

基于 DBEL 技术超临界“W”火焰锅炉狭缝式 燃烧器煤粉着火燃烧特性研究

高佳佳, 刘鹏远, 徐鹏志, 唐文

(华电电力科学研究院 锅炉及燃烧技术部 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对国产首台基于 DBEL(空压蝶式制动器)技术 600 MW 级超临界“W”火焰锅炉运行中存在的问题,对其新型狭缝式浓淡分离燃烧器煤粉着火燃烧特性开展了相关试验研究,结果表明:新型狭缝式浓淡分离燃烧器中淡相着火较差、浓相稳燃特性受燃烧器配风影响较为敏感,两者是造成锅炉运行效率低和下炉膛安全性差的主要原因。

关键词: DBEL 技术; 超临界“W”火焰锅炉; 着火燃烧特性

中图分类号: TK223.23 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.031

引言

为高效燃用无烟煤和贫煤,国外开发了一种专为燃用无烟煤和贫煤而设计的炉型,即“W”火焰锅炉^[1]。我国自 20 世纪 80 年代末开始大规模从国外引进“W”火焰锅炉,并在近年得到大范围应用。

对“W”火焰锅炉已进行过相关研究,其中以市场占有率最多的 FW 技术锅炉最多^[2-3]。关于 DBEL 锅炉只有少量学者做了研究且多为亚临界参数,并多集中在火焰“偏烧”上,如苗长信等研究了拱部风与墙部风动量流率比、三次风喷口设计、拱部燃烧器安装角度等因素与“偏烧”程度的关系^[4]。关于超临界参数“W”火焰锅炉的研究比较少见。

我国自 2007 年以后,在引进国外亚临界“W”火焰锅炉的基础上自行发展了超临界参数锅炉,超临界“W”火焰锅炉的运行经验表明,除其具有亚临界“W”火焰锅炉运行中的问题外,还存在很多其它问题,如灰渣含碳量高、下炉膛水冷壁频繁超温爆管等,给锅炉安全稳定运行带来很大的隐患。本研究以国内新建基于 DBEL 技术的 600 MW 超临界“W”火焰锅炉为基础,通过试验研究国产自主开发的新

型浓淡分离燃烧器煤粉着火燃烧特性,分析运行中灰渣含碳量高、下炉膛水冷壁频繁爆管等诸多问题的原因,研究结果表明:新型狭缝式浓淡分离燃烧器中淡相着火较差、浓相稳燃特性受燃烧器配风影响较为敏感,两者是造成锅炉运行效率低和下炉膛安全性差的主要原因。研究结果为我国在役超临界“W”火焰锅炉运行、改造及新炉设计提供一定的理论依据。

1 试验系统及方法

锅炉燃烧器采用“多次引射分级燃烧技术”进行燃烧器喷口布置^[5],如图 1(a)所示,锅炉每 2 个粉管组成一组燃烧器,前后拱上各 6 组共 12 组燃烧器,单组燃烧器结构如图 1(b)所示。

试验前选取 F1、B2 燃烧器浓淡相各安装一个测点如图 2 所示,试验时从测点上部将 K 型热电偶伸入一次风浓淡相喷口,测量距喷口出口不同深度煤粉射流温度,判断煤粉着火及燃烧特性。对于无烟煤,当温度达到 1 000 °C 时可以认为该处为煤粉射流的着火位置^[6]。

