

模拟增压流化床燃烧室启动特性的研究^{*}

段钰峰¹, 赵长遂¹, 陈晓平¹, 金保升¹, 徐生荣², 王逸仁², 张志伦³

(1. 东南大学洁净煤发电和燃烧技术教育部重点实验室, 南京, 210096;

2. 南京师范大学动力工程学院, 南京, 210042; 3. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 哈尔滨, 150041)

[摘要] 在一座截面为 $0.664 \times 0.656 \text{ m}^2$ 的常压流化床燃烧室内, 进行了热烟气启动增压流化床的系统性模拟试验研究和理论分析. 研制了与中试 PEBC 装置成缩小比例的风室结构, 水冷布风板和启燃室等系统部件. 分别用徐州烟煤、阳泉无烟煤、常州卜弋贫煤和焦作无烟煤矸石混煤, 试验了热烟气点燃流化床的煤种适应性. 研究了加煤床温、加煤速率、埋管受热面、静止床高、热烟气温度和流量等参数对启动过程的影响规律以及床层温升速率的变化. 得到了较翔实和完整的增压流化床锅炉启动系统的结构设计参数和启动过程的运行参数.

[关键词] 增压; 流化床; 启动; 特性

[中图分类号] TK223.21; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)04-0007-07

0 引言

PFBC-CC 联合循环是 21 世纪最有发展前途的洁净煤燃烧和发电技术之一^[1]. 增压流化床锅炉的启动是直接关系到 PFBC-CC 系统能否正常稳定可靠运行的重要环节, 也是发展 PFBC 必须解决的实用技术, 受到国内外同行的高度重视. 由于结构的特殊性, PFBC 锅炉的启动系统有别于常规的 AFBC 锅炉. 诸如: 主燃空气宜通过压力壳与炉体之空腔, 以冷却压力壳及内部构件; 为检修方便, 压力壳内不宜布置机械运动部件. 此外, 对增压流化床的启动, 既要求能在常压冷态低床高条件下完成床层的点燃, 即冷启动; 还要求能顺利完成由于突发原因(如停电、事故检修等)导致锅炉压火后的再启动, 即热启动, 此时床层较高, 且增压运行. 可见, 增压流化床的启动有其自身的特点和规律.

本文采用高温烟气经水冷布风板流化并加热床料的热烟气启动增压流化床技术^[2~4], 并将这一技术方案经试验研究后用于中式 PFBC 锅炉的启动系统. 研究内容旨在通过模拟试验装置上的热态试验研究, 确定中试规模 PFBC 锅炉的启动方案和寻求最佳的点火启动条件与参数, 从而优选出中试装置 PFBC 锅炉启动燃烧室和启动系统的合理结构及运行调整方案.

