

片状化石燃料的循环流化床燃烧(II)

——片状颗粒在循环流化床的运行表现和片状颗粒在密相区和稀相区的行为

刘柏谦¹⁾ 郭勇¹⁾ 赵禹民¹⁾ 王金鑫²⁾ 戚峰²⁾

1)北京科技大学机械工程学院,北京 100083 2)北京昊煜公司电厂,北京 100083

摘要 测试了燃烧京西无烟煤循环流化床锅炉的实际运行参数,分析了颗粒度分布、球形度变化等特征对锅炉运行的影响.研究了片状无烟煤颗粒在循环流化床燃烧过程中的行为.研究表明,颗粒的片状形貌对炉膛密相区和稀相区的颗粒度分布、平均悬浮密度分布有着重要影响,是造成炉膛温度大幅度波动和扬析量大幅度波动的直接原因.

关键词 循环流化床; 燃烧; 锅炉; 无烟煤; 颗粒形貌; 扬析

分类号 TK 16

流化床燃烧技术有两个重要的理论和技术内容,一是流态化理论与技术,二是燃烧理论与技术.从流态化角度看,组成流化床的颗粒的性质,包括密度、粒度分布、形貌特征等因素影响着流态化的质量;从燃烧角度看,粒度分布、颗粒成分、化学活性及流态化质量影响着燃烧质量^[1-4].因此,颗粒自身的性质对流化床燃烧过程有着十分重要的影响.文献[5]将京西无烟煤作为典型的I类无烟煤,王平村煤是片状化非常严重的京西无烟煤,在流化床燃烧过程中,不仅表现出不易烧透、大颗粒严重沉积等不良现象,锅炉运行起来,还需经常放冷渣,严重时每10 min就得放一次渣.运行风室风压经常在8~10 kPa下运行,而只有在9 kPa以上时,运行人员才感到锅炉运行稳定.发电标准煤耗已经接近 $900 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.为了降低发电煤耗,北京科技大学和昊煜公司对京西无烟煤和该公司的循环流化床锅炉进行了运行考察联合研究.

1 50 MW 循环流化床锅炉锅炉

1.1 锅炉规范

北京昊煜公司50 MW循环流化床锅炉1997年7月投入运行.过热蒸汽温度 450°C ,给水温度

收稿日期:2004-04-10 修回日期:2004-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助课题(No.50476082)

作者简介:刘柏谦(1958—),男,教授

150°C ,排烟温度 150°C ,设计床温 $900\sim 1000^\circ\text{C}$,设计炉膛出口温度 800°C ;锅炉设计效率81.1%.

1.2 燃料和锅炉结构

锅炉设计燃料特性为 $C_{ar}, 48.67\%$; $H_{ar}, 0.74\%$; $O_{ar}, 2.92\%$; $N_{ar}, 0.4\%$; $S_{ar}, 0.14\%$; 灰分 $A_{ar}, 43\%$; 水分 $M_{ar}, 4.13\%$; 挥发分 $V_{daf}, 6.0\%$; 发热量 $Q_{ar,net}, 16875 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.其中下标ar代表收到基,daf代表无灰干燥基.

这台锅炉在结构上与其他循环流化床锅炉不同的是密相区截面积大,稀相区截面积小,炉膛下部截面 $3730 \text{ mm} \times 5230 \text{ mm}$,上部截面 $2830 \text{ mm} \times 5230 \text{ mm}$,两者的截面积比为1.318.如果不考虑温度变化的影响,密相区和稀相区将有1.318倍的表现速度差别.即当密相区处于鼓泡床运行时,稀相区有可能已进入循环流化床锅炉的运行范围.上部高度约13 m;密相区埋管受热面积 61.146 m^2 ;炉膛稀相区布置受热面 223.7 m^2 ,过热器受热面 303.7 m^2 ,省煤器受热面 728 m^2 ,空气预热器受热面 1056 m^2 ,布风板面积 18.36 m^2 .