2 试验结果及分析

2.1 淡相着火特性及影响因素分析

2.1.1 着火特性

锅炉一次风粉管采用双通道叶片式浓淡分离器^[7],可通过调整分离器叶片角度改变进入浓淡相的煤粉量,调节淡相挡板控制淡相空气量,进而控制分离器分离效率。

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2014-10-30

作者简介: 高佳佳(1987-),男,江苏徐州人,华电电力科学研究院工程师。

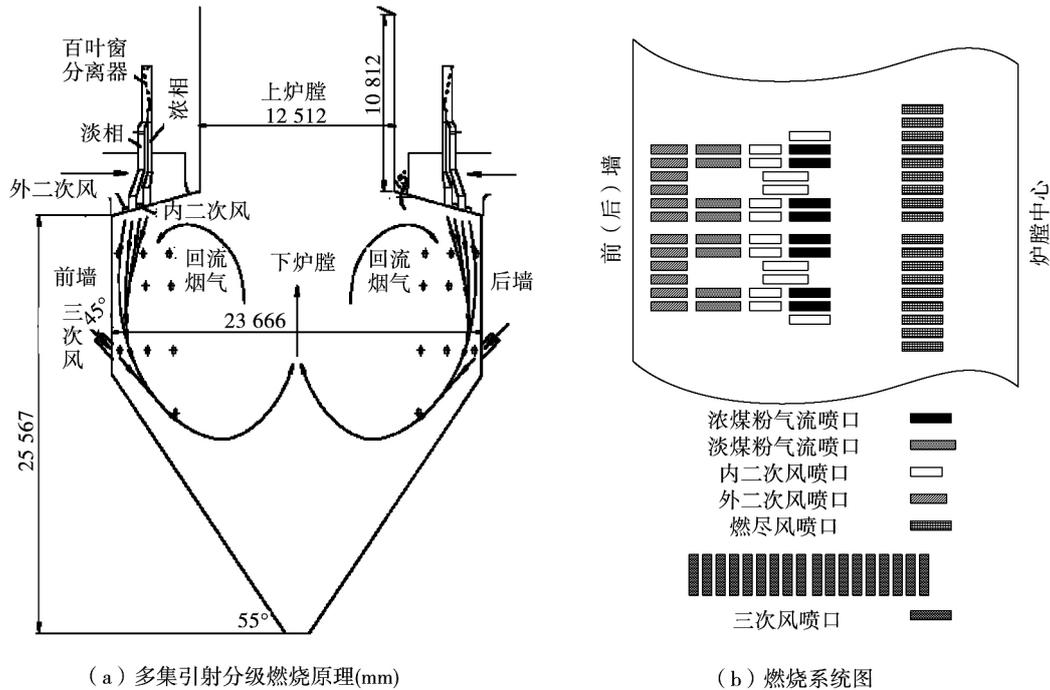


图 1 W 火焰锅炉多次引射分级燃烧原理及燃烧系统图

Fig. 1 The system diagram of multi-injection multi-staging combustion principles and combustion system for the down-fired boilers

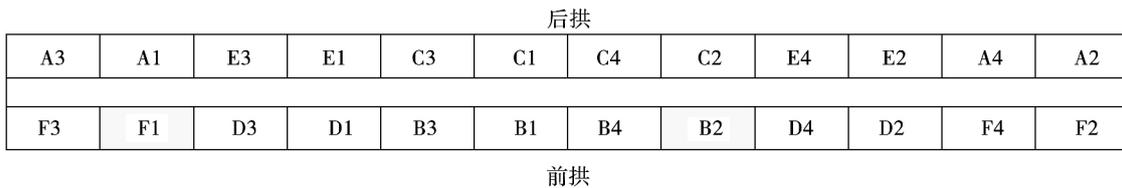


图 2 锅炉燃烧器着火点测点位置示意图

Fig. 2 Schematic drawing of anthracite ignition measuring points of a boiler burner

图 3 为分离器叶片角度 30°、乏气挡板全开时 测点 F1 淡相试验结果 表 1 为对应的试验条件。

表 1 对应图 3 测点 F1 淡相试验条件

Tab. 1 Experimental conditions for fig. 3

工况	负荷 /MW	一次风速 $v_1 / m \cdot s^{-1}$	一次风温 $T_1 / ^\circ C$	二次风挡板开度 /%	二次风温 $T_2 / ^\circ C$	三次风挡板开度 /%	总风量(二、三次风) $/ t \cdot h^{-1}$	燃烬风开度 /%	给煤量(左侧/右侧) $/ t \cdot h^{-1}$
a	550	15.82	100	60	332.5	90.4	118	50.3	13.74/15.43
b	550	15.72	95.67	60	331.1	90.4	123	50.3	15.22/15.33
c	556	25.15	99.96	58	348	97.7	115	50.4	24.52/24.7

由图 3 中工况 a 和工况 b 可看出,当一次风速为 15.7 m/s,二、三次风量及燃烬风挡板开度相同时,测点 F1 淡相温度随射流深度增加而增加,在距喷口距离 3 m 左右射流温度达到 900 °C 左右,可以

认为此时乏气煤粉基本着火,但着火距离较大。由图 3 中工况 a 和工况 c 可看出,当一次风速由 15.82 m/s 增加至 25.15 m/s 时,淡相温度明显降低,距喷口距离达到 3.5 m 时,煤粉射流温度仍低于