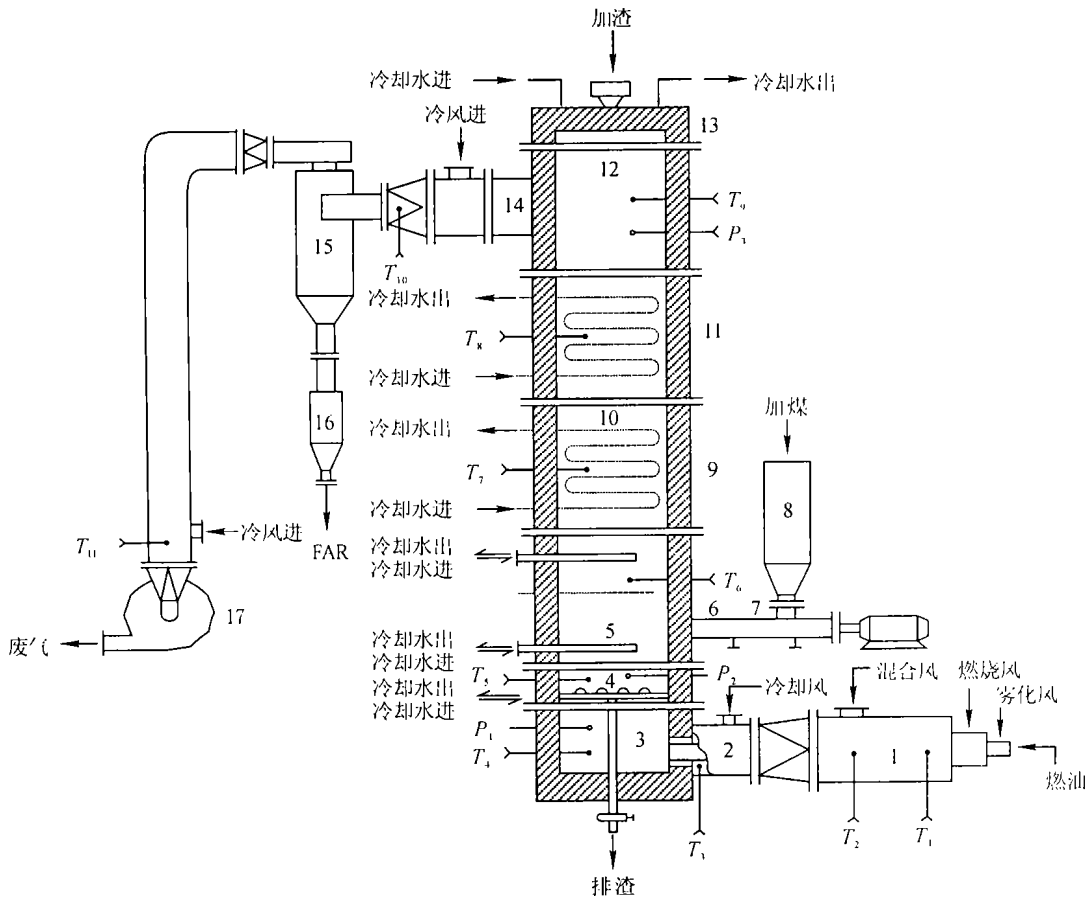
1 试验装置与方法

图 1 所示为模拟增压流化床锅炉启动试验装置系统流程图. 床层有效面积 0.4356 m^2 , 有效高度 4m. 启燃室内装有高效短焰油燃烧器、旋流混风器和高温烟气混合通道. 模拟压力壳内通入少量的冷却风, 以阻止高温烟气的外溢. 排渣管位于水冷布风板的中央. 沸腾段内部有可

* 收稿日期: 2001-07-18

基金项目: 国家“八五”攻关项目资助(85-205-02-02-04)

作者简介: 段钰峰, 1963-, 博士, 东南大学洁净煤发电和燃烧技术教育部重点实验室教授, 主要从事煤燃烧、气化的研究.



1. 启动燃烧室 2. 热烟气通道 3. 风室 4. 水冷布风板 5. 活动受热面 6. 沸腾段 7. 螺旋给煤机 8. 煤斗 9. 悬浮段 10. 蛇形管受热面 11. 悬浮段 12. 悬浮段 13. 水冷炉顶 14. 炉膛出口 15. 除尘器 16. 收尘器 17. 引风机

图 1 实验室规模 PFBC 模拟启动燃烧室装置系统流程图

调式水冷换热埋管数根,侧面是螺旋给煤机.置于布风板上下两侧和悬浮空间的静压测点可反映布风板和床层阻力.在悬浮段和 内还装有水冷蛇形管,以冷却高温烟气.悬浮段 侧面是烟气出口管,炉顶采用水冷结构,其上有加渣装置,通过它向床内加底料.为使旋风除尘器不超温,在其上游掺进冷风.试验中所有的风、油、(高压)气、水管路都配以流量显示仪表;温度 $T_1 \sim T_{11}$,静压 $P_1 \sim P_3$ 则通过各自的传感器在表盘上直接读数或记录.