1.3 颗粒形貌特征对锅炉运行的影响

考察要求操作人员按照工作习惯操作,主要表现为:运行人员以床层温度为主要监控对象,为了保证床层温度,采用频繁放冷渣进行调整.记录的风室压力为周期性波动,周期大致为10~29 min左右.排放的冷渣由铁矿车拉走,根据铁矿车的容积可以估算出冷渣排放量.

图1为锅炉运行时床温变化、风室压力变化和流化风速变化。图1(c)可见,为维持良好燃烧状态,炉膛出口温度比设计温度高出约 40°C ;由于流化床下部装有埋管,埋管上下的温度相差约 40°C ,但都在设计床温范围内。图1(b)可见,按运行人员操作习惯,20min左右要放一次冷渣,冷渣量约为2t。表现在风室压力变化呈周期性波动。床温下降过程就是放冷渣过程,冷渣放完,床温又继续上升。运行人员的运行调整已经不像其他流化床锅炉那样根据风室压力调整运行,而是根据运行床温来决定放冷渣的频繁程度。图1(a)显示,运行时由于片状颗粒沉积造成风室压力比要求的风室压力大出许多,运行风速已经处于比较特别的运行范围。流化床底部运行风速介于 $4\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,比鼓泡流化床锅炉高,比循环流化床

低。而炉膛上部运行风速大约在 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近,已经高于目前循环流化床锅炉的运行风速。由于运行风速高所造成的磨损等问题,也会在长时间运行后表现出来。

2 运行状况分析与讨论

2.1 布风板不适应燃料特性

(1)燃料球形度特性。通常无烟煤热值高、硬度大、破碎后没有明显的复杂形状。但京西无烟煤与普通无烟煤相比,表现出不同特点。京西无烟煤受热以后表现出明显的热裂性。颗粒受热以后,沿着纹理破碎成明显的片状颗粒。实际测量显示,冷渣的球形度比原煤的球形度低一个数量级。说明床料的球形度比原煤小,片状颗粒在流化床底部沉积。如果不能及时排出,将增加鼓风机负荷。排冷渣周期延长2h后,冷渣含碳量只降低 $0.21\%\sim 0.23\%$,未完全燃烧热损失降低 $0.088\%\sim 0.096\%$ 。说明延长大颗粒在炉内停留时间不能收到显著效果。

(2)布风板阻力。单孔风帽有两个优点:一是自身阻力低,适应循环流化床高速运行;二是定向吹风,可以造成颗粒在布风板上定向运动。但这台循环流化床锅炉在炉膛下部的运行风速约为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比鼓泡流化床略高,比循环流化床低。测定的冷态运行风速为 $1.068\sim 0.970\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于采用 $0\sim 8\text{ mm}$ 粒度的I类无烟煤,推荐的冷态流化风速为 $0.7\sim 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,运行风速已经明显偏高。根据对单个单孔风帽的测定,在运行范围内,布风板运行阻力大约为 2 kPa 左右,而风室压力测量值为 $8\sim 9\text{ kPa}$ (最高 11 kPa)。则床料的压降在 $6\sim 7\text{ kPa}$ 。而推荐的I类无烟煤的风室压降为 $4.5\sim 6.5\text{ kPa}$ 。表明至少有 $1.5\sim 2.0\text{ kPa}$ 左右的压降消耗在含碳量已经接近最小值的大颗粒床料上面。

2.2 炉膛热力责任分配

(1)埋管受热面。埋管规格和布置结构:埋管规格为 $\phi 57\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,横向节距 200 mm ,纵向节距 130 mm ,横向管22排,纵向管4排,埋管倾角 15° ,埋管面积 61.146 m^2 ,根据经验,燃料热值为 $16875\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}>12560\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,鼓泡流化床所需要的埋管面积为 $60\sim 80\text{ m}^2$ 。由于无烟煤热值大,故在取值上偏于较小值。