500 °C ,即此时煤粉仍未着火 ,由此说明一次风速增加使测点 F1 淡相着火下移。

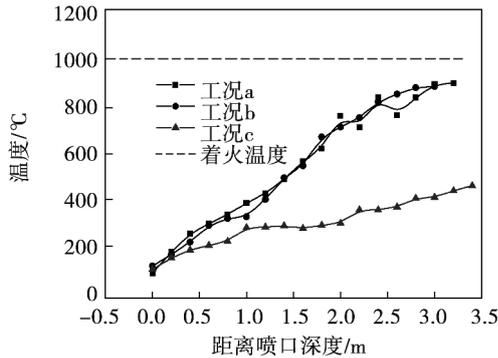


图 3 不同工况下测点 F1 淡相着火特性试验结果
Fig.3 Experimental results of ignition characteristics of F1 fuel – lean mixture in different operating conditions

图 4 为分离器叶片角度 30°、乏气挡板全开时测点 B2 淡相试验结果 ,表 2 为对应试验条件。

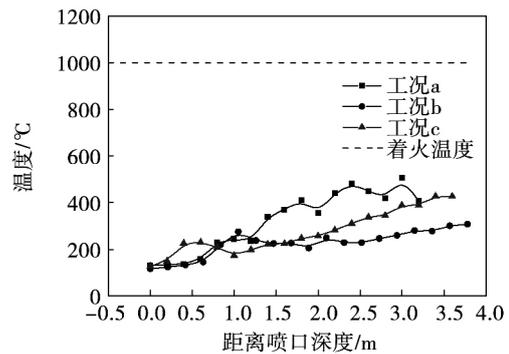


图 4 不同工况下测点 B2 淡相着火特性试验结果
Fig.4 Experimental results of ignition characteristics of B2 fuel – lean mixture in different operating conditions

表 2 对应图 4 测点 B2 淡相试验条件
Tab.2 Experimental conditions for fig.4

工况	负荷 /MW	一次风速 $v_1 / m \cdot s^{-1}$	一次风温 $T_1 / ^\circ C$	二次风挡板开度 /%	二次风温 $T_2 / ^\circ C$	三次风挡板开度 /%	总风量(二、三次风) /t · h ⁻¹	燃烬风开度 /%	给煤量(左侧 / 右侧) /t · h ⁻¹
a	550	31.2	116.5	60.3	321.5	90.5	110.6	50.35	31.57/21.68
b	600	32.62	112.16	60.4	342.5	80.4	110	55.2	24/34
c	600	32.7	115.35	55.3	341	85.3	115	50.4	25.79/25.17

由图 4 可以看出 ,测点 B2 淡相温度随距喷口距离的增加 ,最高温度约在 500 °C 左右 ,说明测点 B2 淡相着火特性较差 ,测量范围内均未着火。从试验条件来看 ,虽然图 4 试验中二、三次风及燃烬风挡板开度不尽相同 ,但一次风速均达到 31 m/s 以上 ,与图 3 工况 a 和工况 b 试验条件对比可以得出 ,此时一次风速较高 ,使测点 B2 淡相温度较低 ,着火较差。

由图 3、图 4 可得出 ,测量范围内淡相煤粉气流着火特性较差 ,受一次风速影响较明显。

2.1.2 影响因素分析

(1) 挡板开度

图 5 和图 6 为不同乏气挡板开度下淡相煤粉射流着火特性的试验结果 ,表 3 为试验条件。

由图 5(a) 可以看出 ,关小乏气挡板后 ,淡相煤粉气流温度均有所提高 ,图 6 为 F1 淡相 4 m 深处随挡板开度变小温度上升的曲线。但从整体来看 ,达到最高点(4 m 深处) 时乏气侧温度仍低于着火温度 ,故乏气挡板关小可改善乏气侧低温环境 ,但不能改善其着火特性。此外 ,对比图 3 中工况 c 和图 5(b) 及其试验条件可看出 ,二、三次风量增加时使淡相煤粉射流温度降低 ,由此说明二次风量(对应风速) 对淡相煤粉温度也有影响。

表 3 对应图 5 测点 F1 淡相试验条件
Tab.3 Experimental conditions for fig.5

工况	负荷 /MW	一次风速 $v_1 / m \cdot s^{-1}$	一次风温 $T_1 / ^\circ C$	二次风挡板开度 /%	二次风温 $T_2 / ^\circ C$	三次风挡板开度 /%	总风量(二、三次风) /t · h ⁻¹	燃烬风开度 /%	给煤量(左侧 / 右侧) /t · h ⁻¹
a	600	15	110	55.2	358	84.8	131	60.3	32/29.3
b	600	25	121	55.3	358	84.8	130	60.3	25/25.2