试验时,轻柴油通过油喷嘴被雾化后,与同轴进入的旋转燃烧风相混合,点燃后在启燃室内形成短焰火炬,燃烧温度控制在1200 左右.经旋流混风器的冷风掺混后,烟气温度降至900 以下,随后进入风室.在风室入口四周有一环形主燃空气通道,启动时通以少量冷却风.热烟气经水冷布风板流化床料,使其温度逐渐升高,至煤的挥发份燃点以上,投煤即可燃烧;当燃烧稳定后即完成启动过程.

2 试验结果及讨论

共进行了 22 个工况的 PFBC 锅炉启动过程模拟试验.表 1 列出了部分工况参数.每个工况只改变一个参数,以研究单因素对启动过程的影响规律,包括加煤床温、加煤速率、埋管受热

面积、静止床高、风室烟温、烟气流量和煤种变化等对床层冷启动过程的影响. 试验主要煤种为中试装置的设计煤种徐州韩桥烟煤, 粒度 $0 \sim 6\text{mm}$, 热值 19.76MJ/kg . 此外还试验了阳泉无烟煤, 常州卜弋贫煤和焦作无烟煤矸石混煤, 其热值分别为 24.19 、 11.36 和 6.04MJ/kg .

表 1 启动燃烧试验工况参数

工况 号 NO.	风室 烟温	烟气 流量 Nm^3/h	静止 床高 mm	埋管受 热面积 m^2	加煤 床温	停油 床温	停煤 床温	加煤 速率 kg/h	煤种	热启动 床温	补燃 油量 kg/h	热启动 加煤量 kg/h	停油 床温	停煤 床温	最高 床温
1	650	666	164	0.13	450	700	980	110	徐烟	/	/	/	/	/	1000
2	677	695	143	0.13	400	700	1000	110	徐烟	/	/	/	/	/	1020
3	690	950	138	0.13	585	700	930	110	徐烟	/	/	/	/	/	945
4	653	947	138	0.13	575	760	800	60	徐烟	/	/	/	/	/	810
5	716	856	135	0.25	460	710	935	110	徐烟	/	/	/	/	/	950
6	662	856	147	0.36	460	700	880	110	徐烟	/	/	/	/	/	910
7	704	873	261	0.36	455	700	875	110	徐烟	/	/	/	/	/	890
8	673	996	316	0.47	455	800	905	110	徐烟	/	/	/	/	/	920
9	679	902	561	0.97	450	800	920	110	徐烟	/	/	/	/	/	930
11	707	1022	358	0.56	455	755	950	150	徐烟	/	/	/	/	/	965
12	779	1022	358	0.56	460	710	920	150	徐烟	/	/	/	/	/	980
13	618	858	358	0.56	470	710	965	150	徐烟	/	/	/	/	/	980
14	714	1240	358	0.56	455	725	925	150	徐烟	/	/	/	/	/	940
16	683	1087	358	0.56	450	720	980	150	徐烟	/	/	/	/	/	995
17	752	938	357	0.56	590	840	960	196	常贫	/	/	/	/	/	980
20	850	1169	358	0.56	700	750	980	150	阳无	/	/	/	/	/	1000
22	802	1216	367	0.56	625	765	1000	330	焦混	/	/	/	/	/	1020