(2)水冷壁和顶棚总受热面积为 223.7 m^2 。50 MW鼓泡流化床上部受热面积应该为 $75\sim 140\text{ m}^2$,

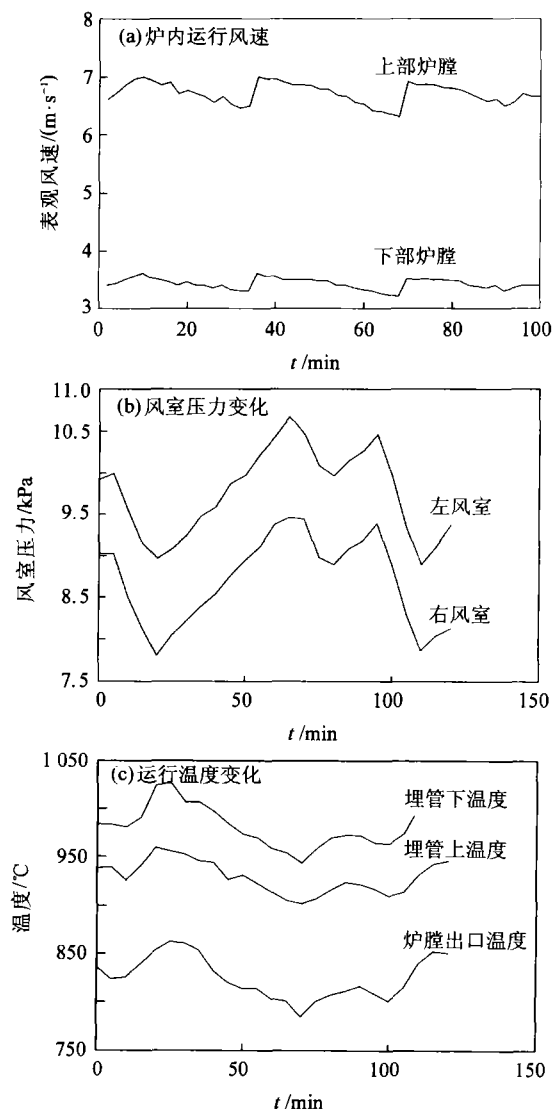


图1 实际运行参数
Fig.1 Operating parameters

采用膜式壁的循环流化床上部受热面积为 210~230 m². 由于炉膛上部截面缩小 1.3 倍, 运行风速约提高约 1.3 倍, 已经达到约 6 m·s⁻¹, 超过目前循环流化床的运行风速, 应该认为此部分受热面积足够 50 MW 蒸发量用^[2]. 但由于炉膛高度不够, 造成了炉膛水冷度偏高以及悬浮可燃物停留时间过短同时存在, 增大了燃烧损失. 其情形严重到燃料含碳量为 48.68%, 飞灰含碳量 40%~42%. 也就是说炉膛中只燃烧了 6% 的挥发分和 6%~8% 的固定碳(忽略冷渣损失).

3 颗粒在密相区和稀相区的表现

气固流态化体系中, 片状颗粒与球形颗粒的流化行为相差十分巨大. 不仅在密相区表现出压力的明显喘动, 导致流化床扬析颗粒量出现巨大波动, 进而导致炉膛温度大幅度波动; 而且扬析起来的颗粒也表现出明显的随机行为. 一方面表现在不同炉膛高度上颗粒度分布相似并相近; 另一方面, 显示扬析颗粒量明显大于同工况下球形颗粒的扬析量. 在循环流化床正常运行风速下, 一定炉膛高度上取样发现了许多不可能扬析起来的大颗粒; 在不同运行工况下取样分析发现, 当其他条件不变时, 扬析颗粒度有随着炉膛运行温度变化的趋势. 当炉膛温度升高, 扬析颗粒明显变粗.