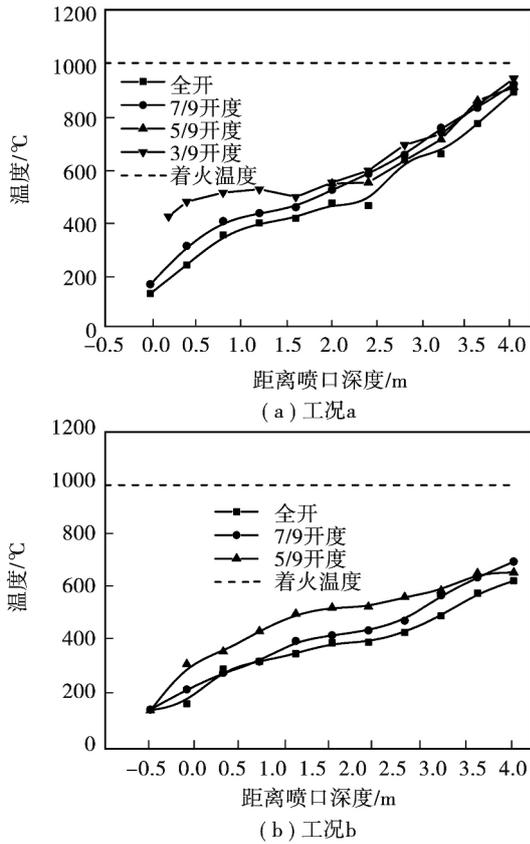


图5 不同乏气挡板开度下测点 F1 淡相着火特性试验结果

Fig. 5 Experimental results of ignition characteristics of F1 fuel-lean mixture in different vent air damper openings

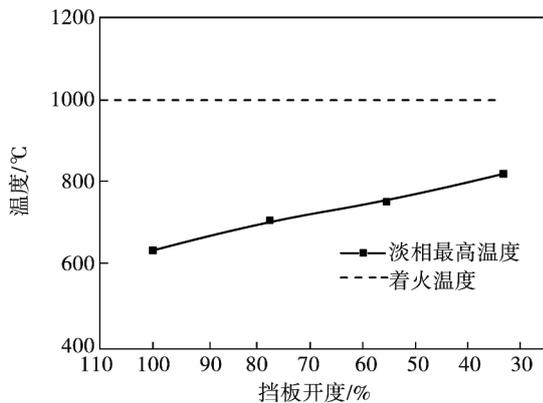


图6 F1 淡相喷口 4 m 深度温度随挡板开度变化曲线

Fig. 6 Temperature changing curve with vent air damper opening at the 4m depth point from F1 burner nozzles

(2) 一次风速

图7 为乏气挡板全开和 7/9 开度不同一次风速下 F1 淡相着火特性。

由图7 可以看出 相同深度下一次风速为 15 m/s 时 淡相温度高于一次风速为 25 m/s 时的温度 速度较低时(15 m/s) 淡相煤粉射流温度约在 4 m 深处才达到 900 °C 左右, 可以认为此时煤粉接近着火, 但着火深度较大 易带来下炉膛水冷壁火焰冲刷隐患。

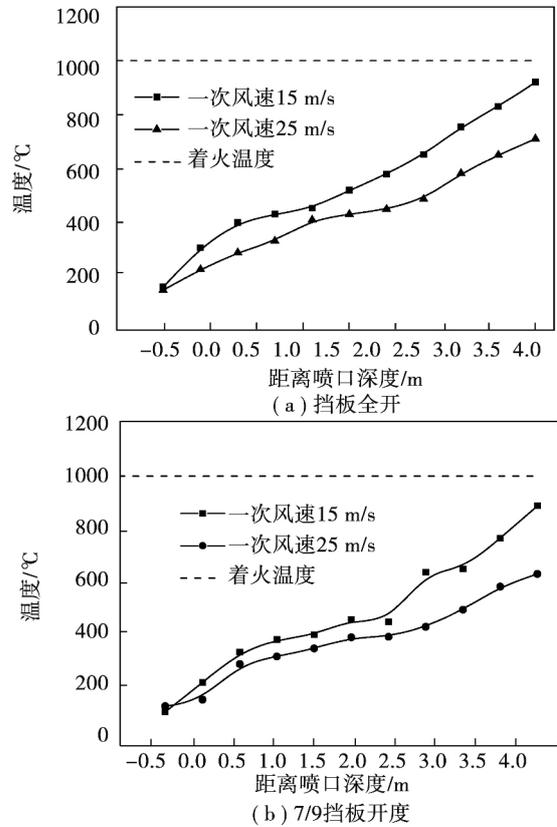


图7 不同一次风速下测点 F1 淡相着火特性

Fig. 7 Ignition characteristic with different primary air speed of fuel-lean side of F1 burner