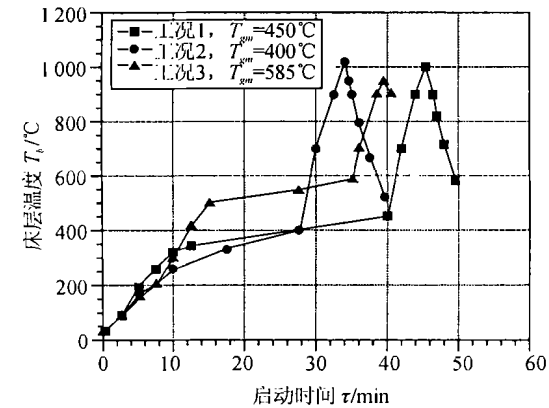


图 2 不同加煤床温的启动温升曲线

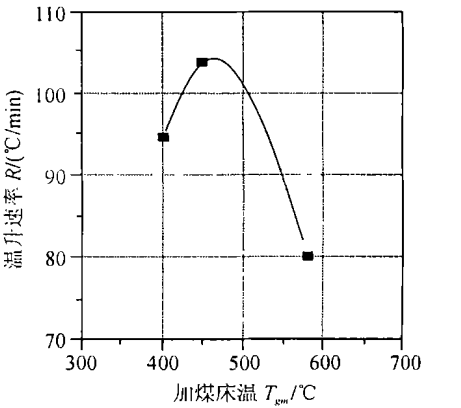


图 3 不同加煤床温的启动温升速率

2.1 加煤床温的影响

图 2 所示为加煤床温分别为 $T_{gm} = 400$ 、 450 和 585 时的启动温升曲线. 每一启动过程都可分为三个阶段: 首先是惰性床料(流化床炉渣)的快速温升阶段, 起因于启动初期热烟气与床料具有较大的温度差. 其次为床料的缓慢温升阶段, 取决于烟气流经床层的净热流量、床料的热惯性、床内受热面吸热量以及炉体的散热. 第三阶段是加煤后, 煤釋出挥发份并燃烧, 同时伴随着炭的燃烧放热, 床层急剧升温过程. 该过程又随加煤量的不同而出现两种情况: 一是加煤

速率选取适当,使床温稳定在流化床的燃烧温度,如 850~950 之间;二是加煤速率过大或过小,床温超过或达不到该温度,此时可通过调整加煤量,使床温回复到所要求的温度.由于本试验的目的在于探讨增压流化床启动运行参数对启动过程的影响规律,并考察中试 PFBC 启动系统的结构合理性和可行性,因此在启动过程中保持加煤速率不变,待床温达到或超过炭的燃烧温度以后,即停煤;伴随着床温的下降,就完成了—个启动过程.

试验表明,在热烟气连续加热床料的情况下,在床温达到 400 以上时投煤(工况 2),经 3~5 min 即可点燃流化床.这是因为烟煤在 400 以上即具有较快的挥发份析出速率,与烟气中的过剩氧气达到一定的燃料化学当量比时,其中的气态烃就会首先达到着火条件而燃烧^[5],从而使煤粒周围的气体温度迅速升高,进而引燃焦炭,促使残留在煤中的挥发份在短时间内逸出,直到焦炭整体燃烧完毕.碳粒燃烧放热使床温迅速提高,使后来加入的煤在较高的床温下,又进一步加快了煤中挥发份的析出速率和炭的燃烧.因此从开始加煤后,床温的温升速率急剧增大,这是热烟气点燃流化床的共同特点.总启动时间一般为 30~50 min.

加煤床温对启动的影响还表现在加煤以后床温的温升速率 R 上,如图 3 所示.本文中温升速率定义为加煤以后床层的最大温升和加煤时间的比值.随加煤床温 T_{gm} 增大, R 也增大.但在 T_{gm} 由 450 提高到 585 时, R 出现了下降.本文认为是流化数较高引起的(见表 1 工况 3).因试验时加煤口超过了膨胀床高,采用的是负压给煤方式.又由于细煤粒和气体可燃物的扬析损失和流化速度的四次方成正比^[6],因此,床温越高,流化速度越高,扬析损失越大,导致煤的化学能损失增加,使加煤后床层的温升速率反而降低.这在热烟气启动流化床时应予避免.由此可见,在热烟气启动流化床时,宜采用正压给煤方式,适当控制流化速度并选取适当的加煤床温.

