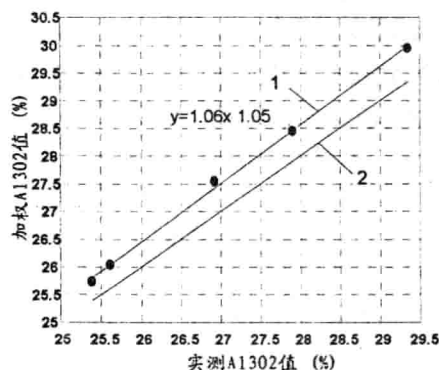


图 2b

图 2 混煤灰分实测值与加权值比较

由以上 1, 2 节的讨论, 要定量地讨论混煤各种特性指标, 得到这些指标的确切数值, 取决于我们如何正确地表达描述混煤与单煤的煤质分析、灰成分等各种数值之间的非线性关系。下面将讨论如何定量地描述混煤的各种特性指标。

三、非线性规律的描述

根据对混煤特性的理论研究和实验数据分析, 按混煤与单煤相关性的不同, 本文使用了三种方法来描述混煤特性的非线性规律。

1. 算术平均法

混煤的有些特性数据加成性较好, 如硫元素含量。另外, 煤灰成分中 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 等灰成分含量较少, 测量的数据相对误差较大, 用加权的方法比较合理。

2. 线性拟合法

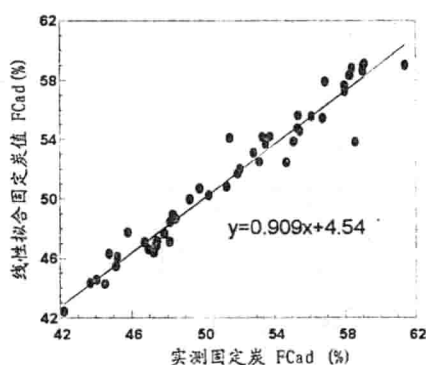


图 3a

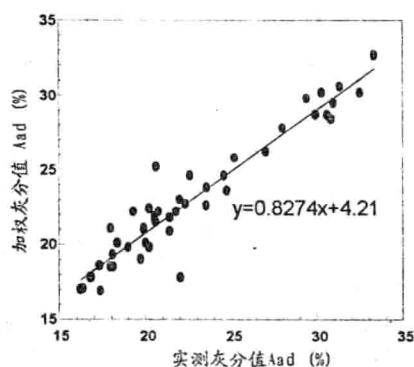


图 3b

图 3 混煤固定炭、灰分实测值线性拟合

混煤的一些特性非线性程度不高, 但又不能用加权平均, 这时用线性拟合的方法来表示混煤与单煤的特性关系, 如固定炭含量; 另外, 在找不到合适的方法来描述混煤

与单煤间的非线性关系时,对一些成分分析值也可暂时用线性函数来拟合数据。图 3a ~ 3b 是用线性拟合得到的混煤固定炭、灰分数据曲线。灰成分中 SiO_2 、 Al_2O_3 等含量较多的成分用一次函数拟合也较好,拟合曲线已示于图 2a ~ 2b 中。

以上两种方法仅限于描述混煤的一些成分分析值,如果用来描述混煤燃烧过程中的特性则偏差较远。

3. 非线性方法(神经网络法)

由于现在对混煤一些特性的本质机理还不够清楚,因而对混煤的特性写出描述其规律的具有一定通用性的公式目前仍存在困难,而实际应用中又需要知道混煤某些特性指标的定量值,必须建立煤的各种分析数据与特性指标间的关系。