(3) 浓淡相煤粉分离效果

燃烧器浓淡分离主要依靠上游百叶窗浓淡分离器实现, 设计的百叶窗浓淡分离器分离后浓淡质量比在 4:1 以上, 表4 为百叶窗分离器浓淡分离效果的试验结果, 试验中同时考虑了乏气挡板开度、分离器上游粉管弯头效应等影响因素。

由表4 可以看出 在乏气挡板全开的情况下 浓淡相煤粉质量比为 1.5 - 1.74 远低于设计值(浓淡质量比 > 4:1) 由此可知实际运行时的百叶窗浓淡分离器分离效果较差 导致淡相煤粉浓度远高于设计值。

表 4 不同乏气挡板开度下煤粉
浓淡分离效果试验结果

Tab. 4 Experimental results of separation efficiency of pulverized coal at different vet air damper openings

项目开度	F2 粉管		F4 粉管	
	全开	2/3 开度	全开	1/3 开度
淡相 1/g	-	40.68	68.11	31.35
淡相 2/g	-	61.38	52.81	36.68
淡相总重/g	93.99	102.06	120.92	68.03
浓相总重/g	163.59	205.54	181.02	170.66
淡相百分比/%	36.49	33.18	40.05	28.50
浓相百分比/%	63.51	66.82	59.95	71.50
浓淡比(质量比)	1.74	2.01	1.50	2.51
弯头方向	正向		反向	

煤粉能够正常点火需要充足的氧量和达到着火温度。假设燃烧器设计时配风是按照较大煤粉分离效果来设计配风,此时淡相煤粉浓度远高于设计值,导致淡相煤粉缺氧,使其不易点燃;假设在此高煤粉浓度下煤风比仍在可燃极限内,由前面淡相试验结果及分析可以看出,淡相只在非常苛刻的条件下(一次风速较低、深度 4 m 以上)才能达到 800-900 °C,其它情况下均远低于着火点温度。因此,淡相煤粉燃烧较差主要原因是淡相主燃区温度较低,同时浓淡分离效果差恶化了其着火特性,故改善淡相着火的核心在于提高淡相射流温度。

2.2 浓相着火特性及影响因素分析

图 8 为分离器叶片角度 30°、乏气挡板全开时

表 5 对应图 8 测点 F1 浓相试验条件

Tab. 5 Experimental conditions for fig. 8

工况	负荷 /MW	一次风速 $v_1 / m \cdot s^{-1}$	一次风温 $T_1 / ^\circ C$	二次风挡板开度/%	二次风温 $T_2 / ^\circ C$	三次风挡板开度/%	总风量(二、三次风) / $t \cdot h^{-1}$	燃烬风开度/%	给煤量(左侧/右侧) / $t \cdot h^{-1}$
a	550	24.95	107.95	60	330.3	80.62	117.93	50.2	26.27/20.72
b	556	25.15	99.96	58	348	97.7	115	50.4	24.52/24.7
c	600	24	104	60	336	87.7	131	55.1	21.4/23.2

由图 8(a) 中工况 a 可看出, F1 浓相煤粉射流在距喷口 3 m 内温度随深度增加呈先升高(接近着火温度)再降低的趋势,深度继续增加射流温度又上升,在 4 m 处达到着火温度。

实现稳定燃烧需具备两个条件:(1) 放热量和散热量达到平衡,即: $Q_1 = Q_2$; (2) 放热量对系统温度的变化率大于散热量随系统温度的变化率,即:

测点 F1 浓相试验结果,表 5 为对应试验条件。

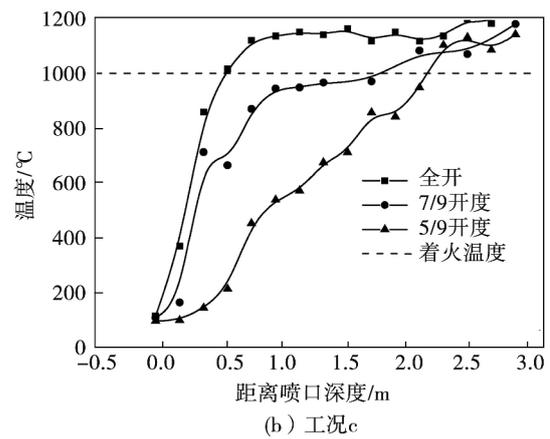
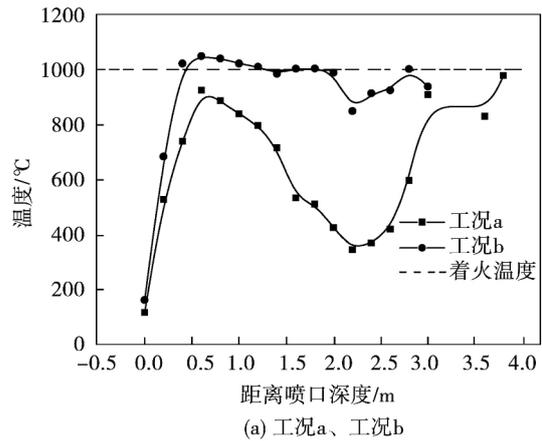