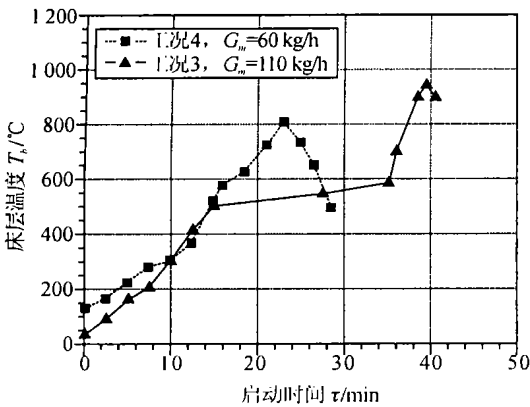


图 4 不同加煤速率的启动温升曲线

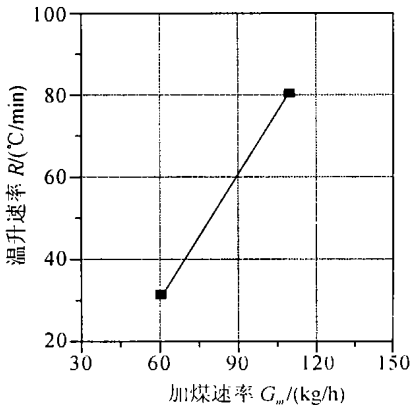


图 5 不同加煤速率的启动温升速率

2.2 加煤速率的影响

改变加煤速率 G_m 的启动温升曲线见图 4,当 G_m 由 60 kg/h 提高到 110 kg/h 时,因加煤的起始床温不同,分别为 $T_{w0} = 30$ 和 130,因此达到床层稳定着火的时间有所差异.从图 5 的温升速率看,加煤速率较高时,床层的温升速率明显提高.然而,实际运行中宜采取适当的加煤速率,以避免床内蓄能过大而引起结焦;或燃料提供的热量不足以达不到床层着火温度.

2.3 埋管受热面的影响

床内埋管受热面积 H 对床层的温升速率和启动时间影响很大,如图 6 所示.当 H 由工况

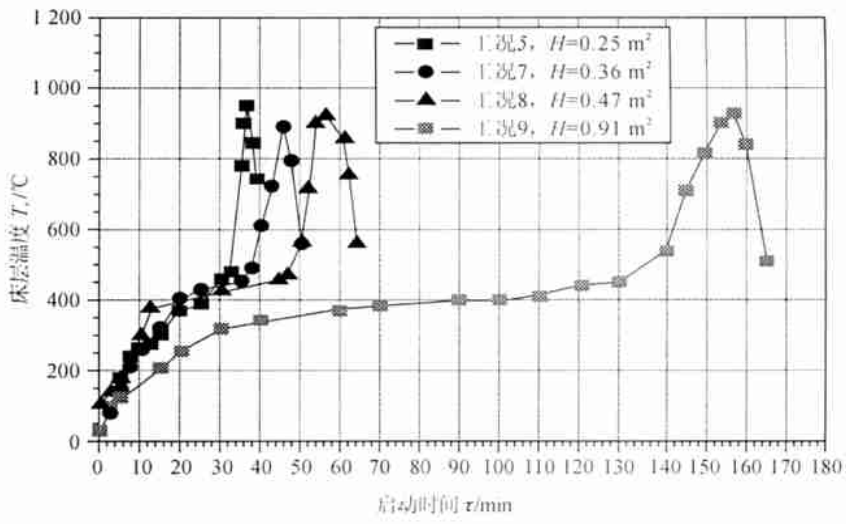


图 6 不同埋管受热面的启动温升曲线

5 的 0.25 m^2 增大到工况 9 的 0.97 m^2 , 由于埋管吸收了
大量热量, 启动时间延长, 从 35 min 延长到 155 min . 加煤
以后, 随埋管受热面的增大, 床层的温升速率约呈指数
规律下降(图 7). 因此为加快启动过程, 输入炉内的烟气
显热和加煤速率要与床内埋管受热面积相适应.

2.4 静止床高的影响

静止床高 H_0 对床层启动过程和温升速率的影响见
图 8 和图 9 所示. 随 H_0 的增大, 床层的热惯性增大, 启
动时间有所延长. 床层的温升速率则随静止床高的增大
而降低.