3.1 运行表现

这样一台结构上与众不同, 燃用片状颗粒的循环流化床锅炉运行时有一系列的特殊表现: (1) 当风量进行调节以后, 密相区温度反应迟钝, 时间延迟是以分为单位计算的; (2) 床温波动很大; (3) 与其他循环流化床相比, 要求较大的运行风速, 因而密相区平均颗粒密度较小; (4) 循环灰和冷渣对密相区温度有非常大的影响; (5) 机械不完全燃烧热损失主要表现在很高的飞灰含碳量; (6) 只有当密相区温度达到一定高度后, 才可以与其他循环流化床锅炉一样, 依靠调节风煤比例来调节锅炉负荷和运行床温.

3.2. 密相区和稀相区的颗粒行为

为弄清楚片状颗粒的稀相区行为, 测量了几个高度上的平均悬浮密度, 取样分析了不同运行工况、不同炉膛高度悬浮颗粒的颗粒度分布. 图 2 是不同运行工况下沿着炉膛高度的平均悬浮密度分布.

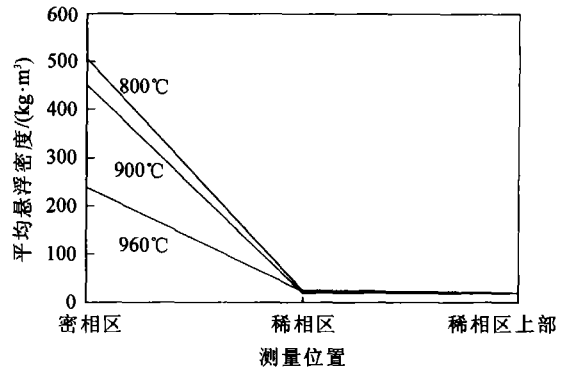


图 2 平均悬浮密度与床温的关系

Fig.2 Relations of the average suspension density with furnace temperature

由图 2 可见, 在循环流化床正常的运行参数范围内, 随着温度的上升平均悬浮密度下降, 当炉膛温度达到 960°C 时, 密相区平均悬浮颗粒密度降到 880°C 运行工况时的 1/2 以下, 说明密相区气固两相的流态化行为已经发生明显的改变. 而此时, 燃烧达到非常稳定的状态, 可以依靠调节风煤供应来控制运行.

从图 3 可见, 随着炉膛温度上升, 密相区平均颗粒密度明显下降. 而在稀相区, 前三个工况为下降趋势, 达到 960°C 时, 平均悬浮密度出现反弹, 也说明 960°C 工况与前三种工况发生了近乎质的变化.

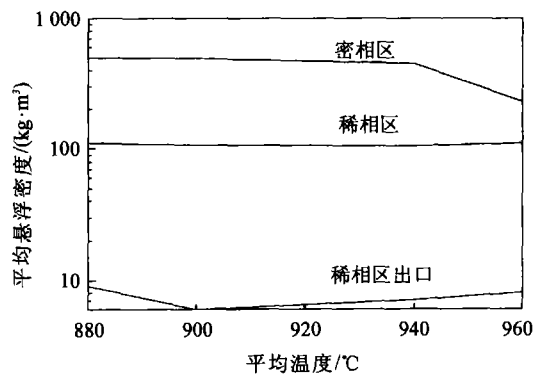


图 3 平均悬浮密度与床温和床高的关系

Fig.3 Relations of the average density with operation temperature along the furnace height

图 4 是不同运行工况下密相区颗粒度分布. 由图可见, 随着温度上升, 密相区颗粒变粗. 其原因可能是随着温度提高, 表观气速上升, 平均扬析量上升, 使得密相区存留的只剩下大颗粒, 这一现象也可从图 5 得到印证.