混煤与单煤之间的非线性关系客观存在,因此混煤的各种实测数据必然反映了这种非线性关系,在这些实测数据里隐含着混煤与单煤之间关系的内在机理规律,用线性拟合或者多项式拟合都是对其中内在规律的一种简单揭示。如果能够找到一种有效的方法,这种方法能够更充分地从大量的混煤实测数据中提取有用的反映内在机理规律的信息,并通过恰当的形式表现出来,那么只要建立丰富的混煤实测数据库,用这种方法处理抽象出某种规律,就可以根据混煤的单煤组成及配比定量地预测混煤的各种特性指标。目前日益兴起的神经网络技术对实现非线性映射,尤其是解决输入对输出影响的具体不太清楚的“黑箱”或“灰箱”问题显得极为有效,是解决混煤非线性问题的有效方法。本文在混煤特性的研究中应用了这种方法,取得了满意的结果。所用的算法是前馈神经网络用得最多的 BP 训练算法。BP 算法有着强大的从样本中抽取有用信息的能力,以连接权的形式将信息隐含地储存在其中。输入的样本数据为混煤实测数据,输出得到所需的混煤特性预测值。限于篇幅,在此不再详细地论述神经网络方法处理混煤非线性问题的细节过程,只给出神经网络方法预测的一些结果。

混煤煤质分析、灰成分分析等分析性数据都可以用神经网络方法建立混煤与单煤对应数据间的联系,并以数据文件的形式保持其中的内在机理信息,该数据文件信息能够用来预测新的混煤特性。图 4a ~ 4d 示出了神经网络预测的水分、灰分、挥发分及发热量计算值与实测值间的关系。数据点基本上分布在理想曲线的附近两侧。对比图 1 和图 3、图 4,可以看出神经网络预测方法与加权平均、线性回归和高次回归方法相比,具有更高的预测精度,表明神经网络对复杂的输入输出之间非线性关系系统预测某些参数有较好的效果。

混煤燃烧特性也可以用神经网络方法建立混煤与单煤间的联系,但影响燃烧特性的因素很多,几乎包括混煤煤质分析、灰成分分析等所有的煤分析数据。因此,用神经网络方法预测混煤燃烧特性还有一些困难。困难在于缺乏大量的混煤完整实测数据,而不在于神经网络方法本身。表 2 列出的是应用神经网络根据灰成分分析预测到的灰熔点与实测值的比较,可以看出预测值与实测值符合较好。

只要拥有足够的混煤实测数据,应用神经网络方法,就能很好地解决混煤特性预测问题,为动力配煤技术建立可靠的数学模型。

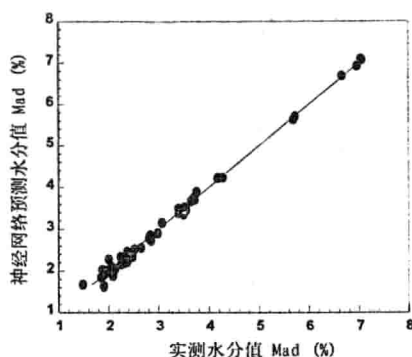


图4a

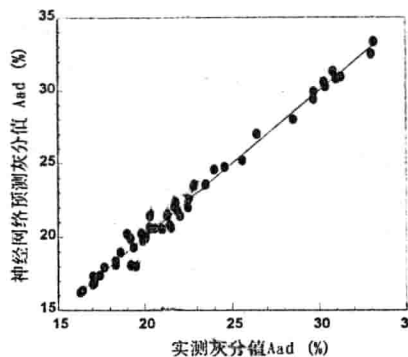


图 4b

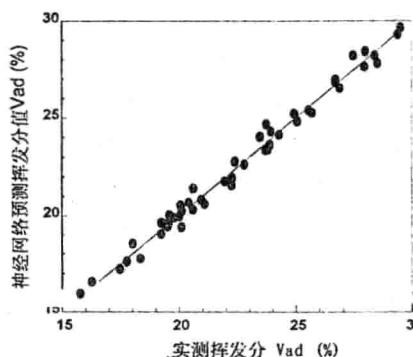


图4c

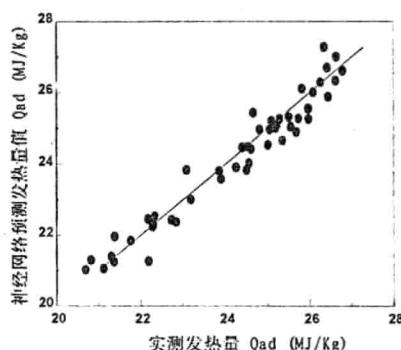


图 4d

图4神经网络预测煤质分析值与实测值比较

表2 神经网络预测混煤灰熔点与实测值比较

编号	煤样名称	ST	
		实测	加权
4	枣30乐30潞40	1330	1331
5	枣20乐30潞50	1350	1352
6	枣30乐40潞30	1260	1279
7	枣50乐30潞20	1280	1299
8	枣20乐20潞60	1420	1414