2.5 热烟气温度的影响

由图 10 和图 11 可见, 当热烟气温度 T_{wb} 从工况 13
的 618 变化到工况 12 的 779 时, 床层的启动时间明

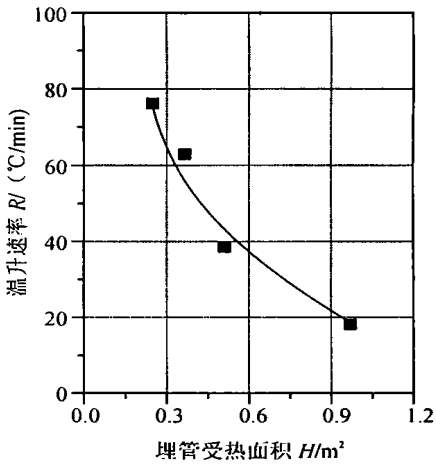


图 7 不同埋管受热面的启动温升速率

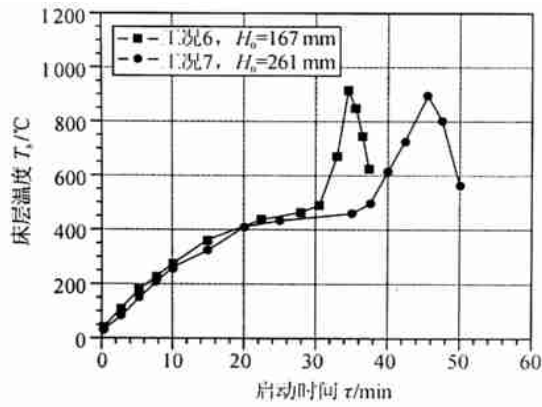


图 8 不同静止床高的启动温升曲线

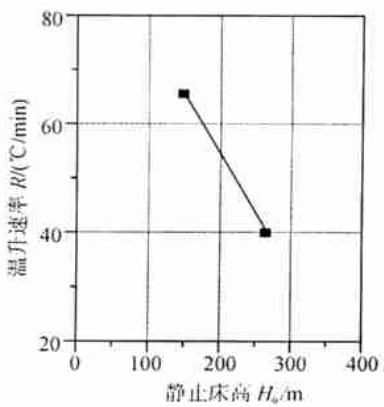


图 9 不同静止床高的启动温升速率

显缩短, 温升速率明显提高. 试验中使用了水冷布风板, 因此风室烟温得以在 650 ~ 850 之间. 应用到增压流化床启动时, 为使燃油量和流化速度不至过高并考虑到风帽材料的耐温特性, 风室热烟气温度控制在 700 ~ 800 之间较为合适.