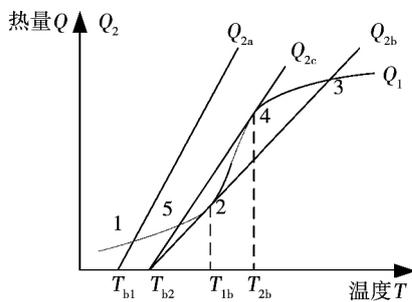
图 8 不同工况下 F1 浓相试验结果

Fig. 8 Experimental results of ignition characteristics of F1 fuel-rich mixture in different operating conditions

$dQ_1/dT \geq dQ_2/dT$ 。如果不具备这两个条件即使在高温状态下也不能稳定燃烧。

图 9 为可燃混合物燃烧放热量和不同散热条件下的热力曲线,其中 T_{b1} 和 T_{b2} 为初始外界温度, T_{1b} 和 T_{2b} 分别为着火点和熄火点对应温度,纵坐标为热量,其中 Q_{2a} 、 Q_{2b} 和 Q_{2c} 分别为 3 种不同的散热量随系统温度变化率的曲线^[8]。

由图 8(a) 中工况 a 和图 9 可以看出, 在曲线的初始阶段, 外界温度(炉膛内辐射和高温烟气回流)较高时使煤粉气流达到图 9 中的点 2, 而点 2 左右两侧 $Q_1 > Q_2$ 且 $dQ_1/dT \geq dQ_{2b}/dT$, 此时若外界散热条件不变, 由于温度较高, 放热量随温度变化率增大, 只要温度稍有增加, 燃烧反应将自动加速, 转变到高温燃烧状态点 3, 此条件下只要连续供应燃料和空气即可实现稳定燃烧, 但是在实际运行时, 浓相煤粉射流达到一定深度后伴随着大量二次风的混合, 使外界散热条件增加, 即由 Q_{2b} 变为 Q_{2c} , 则会出现着火中断现象, 即对应图 9 中的点 4, 当射流深度继续增加时, 来自炉膛内部的高温热量补充到煤粉射流中, 使煤风混合物重新回到点 2, 随后实现稳定燃烧。因此可知, 二次风的补入造成外界散热条件的变化率将直接影响煤粉射流是否熄火, Q_{2c} 即为其临界线。



点 1: 缓慢氧化过程; 点 2: 着火点;
点 3: 高温燃烧状态; 点 4: 熄火点; 点 5: 氧化状态
图 9 热力着火特性曲线

Fig. 9 Characteristic curve of thermal ignition

图 8(a) 中工况 a、工况 b 试验结果和试验条件对比可以看出, 当关小二次风挡板开度和开大三次风挡板开度的幅度在 10% 以上时, 此时散热曲线在 Q_{2b} 和 Q_{2c} 之间, 则浓相煤粉射流着火后一直稳定燃烧, 不再出现着火后再次着火的现象。

由图 8(b) 中工况 c 对应的试验条件和工况 a 对比可以看出, 工况 a、工况 c 中二次风挡板开度相同, 但工况 c 中燃烬风和三次风挡板开度均较工况 a 有明显加大, 使其二次风量变小, 由两者着火特性可以说明, 合理的二次风量对浓相煤粉着火有着重要的影响。

另外, 由工况 c 可以看出, 当 F1 乏气挡板开度由全开变化为 7/9 和 5/9 开度时, 浓相着火位置由 0.6 m 增加为 1.2 m 和 2.2 m。影响火焰长度的主要因素主要有^[14]: (1) 火焰中射流的初始动量与作用在火焰上的浮力比 Fr_f (弗劳德数); (2) 化学当量值(或过量空气系数); (3) 射流密度与环境气体密度之比 ρ_e/ρ_∞ ; (4) 射流初始直径 d_j 。当关小乏气挡板时, 浓相风量均增加使射流初始动量增加, 同时浓相的当量比减小, 故乏气挡板开度变小使浓相火焰变长、着火点位置下移。若继续减少开度, 则着火距离将继续下移, 达到一定程度后势必会给下炉膛水冷壁安全运行带来风险。因此, 在乏气燃烧特性较差的前提下, 要兼顾煤粉的燃烧效率和下炉膛水冷壁的安全运行, 乏气挡板开度不宜过小。