四、结论

研究混煤的特性对优化动力配煤技术以及被动燃用混煤的电厂锅炉运行十分重要。研究表明,混煤的特性指标与单煤对应指标间不是简单的加权关系,而是非线性映射关系。混煤的煤质分析以及灰成分分析可以通过线性拟合、神经网络等方法预测,有了分析数据以后继而又可以得到混煤与燃烧过程有关的一些特性指标值。不同方法的分析比较结果显示了神经网络方法能够成功地应用于混煤特性的预测。

无论是哪种描述方法,要得到更可靠真实的混煤特性非线性规律,必须有大量的混煤试验数据。因此,今后的工作应进一步加强理论研究以及理论指导下的大量混煤试验研究,积累丰富的混煤实测数据,为动力配煤技术的应用提供基础依据。

参考文献

1. 周俊虎, 汤龙华等, 洁净优化配煤及专家系统的研究与开发, 洁净煤技术 (待发表)
2. 姚强, 岑可法等, 多煤种配煤特性的试验研究, 动力工程, Vol.17, No.2, 1997
3. 李文华, 陈文敏, 煤炭系统动力配煤发展状况, 洁净煤技术, Vol.3, No.1, 1997
4. 成玉琪, 杜铭华等, 优化动力配煤是符合中国燃煤特点的洁净煤技术, 洁净煤技术, Vol.3, No.1, 1997
5. 刘天新, 张敬运, 张自邵, 煤炭检测新方法 with 动力配煤, 中国物资出版社
6. 边炳鑫, 吴立新等, 火力发电厂最佳配煤指标和配煤方案的确定, 洁净煤技术, Vol.2, No.4, 1996
7. 邱建荣, 马毓义等, 混煤特性的综合性试验研究, 动力工程, Vol.13, No.5, 1993
8. 艾静, 秦裕昆等, 国内外煤灰结渣指数的探讨, 电站系统工程, Vol. 0, No.2, 1994

激光点火煤粒周围的温度场^{*}

冯波 刘迎晖 周英彪 柳朝晖 郑楚光

(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉, 湖北, 430074)

摘要 本文提出了一种研究煤着火与燃烧的新型的实验方法, 即采用激光全息摄影技术记录激光加热下的单颗粒煤, 在某一时刻燃烧的全息图, 通过再现系统和数字图象处理过程而获得二维的温度场分布, 为研究煤的着火与燃烧的特性开辟了一条新思路。我们同时采用了数学模型对几种煤从着火到燃尽时其周围的温度场进行计算, 实验结果与模型计算结果进行了比较, 得到了较为一致的结果。

1. 前言

煤着火与燃烧在许多实际情况中都具有极其重要的作用, 比如煤堆的自然、煤矿的粉尘爆炸、煤粉炉内火焰稳燃等。研究煤的着火与燃烧一直是很活跃的领域, 以往的学者采用了不同的实验方法对煤的着火与燃烧进行了研究, 如热重分析法、加热金属网技术、热偶丝固定煤粒技术、滴管炉方法等。激光热源具有可控制、易计量、能量集中等优点, 近年来张东河等人采用激光加热煤粒, 获得了很高的加热速率, 为实验研究煤的着火与燃烧提出了一种新的思路^[1]。他发现对不同的煤种都存在一个临界激光点火能, 在此能量下煤粒不能着火。通过高速摄影机他还观察到三种不同的着火机理。

Phuoc 等^[2]采用 Nd-Yag 激光对人造煤粒进行加热, 并用高速摄影机拍摄了煤粒从加热直至燃尽的全过程。他们也发现存在一个临界点火能 ($800\text{W}/\text{cm}^2$)。他们观察到对 Wyoming 无烟煤, Indian 和 North Dakota 褐煤, 首先多相着火然后气相着火, 而对 Pittsburg 烟煤则只观察到气相着火。对煤粒周围气相的理论模拟表明, 挥发分对激光能有不可忽视的吸收作用。