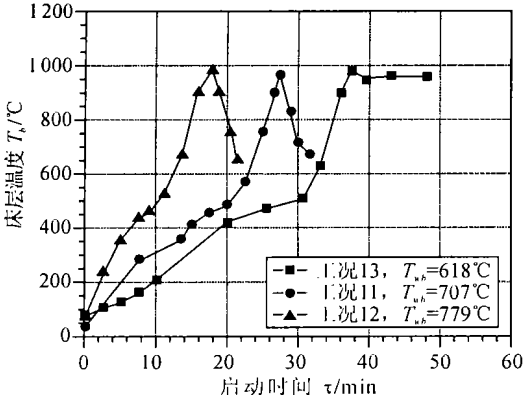


图 10 不同热烟气温度的启动温升曲线

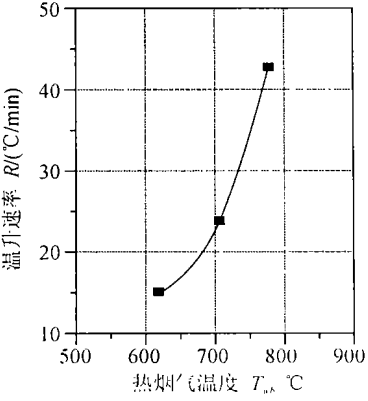


图 11 不同热烟气温度的启动温升速率

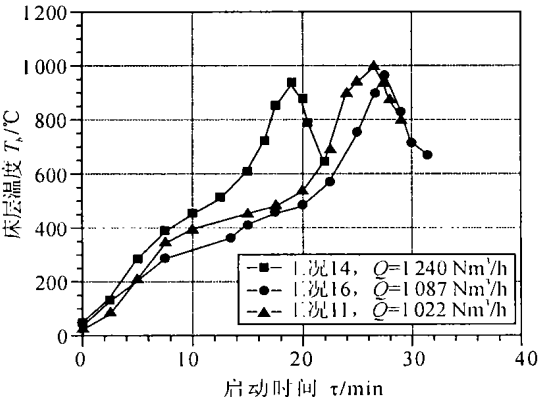


图 12 不同热烟气流量的启动温升曲线

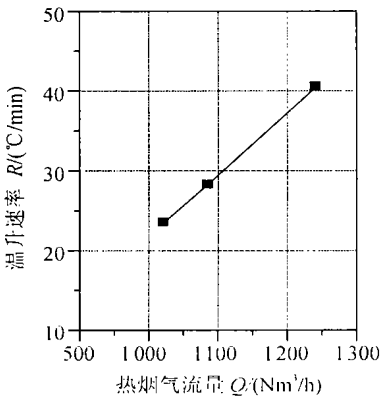


图 13 不同热烟气流量的启动温升速率

2. 6 热烟气流量的影响

热烟气流量 Q 对启动过程的影响与热烟气温度的影响相似, 因流速增大, 提高了热烟气与床料的传热系数, 加快了床料的温升速率, 缩短了启动时间, 如图 12 和图 13 所示. 当 Q 由工况 11 的 1022 Nm^3/h 增加到工况 14 的 1240 Nm^3/h , 床层温升速率相应提高, 启动过程明显加快. 同样, 烟气流量的选择也需考虑热利用率和扬析损失的综合影响.

2. 7 不同煤种的启动特性

本文试验中, 除主要煤种徐州韩桥烟煤以外, 还研究了阳泉无烟煤、常州卜弋贫煤和焦作无烟煤矸石混煤, 共计四个煤种的启动特性. 考虑到不同煤种的特性差别, 如挥发份和发热量等不同, 对不同煤种采用了不同的加煤床温 T_{gm} , 加煤速率 G_m 和热烟气温度 T_{wb} , 见表 1 所示. 各煤种的启动温升曲线示于图 14. 可见, 含挥发份较多的徐州韩桥烟煤的启动时间最短, 在 450 加煤时, 总启动时间只需 20 min; 挥发份较少的阳泉无烟煤, 因其固定炭较多, 燃点高, 启动时间最长, 在 850 的风室烟温和 700 时加煤, 总启动时间接近 100 min, 是徐州韩桥烟煤

的 5 倍. 其它两煤种则介于上述两者之间.