图 10 为分离器叶片角度 30°、乏气挡板全开时测点 B2 浓相试验结果, 表 6 为对应的试验条件。

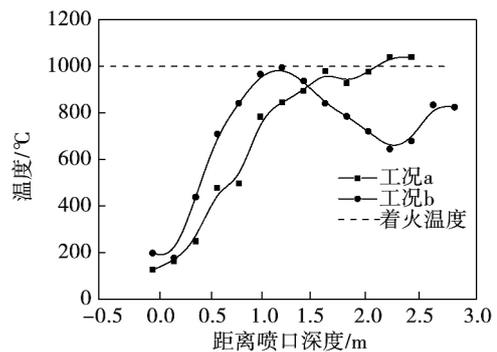


图 10 不同工况条件下 B2 浓相试验结果

Fig. 10 Experimental results of ignition characteristics of B2 fuel-rich mixture in different operating conditions

表 6 对应图 10 测点 B2 浓相试验条件
Tab. 6 Experimental conditions for fig. 10

工况	负荷 /MW	一次风速 $v_1 / m \cdot s^{-1}$	一次风温 $T_1 / ^\circ C$	二次风挡板开度 /%	二次风温 $T_2 / ^\circ C$	三次风挡板开度 /%	总风量(二、三次风) / $t \cdot h^{-1}$	燃烬风开度 /%	给煤量(左侧/右侧) / $t \cdot h^{-1}$
a	550	31.2	116.5	60.3	321.5	90.5	110.6	50.35	31.57/21.68
b	600	35	120	60.23	352	82.1	115	50.3	24.8/28.7

由图 10 工况 a 可以看出,此时 B2 浓相煤粉射流在深度 1.2 m 左右处着火后稳定燃烧,而工况 b 中则存在类似图 9 工况 b 相同的规律,即在深度 1.5 m 左右处着火,随着深度继续增加温度又存在下降然后上升的趋势,对比两者试验条件可以看出,两者二次风、燃烬风挡板开度不变,但图 10 工况 b 三次风挡板开度降低,则造成二次风风量增加,使散热曲线变化到 Q_{2c} ,同时其一次风也有所增加,两者是造成 B2 浓相着火特性恶化的原因,与 F1 得到的结论一致,即合理的二次风量对浓相煤粉着火有着重要的影响。

3 结 论

通过对新投产的超临界 W 炉新型狭缝式燃烧器煤粉射流的着火燃烧特性相关研究,可得出以下结论:

(1) 淡相粉量大和主燃区温度低易造成淡相煤粉着火特性差,因此在燃烧器设计中应保证浓淡分离效率的同时要优化淡相布置,以提高淡相煤粉着火燃烧效率。

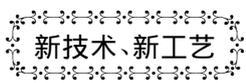
(2) 对劣质无烟煤,浓相煤粉稳燃受燃烧器配风影响较为敏感,故在实际运行中应注意控制各挡板开度,探索最佳的风门开度组合。

参考文献:

[1] 何佩敖. 无烟煤粉的 U 型、W 型火焰燃烧技术[J]. 电站系统工程, 1989, 5(2): 44 - 60.
HE Pei-ao. Combustion technology of U and W flame shape for an-

thracite coal[J]. Power System Engineering, 1989, 5(2): 44 - 60.
[2] Leisse A, Lasthaus D. New experience gained from operating DS (swirl stage) burners[J]. VGB Power technique 2008(11): 1 - 7.
[3] 高正阳, 崔伟春, 杨毅栋, 等. 火焰中心高度对 W 型火焰锅炉燃烧影响的数值模拟研究[J]. 热力发电, 2009, 38(11): 23 - 27.
GAO Zheng-yang, CUI Wei-chun, YANG Yi-di et al. Study on Numerical Simulation Concerning Influence of Flame Center Height Upon Combustion in W-shape Flame Boiler [J]. Thermal Power Generation 2009, 38(11): 23 - 27.
[4] 苗长信, 王建伟. 600 MW 机组 W 火焰锅炉“偏烧”问题分析[J]. 热力发电, 2005, 34(12): 48 - 51.
MIAO Chang-xin, WANG Jian-wei. Analysis on asymmetric combustion for 600 MW “W”-shape Flame Boiler [J]. Thermal Power Generation 2005, 34(12): 48 - 51.
[5] 李争起, 况敏. 浓、淡煤粉喷口交错布置的多次引射分级燃烧 W 火焰锅炉 [P]. CN 102297418 A, 2011 - 12 - 28.
LI Zheng-qi, KUANG Min. Multiple Injection and Multiple Staging Combustion Technology with Staggered arrangement of Fuel-lean and Fuel-rich Nozzles for Down-fired Boilers [P]. CN 102297418 A, 2011 - 12 - 28.
[6] 樊泉桂. 锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
FAN Quan-gui. Boiler Principles [M]. China Electric Power Publishing House: Beijing, 2004.
[7] 秦裕琨, 范卫东. 百叶窗浓缩器气固两相流动的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21(4): 501 - 504.
QIN Yu-kun, FAN Wei-dong. Experimental Study on Gas-solid Two-phase Flow in Louver Concentrator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(4): 501 - 504.
[8] Stephen R. Turns. 燃烧学导论 - 概念与应用 (第 2 版) [M]. 姚强, 李水清等译. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Stephen R. Turns. An Introduction to Combustion-Concepts and Application (Second Edition) [M] Yao Qiang, Li Qingshui et al. Translation. Tsinghua University Publishing House 2009.