Cozzani 等^[3]将单个细煤粉悬浮于一个电动热重分析仪中, 然后引入激光点燃。他们采用双色高温计测量了煤粉表面的温度变化过程, 并与理论的预测值进行了比较。燃烧后期的理论值大大高于测量值, 表明现有的动力学模型并不适用于接近燃尽阶段时,

^{*} 国家自然科学基金资助

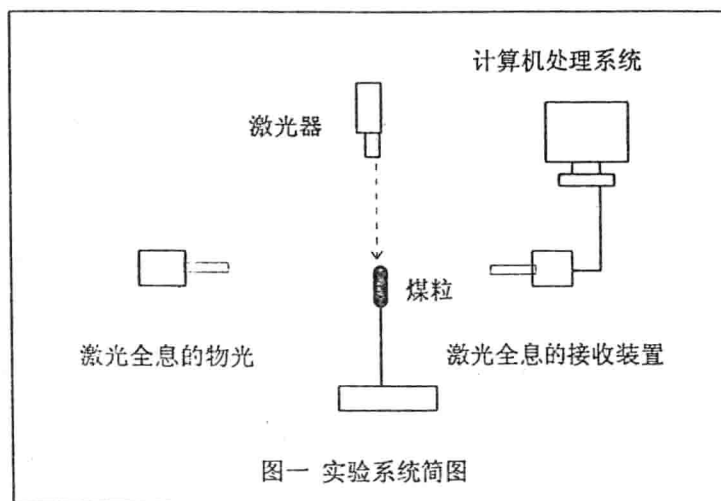
应采用特定的动力学模型。

Muhlen 和 Sowa[4]在一个加热的加热网丝上研究了煤的着火,发现着火现象在很大程度上受过程参数如氧分压和加热速度的影响。Qu 等[5]也测量了受激光加热的煤粒的表面温度变化,发现煤的加热速度受环境氧浓度的影响较大,而与颗粒尺寸没有明显的关系。

可见采用激光点火这种快速加热方式,对于研究煤粒的着火及燃烧极其便利。重要的是激光点火这种方式只是加热煤粒本身,对周围环境无加热,这对于控制实验工况和研究多相反应极为有利。测量煤粒周围的温度场对了解煤粉着火和燃烧机理有重要的意义。本文采用 CO_2 激光加热煤粒,用激光全息摄影技术记录了几种煤粒在燃烧时的温度场,同时与数学模型的计算结果进行了比较。

2. 实验及测量系统

本实验装置包括以下几个部分:激光加热部分、激光全息记录系统、全息再现系统和数字图象处理部分。实验装置图如图一所示。



我们首先将几种煤都磨成 250 目的煤粉,然后采用模具将煤粉压制成直径为 5 毫米,长度为 5 毫米的圆柱体形的煤粒,再用胶将煤粒固定于支架之上。实验时,在煤粒的上方加热煤粒的圆形截面。

实验时,采用的是双曝光拍摄方法。第一次为冷态拍摄,即煤粒未被加热时的情况,第二次当用激光加热煤粒,煤粒已经着火并燃烧,煤粒周围出现明显的火焰时,进行第二次曝光使激光全息干板记录煤粒燃烧场的折射率信息,曝光时间为 5 纳秒,干板显影,

定影时间分别为 3 分钟和 10 分钟, 经过显影, 定影处理后的干板直接用再现系统进行再现。由图象处理系统将干涉条纹直接以数字形式存入计算机。

利用常规测量实验数据的采集处理方法, 误差很大, 而且不适合计算机进行再处理工作; 而计算机图象分析系统是对干涉图进行有效处理的重要工具, 它具有快速、准确、误差小等优点。因而我们采用了一套用计算机对干涉条纹进行自动处理的先进图象分析系统, 该系统由 C C D 摄像机、图像卡、计算机和监视器等组成。