图 5 是在稀相区取样获得的悬浮颗粒的颗粒度分布. 随着温度上升, 一方面平均悬浮颗粒的颗粒度上升; 另一方面, 随着温度上升, 悬浮颗粒

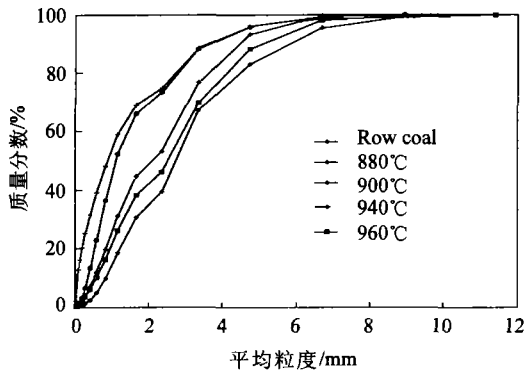


图4 密相区床料粒度分布随温度的变化

Fig.4 Dense bed material size distribution with furnace temperature

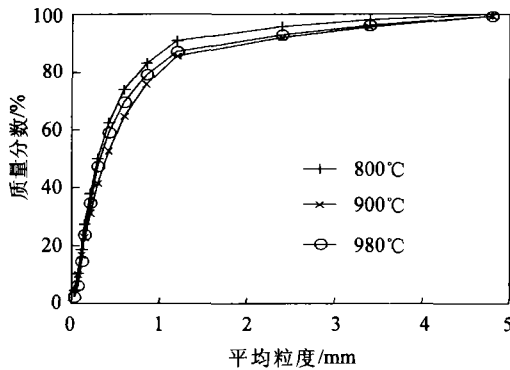


图5 稀相区粒度分布随温度的变化

Fig.5 Particle size distribution in the dilute zone with furnace temperature

分布变粗.表明运行温度变化对气固两相流动有着巨大影响.与瑞典Charlmer大学12MW循环流化床相比,片状颗粒的悬浮密度变化明显,密相区平均密度低,而稀相区平均悬浮密度高.

3.3 炉内参数波动及其与颗粒形貌的关系

(1)温度波动.不同运行工况下炉膛温度波动非常大,导致一系列运行参数的波动,如运行风速波动,扬析颗粒量及其颗粒度分布波动等连锁反应.图6是监视布风板上900mm高度处每个工况连续运行至少2h得到的温度波动.温度上升,则温度波动减小,达到960°C后可以不依赖冷渣排放,而用调节风煤比来控制运行.图7是相同工况下计算得到的表观气速变化.运行温度上升以后,表观气速上升,对颗粒的拖曳作用加强,扬稀量上升.这一点在图5不同工况悬浮颗粒度分布曲线上可以明显看得出来.

(2)表观气速波动.炉膛温度波动将直接引起炉内烟气速度波动.由图7可见,随着炉膛气体体积波动,进而引起表观气速波动.由此而连续引起炉内传热量波动,进而造成锅炉运行参数的不稳定.图8是根据图6和图7的结果计算得到的