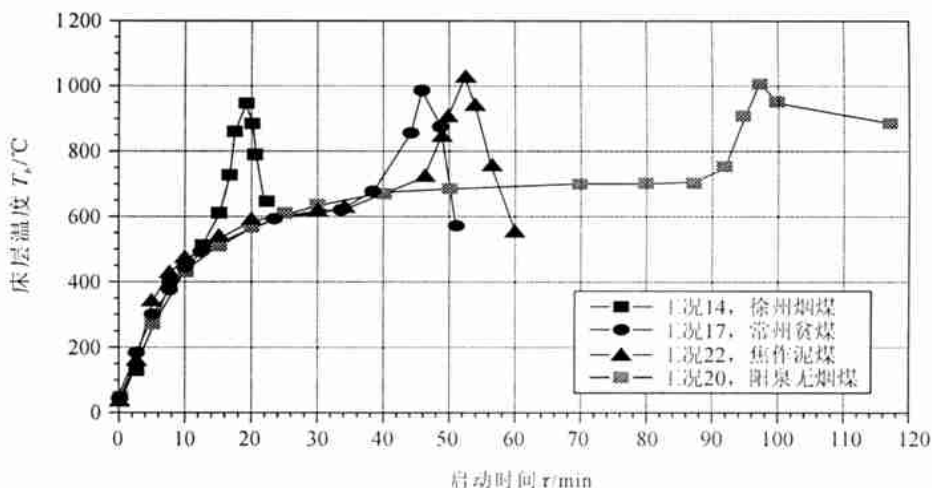


图 14 不同煤种的启动升温曲线

3 结论

增压流化床热烟气点火启动系统的设计需考虑其结构的特殊性. 本文的模拟增压流化床燃烧室采用了高温烟气与主燃空气同风室结构. 在模拟的增压流化燃烧室内, 对启动的全过程进行了较为系统的试验研究. 结果表明, 该系统结构简单、实用, 能满足增压流化床的启动要求. 由于该技术具有热利用率高、快速方便和安全可靠的特点, 不仅可用于增压流化床锅炉的启动, 也可用于常压流化床锅炉的启动.

在热烟气启动流化床时, 宜采用正压给煤方式; 当采用烟煤点火时, 床层温度超过 450 以上即可投煤并点燃床层. 加煤速率和流化速度要选取合适. 不同煤种要采用不同的加煤床温、加煤速率、热烟气温度和流量.

床内埋管受热面积对床层的温升速率和启动时间影响很大. 为加快启动过程, 输入炉内的烟气显热和加煤速率要与床内埋管受热面积适应. 风室热烟气温度控制在 700~800 之间较为合适.

[参考文献]

- [1] 章名耀. 增压流化床联合循环发电技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998
- [2] 吴新. 热烟气启动流化床的数学模型[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(1): 125 ~ 128
- [3] W Xin. Experimental Study on Fluidized-bed Start-up Process with Hot Gas [J]. International Journal of ENERGY RESEARCH, 1998, 22(11): 981 ~ 990
- [4] 陈晓平. 水冷布风板传热特性试验研究[J]. 锅炉技术, 1999, 30(10): 14 ~ 17
- [5] 徐旭常. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [6] Kunii Daizo, Levenspiel Octave. Fluidization Engineering[M]. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1991

(下转第 45 页)

[参考文献]

- [1] 北大高智电子开发中心. CS5460A 使用说明[S]. 2000
[2] CIRRUS LOGIC 公司. Power Meter Reference Design Board and Software[Z]
[3] 余永权. ATME1 89 系列 Flash 单片机原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998

Field-Corrector Implemented with CS5460A for Single-phase Electrical Power Meter

Mao Mingrong¹; Wang Qihong²

(1. President's office, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC;

2. College of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing, 210097, PRC)

Abstract: The paper introduces the functions of CS 5460A as well as its interface to microprocessor. The system block diagram is discussed including its software programming and problems to be treated during debugging.

Key words: CS5460A, electrical power, field-corrector, interface

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 13 页)

Study on Characteristics of Start-up Process In a Simulated Pressurized Fluidized Bed Combustor

Duan Yufeng¹, Zhao Changsui¹, Chen Xiaoping¹, Jin Baosheng¹,
Xu Shengrong², Wang Yiren², Zhang Zhilun³

(1. Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education,
Southeast University, Nanjing, 210096, PRC;

2. College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210097, PRC;

3. Harbin boiler Works Co. Ltd., Harbin, 150041, PRC)

Abstract: Study on characteristics of start-up process using hot flue gas is carried out in a simulated Pressurized Fluidized Bed Combustor (PFBC) with a similar water-cooled distributor and wind-box configuration to the pilot scale PFBC boiler. Coal acceptability is tested in starting up the fluidized bed using hot flue gas based on four different coals including bituminous coal, anthracite, lean coal and gangue blending anthracite. Effects of parameters, such as bed temperature when coal is fed, coal feeding rate, in-bed heat transfer tubes, static bed height, hot gas temperature and flow rate, on the start-up process is investigated thoroughly. Variations of elevation rate of the bed temperature under various conditions are also conducted.

Key words: Pressurization, fluidized bed, start-up, characteristic

[责任编辑: 严海琳]