再现全息干涉图像通过摄像机图像输入接口转换成 512×512 像素, 8 个比特灰度级的数字图象, 并直接存贮在图象输入接口的帧存贮器中, 计算机通过数据缓冲器可直接对帧存贮器的内容进行读写等操作, 条纹图象则依次按下列过程进行处理: (1) 定标(确定摄入的图象中各个像素所代表的实际长度, 实际处理时, 采用将一标准长度(1 厘米)随同再现条纹一同摄入计算机, 因具有相同比例放大缩小, 的以中要确定这一标准长度占多少像素, 就能准确获得定标因子大小); (2) 图象平滑去噪(这是图象处理的第一步, 用于去掉噪声干扰); (3) 图象灰度变换(作用为提高对比度); (4) 抽取准中心条纹变换处理; (5) 交互二值化处理, 为条纹进行细化提供可能; (6) 明条纹与细条纹分别细化处理; (7) 测量像素值。

我们用干涉条纹的计算机自动处理系统, 测量了煤粒在燃烧过程中某一时刻的条纹位移值, 从而得到了温度场分布。

在实验中所采用的 CO_2 激光器的波长为 10.6 微米, 其最大功率为 1.5 瓦。我们采用了三种不同的煤样, 分别是青山烟煤、莱阳无烟煤和河南贫煤。研究不同种的煤在燃烧时的温度场的变化。它们的工业分析结果如表一所示。

表一 研究煤种工业分析(分析基, %) 结果

煤种	水份(%)	灰份(%)	挥发份(%)	含碳量(%)
莱阳无烟煤	3.15	30.66	6.03	60.16
青山烟煤	1.42	33.43	21.35	43.80
河南贫煤	1.74	31.56	12.77	53.93

3. 结果与讨论

3.1 实验结果

对三种煤在激光加热时的现象进行了观察。当青山烟煤受激光加热时迅速产生黄烟, 随后形成明亮的离煤粒表面较高的火焰, 然而随时间推移, 虽然激光仍在加热, 火焰却逐渐接近煤粒表面。这可能是由于高挥发分的青山烟煤在激光加热下放出了挥发分并着

火燃烧的缘故。对其他两种煤没有观察到明显的高火焰。这说明青山烟煤是首先均相着火然后多相着火,而其他两种煤则只是多相着火。在对莱阳无烟煤和河南贫煤进行加热时,激光功率必须在 10W 以上,否则煤粒不能点燃,而测量的温度场也显示出煤粒温度仅维持在较低不能持续燃烧的水平。温度测量表明,激光加热的速率大致在 $10^4 - 10^5 \text{K/sec}$ 范围内,这接近于实际锅炉内煤粒的加热速率。

分别对以上三种煤在着火及燃烧期间的温度场进行了测量。图二所示为青山烟煤在激光持续加热并已着火燃烧情况下的温度场分布。图上示出了在离煤粒表面不同轴向距离温度的径向分布。从图上可以看出,在离开煤粒一定距离的地方产生了温度高于煤粒表面温度的区域。这证实了实验观察到的挥发分火焰的存在,表明了这种煤首先均相着火。在挥发分火焰消失后也测量了煤粒周围的温度场,发现在离开表面的地方仍有高于表面温度的高温区。这可能是由于此时煤粒表面的氧浓度为零,碳转化的主要反应为碳与二氧化碳的反应而在煤粒周围形成一个 CO 气相反应层,从而形成较高温度。后面的数值计算结果证实了这一点。

图三所示为莱阳无烟煤在着火之后其周围的温度场。由图可见,离开煤粒表面气相温度逐渐降低,直到达到环境温度。煤粒附近的温度降低非常迅速,表明此时颗粒的辐射及对流损失较大,而煤粒周围的气相反应也较弱,不能形成阻止氧气到达煤粒表面的火焰层。河南贫煤周围的温度场与莱阳无烟煤相似。图四及图五分别为青山烟煤及莱阳无烟煤在离煤粒表面的轴向方向上的温度分布。青山烟煤在煤粒外围形成明显的高温区,而莱阳无烟煤则不能形成这种高温区。这种差别应归因于青山烟煤挥发分火焰的存在。