(姜雪梅 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.032

斯通沃尔是 Siemens 的用于潘达电力的第 6 个合同

据《Gas Turbine World》2014 年 9 - 10 月刊报道, Siemens 公司已得到美国弗吉尼亚州利斯堡市的潘达电力基金公司的斯通沃尔能源项目全套总承包合同订单。

这是由潘达电力基金公司授予 Siemens 的第 6 个订单。利斯堡联合循环电站将具有 778 MW 总装机容量。

Siemens 将为潘达斯通沃尔联合循环电站提供动力岛设备,包括 2 台 SGT6 - 5000F 燃气轮机(208 MW 功率, 38.1% 效率)、1 台具有 SCon - 4000 冷凝器的 SST6 - 500 汽轮机、2 台 SGen6 - 1000A 发电机、1 台 SGen6 - 2000H 发电机和 2 台 NEM 管道站补燃余热锅炉以及成套电力系统和 SPPA - T3000 测量控制系统。

该联合循环装置的交工试运转计划在 2017 年春完成。

(吉桂明 摘译)

基于 DBEL 技术超临界“W”火焰锅炉狭缝式燃烧器煤粉着火燃烧特性研究 = **Study of the Ignition and Combustion Characteristics of Pulverized Coal in the Slit Type Burners of a Supercritical “W”-shaped Boiler Based on the DBEL Technology** [刊, 汉] GAO Jia-jia, LIU Peng-yuan, XU Peng-zhi, TANG Wen (Department of Boiler and Combustion Technology, Huadian Electric Power Science Academy, Hangzhou, China, Post Code: 310000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(5). -768-774

In the light of the problems existing in the first domestically-made 600 MW class supercritical W-shaped flame boiler based on the DBEL technology during its operation, experimentally studied were the ignition and combustion characteristics of pulverized coal in the novel slit type bias separation burner. The test results show that the ignition of the sparse phase in the burner is relatively poor and the combustion stabilization characteristics of the dense phase are susceptible to the air distribution of the burner. Both constitute the main causes for a low operation efficiency and the poor safety of the lower furnace. The test results can offer a certain theoretical basis and guide for operation and retrofitting of supercritical W-shaped flame boilers in operation in China, including new boiler design and development. **Key words:** DBEL technology, supercritical, “W”-shaped boiler, anthracite, ignition and combustion characteristics

复杂激励下多级齿轮传动系统分岔特性及动载荷分析 = **Bifurcation Characteristics and Dynamic Load Analysis of a Multi-stage Gear Transmission System Under a Complex Excitation** [刊, 汉] LIU Bo, LIN Teng-jiao, WANG Dan-hua (National Key Laboratory on Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044), LU He-sheng (Chongqing Gear Box Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 402263) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(5). -775-780

In order to study the bifurcation characteristics and dynamic load coefficient of a multi-stage gear transmission system under a complex excitation, established was a non-linear dynamic model with six degrees of freedom, including the time-change engagement rigidity, engagement damping, transmission error and backlash etc. factors. The 4-5 order step change Runge-Kutta method was used to seek solutions to the non-dimensional dynamic differential equation of the system. The calculation results show that with an increase of the backlash and engagement rigidity, the system will tend to be unstable and approximately undergo a state changing from a single period and multi-period to chaotic movement and the dynamic load coefficient will assume an ascending tendency and emerge a disengagement phenomenon. When the engagement damping ratio and twist rigidity increase, the system will gradually tend to be