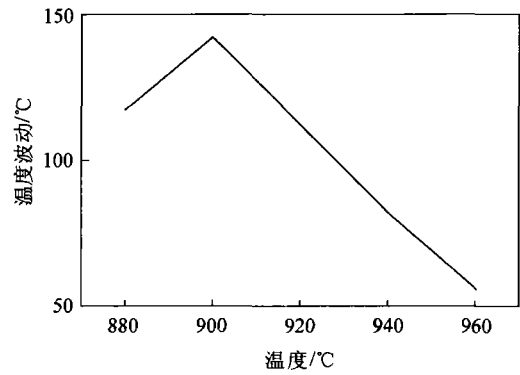


图6 布风板上900mm处温度波动

Fig.6 Temperature fluctuations at 900 mm from the air distributor

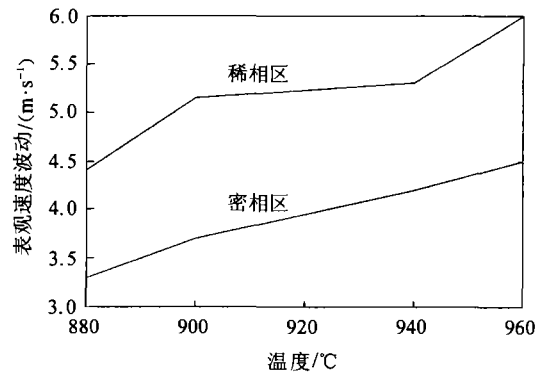


图7 密相区和稀相区的表观速度

Fig.7 Superficial gas velocity at the dense bed and dilute bed

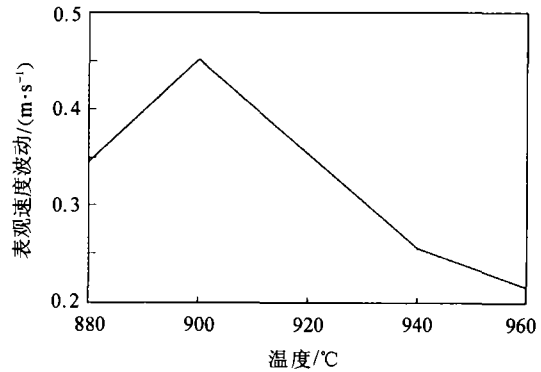


图8 表观速度波动

Fig.8 Fluctuation of superficial velocity

表观气速波动.由图可见,表观气速波动在0.2~0.46 m/s之间,而这一波动范围会跨越几个档次颗粒的颗粒终端速度.可见由于颗粒的片状特征,使得颗粒扬稀充满了不定因素.

4 结论

(1)Krumbein球形度能很好地描述片状颗粒的形貌特征.

(2)京西无烟煤片状特征明显,其球形度比其冷灰高.

(3)片状燃料颗粒的流化床燃烧,运行风室压力高于普通形状颗粒,灰浓度和灰平衡对锅炉运行影响非常大.排放冷渣或循环灰,对炉膛温度影响很大,因而要求特殊的燃烧和返料机构.

(4)片状颗粒形貌是造成循环流化床炉膛温度、表观风速和扬析量波动的直接原因.

(5)炉膛温度波动对密相区和稀相区颗粒尺寸分布有重要影响,将直接影响到炉内传热和锅炉运行参数.炉膛温度越高,密相区和稀相区的颗粒就越粗.

参 考 文 献

- [1] 刘柏谦.煤颗粒形状因子对流化床锅炉燃烧器的影响分析.发电设备,1997,7(1):2
- [2] 岑可法,倪明江,骆仲泱,等.循环流化床锅炉理论设计与运行.北京:中国电力出版社,1998
- [3] 刘柏谦,王金鑫,郭勇,等.片状化石燃料的流化床燃烧(I).北京科技大学学报,2005,27(2):159
- [4] Basu P, Frazer S. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design and Operations. Boston, London, Oxford, Sydney, Toronto, Wellington: Butterworth-Heinemann, 1991. 297
- [5] 层状燃烧及沸腾燃烧工业锅炉热力计算方法.上海:上海工业锅炉研究所,1980

Combustion behavior of chip-like particles in a circulating fluidized bed boiler (II): Effect of particle morphology on fluidization quality in dense and dilute phases

LIU Baiqian¹⁾, GUO Yong¹⁾, ZHAO Yumin¹⁾, WANG Jinxin²⁾, QI Feng²⁾

1) Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Thermal Power Plant of Haoyu Company, Beijing 100083, China

ABSTRACT The effect of particle morphology on the operating parameters of a circulating fluidized bed boiler such as sphericity and size distribution in dense and dilute phases was analyzed, and the combustion behavior of chip-like anthracite was studied through the measured operating parameters. The results showed that particle morphology has huge impact on the average suspension density and particle size distribution in the dense bed and dilute bed of a furnace, and might be the direct reason of the fluctuations of furnace temperature and elutriation.

KEY WORDS circulating fluidized bed; combustion; boiler; anthracite; particle morphology; elutriation