3.2 数值计算结果

●数学模型

我们采用了一个煤粒着火与燃烧的一维模型进行了理论计算,该模型计算了煤粒周围气相空间的温度随时间的变化规律。本模型采用了脱挥发分的两级模型,碳的氧化反应包含与氧, CO 及 CO_2 的反应。煤粒周围的气相反应包含了三十多个基元反应。分别写出煤粒的能量及各组分的物质守恒方程,进行连立求解,得到煤粒周围的气相温度及组分的分布。受激光加热的煤粒还吸收一定的能量,其能量方程如下:

$$m C_p \frac{dT_p}{dt} = -Q_{\text{loss}} + Q_{\text{gen}} + Q_{\text{laser}}$$

上式中的激光能可表为:

$$Q_{\text{laser}} = \alpha \cdot Q_L$$

其中 α 为煤粒对加热激光的有效吸收系数,由下式得到: [1]

$$\alpha = a \cdot Q_a$$

式中的几何系数 a 取为1.0。而谱吸收系数 Q_a 则由Mic理论得到。由于所研究的煤粒颗粒直

径较大,根据Mie理论计算得到的谱吸收系数近似为0.93。根据平板理论计算的结果与根据MIE理论计算的结果近似,故本计算中取煤粒的有效吸收系数为0.93。

●计算结果

图六所示为莱阳无烟煤加热后的空间温度分布随时间的变化。

在煤粒加热的初期,煤粒表面吸收了大部分的激光能量,颗粒表面温度上升很快,在0.07毫秒的时间内,温度就上升至近1000k,并在离颗粒表面一定距离内维持此温度。这表明此时煤粒稳定燃烧,燃烧放出能量及吸收激光能量平衡了辐射及对流热损失。与图三相比,模型预测的温度稍微偏高且在煤粒附近的温度场也过于平缓,这可能是由于模型中的辐射模型过于简单,另外煤粒的燃烧反应速率常数也可能不太精确。

图七为青山烟煤周围温度场分布的计算结果。与实验结果的对比分析发现,在煤粒的上方的温度分布的确与计算的结果有一致的趋势。对于青山烟煤,在煤粒周围有一个明显的高温区,这是由于气相物质的燃烧而造成的。随着碳粒表面的氧的消耗至尽,碳粒表面的反应以 $C + CO_2 = CO$ 为主,这是一个吸热反应,加上辐射热损失的增加,颗粒表面的温度因而下降。而在气相空间中,存在着 $2CO + O_2 = 2CO_2$ 的反应,这是一个放热反应,因而在气相空间中的温度超过了煤粒的表面温度。根据Makino等^[6]的研究,对于大颗粒煤,其外围会形成一个气相燃烧的火焰面(即煤燃烧的双膜反应模型),该火焰面阻止氧向煤粒表面的扩散,碳转化的主要反应为碳与 CO_2 反应。本数学模型对青山烟煤预测出了这种火焰面的存在,但对莱阳无烟煤并未发现此现象。下一步的工作将一方面对不同煤种不同粒径进行仔细的研究,另一方面将对煤粒自开始加热到最终燃尽的温度场分布进行连续的测量,这对进一步了解煤的着火及燃烧机理有积极意义。

4 · 结论

对三种煤通过激光加热点燃后测量了其周围的温度场分布,得到如下结论:

- 1 · 激光作为一种能量集中的能源,能迅速点燃煤粒。是研究多相反应的有力工具。
- 2 · 青山烟煤首先均相着火然后多相着火,而莱阳无烟煤和河南贫煤则没有观察到均相着火现象。这表明挥发分可能在很大程度上决定着火的方式。

3 · 青山烟煤在燃烧过程中其煤粒周围形成了一个气相火焰层,尽管这种火焰层肉眼并不能观察到。其他两种煤没有观察到明显的气相火焰面。理论模型定性证实了试验结果。

参考文献

- 1 Dong-ke Zhang, Laser-induced ignition of pulverized fuel particles, Combustion and Flame 90: