

DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2020. 07. 003

燃烧器钝体扩展角度对半焦/烟煤混燃及 NO_x 排放的影响

Effect of different blunt body extensive angles on semi-coke/bituminous coal
co-combustion and NO_x emission

孙刘涛, 闫永宏, 陈登科, 彭政康, 孙锐*

SUN Liutao, YAN Yonghong, CHEN Dengke, PENG Zhengkang, SUN Rui*

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

(Institute of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 在 300 kW 热态中试试验炉上, 通过测量燃烧器下游主燃区不同轴向、径向位置的炉膛温度以及 O_2 、CO、 NO_x 等气体的含量来研究直流燃烧器钝体扩展角度对神木半焦与神华烟煤混合燃烧(半焦、烟煤质量比为 45:55)时着火特性以及 NO_x 排放的影响。研究表明: 随着直流燃烧器钝体扩展角的增大, 着火逐渐向炉膛上游移动, O_2 体积分数谷值和 CO 质量浓度峰值(即强还原性气氛)在径向逐渐向炉膛壁移动; 扩展角度为 29° 时, 炉膛的整体温度较高, 稳燃和 NO_x 减排效果较好。

关键词: 半焦; 烟煤; 混燃; 钝体燃烧器; 扩展角度; 着火特性; NO_x 排放

中图分类号: TK 223.23

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)07-0020-08

Abstract: The content of O_2 , CO, NO_x and other gases, and the furnace temperature at different axial and radial positions in the downstream main combustion zone of a burner were measured in a 300 kW thermal pilot test furnace. Accordingly, the influence of the extensive angle of an once-through boiler's blunt body on the ignition characteristics of Shenmu semi-coke and Shenhua bituminous coal co-combustion (semi-coke and bituminous coal were blended with a mass ratio of 45:55) and NO_x emissions was investigated. The results show that with the enlarging of the extensive angle, the ignition position gradually moves towards the upper chamber of the furnace, and the valley value of O_2 volume fraction and the peak value of CO mass concentration, namely the strong reducing atmosphere, gradually move towards the furnace wall along the radial direction. When the extensive angle is 29° , the overall temperature of the furnace is considerably high, and the combustion is stable and the NO_x emission is reduced.

Keywords: semi-coke; bituminous coal; co-combustion; burner with blunt body; extensive angle; ignition characteristics; NO_x emission

0 引言

半焦作为煤热解的副产品, 具有热值高和产量巨大的优点, 将其作为高品位清洁燃料进行发电, 是实现煤炭资源高效梯级利用的重要途径之一^[1]。半焦与其他挥发分较高的煤种掺混燃烧是改善电站锅炉中半焦燃烧特性的有效方法, 在实际应用中得到了广泛的关注。但半焦存在着着火难、燃尽率低、挥发分低、 NO_x 排放高等问题, 会对生态环境造成破坏, 威胁人类健康, 减少半焦与煤种掺烧过程

中的 NO_x 排放是电厂面临的挑战之一。

近年来, 有关半焦与烟煤以及不同煤种之间掺烧的研究逐渐兴起。Yao 等^[2]用热重分析法研究了富氧气氛下半焦/烟煤共混物的燃烧特性和动力学行为, 在热重分析仪上进行了掺烧试验, 研究表明: 随着烟煤在共混物中所占比例的增加, 燃烧特性有显著变化。Zhang 等^[3]通过热重分析和降管炉试验研究了烟煤与半焦掺烧过程中的燃烧特性和 NO 生成特性, 结果表明, 80% 的烟煤掺混比例对燃尽率有良好的促进作用, 对 NO 的形成有明显的抑制作用。Ikeda 等^[4]在煤粉燃烧试验炉上研究了烟煤和次烟煤组成混煤燃烧时 NO_x 的排放特性, 结果表明: 混煤燃烧后的 NO_x 排放质量浓度可以用组分煤单独燃烧

收稿日期: 2020-05-01; 修回日期: 2020-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0602002)

时 NO_x 排放质量浓度按掺混质量比进行加权平均估算;当混煤中次烟煤比例增加时, NO_x 排放质量浓度向次烟煤单独燃烧时靠近。Cheoreon等^[5]在15 kW煤粉炉中进行了低阶煤、褐煤的共燃试验,研究了烟煤、褐煤及其共混物的燃烧与排放特性,评价了分级配风、一次风比、煤种、烟煤与褐煤掺混比对 NO_x 排放和颗粒燃尽的影响;对于烟煤,随着一次风比的减小和分级配风与燃烧器出口距离的增大, NO_x 排放量略有下降;在一次风比和分级配风位置不变的情况下,含氮量较低的煤 NO_x 排放量较小。王长安等^[6]对混煤掺烧特性和燃烧特性进行了研究,试验结果表明,混合煤的工业分析、元素分析和热值分析可采用单个煤种的质量加权平均值的方法来进行计算;热重试验结果表明,混煤的强燃烧阶段与单个煤种有较大差异,混合煤的热重曲线介于不同煤的热重曲线之间,但表现出非叠加行为。

随着半焦掺混比例的增加,降低 NO_x 排放面临很大挑战。目前,在电站四角切圆燃烧锅炉中大比例掺混半焦是一种有效的掺烧技术,优化燃烧条件是降低 NO_x 排放的主要措施之一^[7],特别是低 NO_x 切向燃烧器的结构参数优化设计对改善半焦的着火和燃烧特性、抑制 NO_x 生成起着至关重要的作用。

在一次风粉管道出口设置钝体,由于钝体的阻碍和扰动,在它后面会形成一定的回流区域,燃烧室高温烟气卷到喷口附近,强化着火和稳燃。煤粉气流从离开燃烧器喷口到着火点的时间很短,无法吸收大量的辐射热量,大部分依靠高温烟气回流以及射流外缘的卷吸来达到着火温度,所以钝体燃烧器能够强化燃烧的初始阶段。钝体稳燃技术可通过改变燃烧氛围来降低 NO_x 排放^[8],具有较高的经济和环保研究价值。

钝体是影响混煤燃烧的重要因素之一,近年来国内外煤粉稳燃技术得到了充分发展。徐明厚等^[9]采用三维激光粒子动力学风速仪对空腔钝体燃烧器出口气流的平均速度、脉动速度分量和湍流特性进行了测量,对于低挥发分煤,给出了模型颗粒的选择(密度为1.2~1.4 g/cm³,粒径小于160 μm)、再循环区内外颗粒直径分布、颗粒密度分布、体积流量分布和燃烧进程等结果。试验结果不仅说明了钝体燃烧器火焰稳定的机理,而且表明了这种火焰稳定技术在工业上的应用潜力。DANO等^[10]重点研究了燃烧器钝体的几何形状对非预混火焰稳定性的影响,使用了2个具有不同几何和气动特性的钝体(1个圆盘形,诱导扩散流;1个郁金香形,促使边界层的形成),实现了对等温和反应流的可视化和气动热力学描述;另外,他们还定义了基于外部

气流回流特性和中心射流发展的无量纲参数,论证了尾流区空气动力学的重要性及其对非预混火焰传播的影响^[11]。TONG等^[12]研究了甲烷-空气扩散火焰的类型和稳定极限,以评价钝体位置变化对火焰稳定性的影响,用高速摄像机观察并记录了再循环区火焰、稳定扩散火焰、劈裂火焰和上升火焰直至火焰熄灭的各种火焰形态,采用高速粒子图像测速仪(PIV)对火焰流场和火焰形态特征进行了深入研究,结果发现:在环形通道出口上方10 mm处安装钝体可以更好地稳定火焰,燃烧时通过加速中心射流和扩大外再循环带对流场产生显著影响。

为了实现大掺混比半焦掺烧,同时也考虑到课题的要求,本文尝试了半焦大掺混比(45%)下的热态试验,而钝体及其扩展角参数设置也是为了能起到更好的稳燃和 NO_x 减排效果。本文在300 kW中试规模煤粉炉上进行冷态和热态试验,将半焦与烟煤混合,研究直流燃烧器钝体扩展角对半焦/烟煤混燃着火特性及 NO_x 排放特性的影响,并深入研究半焦与烟煤的混合燃烧过程,为大型电站锅炉燃用混煤提供参考。

1 试验系统及试验方法

1.1 冷态试验系统

燃烧器的冷态试验在300 kW中试试验锅炉上进行,如图1所示。从图1a可以清楚地看出一次风煤粉燃烧器装置在炉膛顶部的布置情况,4个不同的直流式燃烧器(同热态使用的燃烧器相同)分别安装具有不同扩展角的钝体,钝体长度 L 分别为12.75, 15.23, 17.92, 21.85 mm,对应的钝体扩展角 α 分别为25°, 29°, 34°, 41°,阻塞比分别为0.20, 0.23, 0.26, 0.30。每个钝体高度均为29.31 mm,各燃烧器的一次风出口速度在4种工况下保持一致。配风和出口流场测试系统分别由风箱、阀门、转子流量计、风速计和4个不同类型的燃烧器组成,测量设备位于燃烧器出口下游。

由于气流场的对称性,仅对半个炉膛进行测试,径向测点坐标沿2-2截面方向与中心点的距离 r 分别为0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 350 mm,轴向测点设置在燃烧器中心线上,与燃烧器出口的距离 x 分别为20, 180, 340, 500, 660, 820 mm,实现网格化测量。

1.2 300 kW中试热态试验系统

图2为300 kW中试热态试验系统,燃烧室为钢板制成的圆柱形筒体,内径为800 mm,长5 760 mm,炉顶和炉膛内壁衬有耐火层,耐火层和绝缘层之间有冷却层。该系统的炉膛侧壁上安装了30个端口,

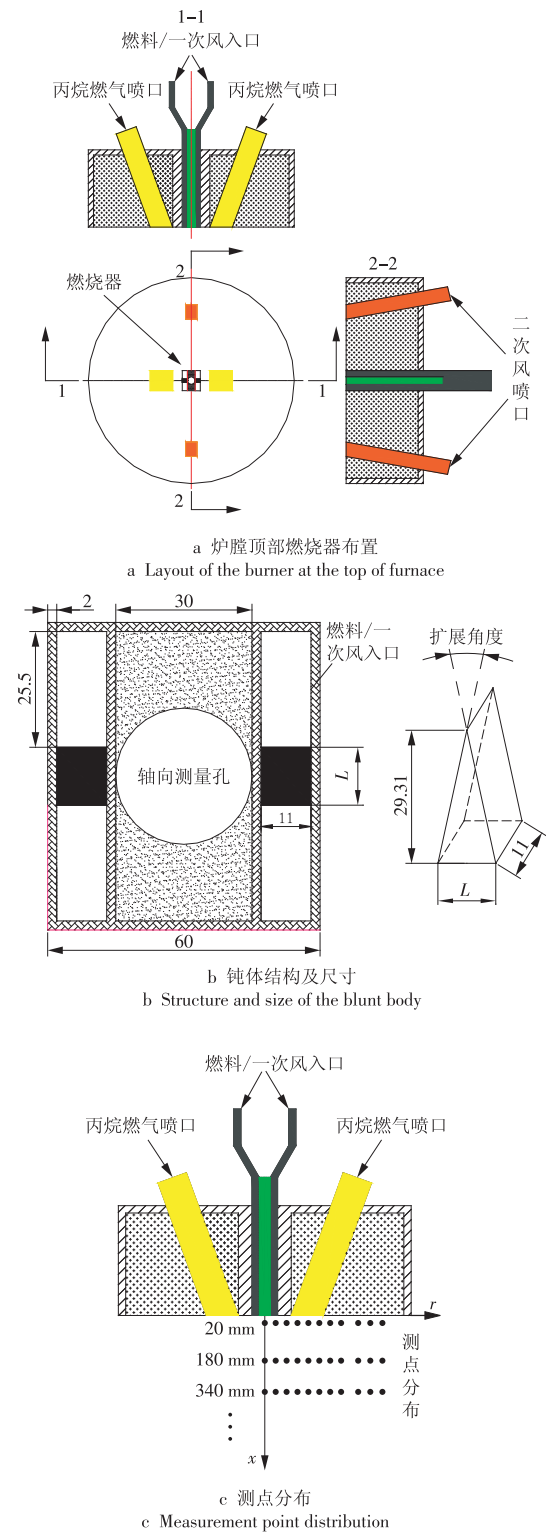


图1 直流燃烧器布置及测点分布
Fig. 1 Once-through burner layout and measurement point distribution

以便测量气体参数,炉膛侧面有窗口,可通过窗口观察火焰。试验装置详情可参考文献[13-14]。本研究采用直流式燃烧器,一次、二次风量均用转子流量计测量,气体测量系统由水冷式不锈钢探头和傅里叶红外(FTIR)分析仪组成。测量前用标准气体校准分析仪: $\varphi(\text{O}_2)$ 的测量范围为0.0%~25.0%,

精度为 $\pm 0.8\%$; $\rho(\text{CO})$ 在2 501.0~12 500.0 mg/m^3 范围内的精度为 $\pm 10.0\%$,在10 001.0~125 000.0 mg/m^3 范围内的精度为 $\pm 15.0\%$; $\rho(\text{NO}_x)$ (NO , NO_2)在测量范围内的精度为 $\pm 5.0\%$ 。在0~1 600 $^\circ\text{C}$ 范围内,用S型热电偶测量烟气温度,精度为 $\pm 0.25\%$ 。试验用燃料参数见表1,主要运行参数见表2。

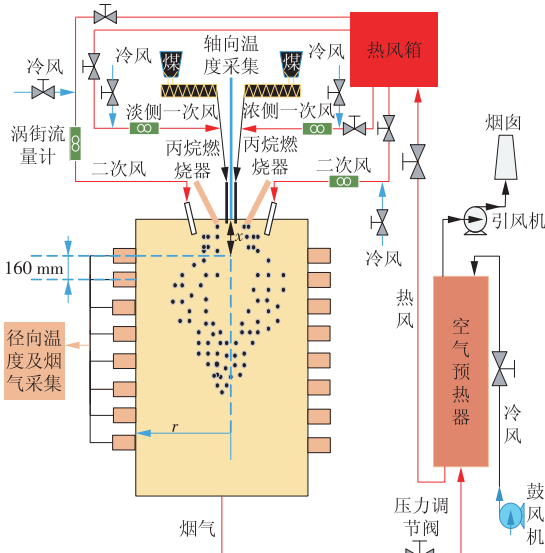


图2 300 kW 热态试验系统
Fig. 2 The 300 kW thermal pilot test system

表1 试验用燃料参数

Tab. 1 Parameters of the fuels in the test

项目	神华烟煤	神木半焦	混合燃料(烟煤: 半焦=55:45)
工业分析	$w(\text{M}_{\text{ar}})/\%$	6.29	2.13
	$w(\text{V}_{\text{ar}})/\%$	29.51	8.73
	$w(\text{A}_{\text{ar}})/\%$	6.01	11.96
	$w(\text{FC}_{\text{ar}})/\%$	58.02	77.18
元素分析	$w(\text{C}_{\text{ar}})/\%$	70.67	79.01
	$w(\text{H}_{\text{ar}})/\%$	4.35	1.09
	$w(\text{O}_{\text{ar}})/\%$	11.08	4.55
	$w(\text{N}_{\text{ar}})/\%$	1.12	0.93
	$w(\text{S}_{\text{ar}})/\%$	0.31	0.33
	$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	27.13	27.42
			27.26

2 试验结果与讨论

2.1 冷态试验结果

图3为不同钝体扩展角下气流轴向速度变化。 $x=20\text{ mm}$ 时,一次风速和二次风速分别在 $0\text{ mm}\leq r\leq 60\text{ mm}$, $150\text{ mm}\leq r\leq 300\text{ mm}$ 区域出现明显的峰值。随着钝体角度的增大,一次风速度和峰值减小,这是由于在一次风流量一定的情况下,随着扩展角的增大,射流轴向速度分量减小,而钝体角度为 41° 时风速小幅增加,可能是回流区不稳定的原因。

表 2 试验工况主要运行参数
Tab. 2 Main operation parameters of the test

项目	参数			
扩展角/(°)	25	29	34	41
阻塞比	0.20	0.23	0.26	0.30
钝体高度/mm	29.31			
浓淡比	1:1			
煤粉细度 R ₉₀ /%	9			
总功率/kW	300			
煤燃烧功率/kW	250			
丙烷燃烧功率/kW	50			
一次风/二次风温度/℃	80/230			
炉膛承受最高温度/℃	1 500			
炉膛内径/mm	800			
单层炉膛长度/mm	640			
一次风流量/(kg·h ⁻¹)	75.36			
二次风流量/(kg·h ⁻¹)	185.36			
一次风风速/(m·s ⁻¹)	18.37			
二次风风速/(m·s ⁻¹)	18.88			
煤粉流量/(kg·h ⁻¹)	33.00			
燃烧区过量空气系数	0.9			

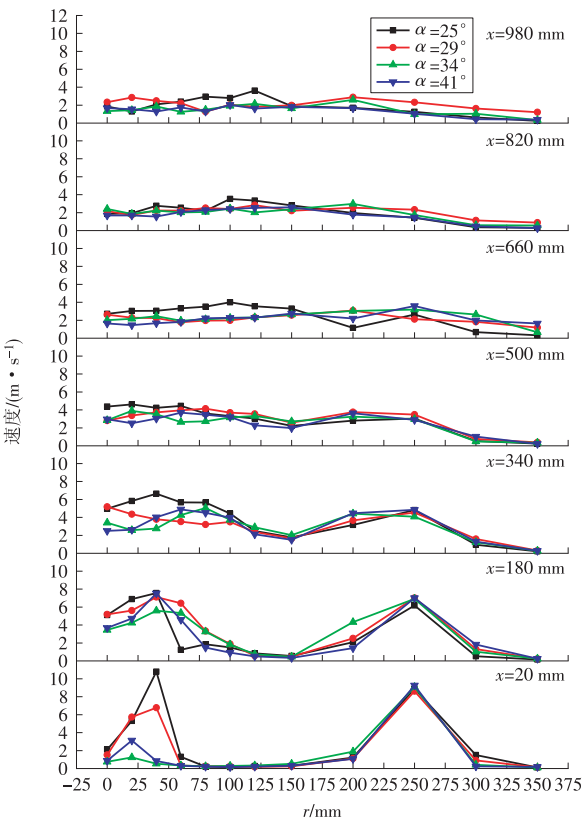


图 3 不同扩展角下气流轴向速度变化
Fig. 3 Air flow vertical velocities varying with extensive angles

由图 3 可见,不同扩展角下的二次风速峰值差距不大。在 $60\text{ mm}\leq r\leq 150\text{ mm}$ 区域,风速保持很低的水平,说明一次风和二次风还没有混合。当 $x=180\text{ mm}$ 时,扩展角为 25° 工况的一次风速峰值降幅

明显,扩展角为 29° 工况的峰值几乎不变,扩展角为 $34^\circ, 41^\circ$ 工况的峰值反而大幅升高且随着扩展角的增大而增大,这是湍流强度变大而导致的。二次风速峰值只是小幅降低,说明依然保持较好的刚性。在 $x=340\text{ mm}$ 截面,扩展角为 29° 工况的一次风速峰值从 $r=40\text{ mm}$ 处向 $r=0\text{ mm}$ 处移动,峰值的衰减速率也较小,说明射流经过钝体后再次混合,一次风的 2 个峰沿炉膛中心线合并成 1 个峰,射流刚性增强。其他角度的峰值则随着扩展角的增大而逐渐偏离中心,二次风速明显降低,一次、二次风也开始交汇。当 $x>500\text{ mm}$ 时,随着气流向下流动,一次风和二次风逐渐混合且速度保持在较低水平,在径向上的速度也基本保持一致,此阶段流场受钝体扩展角的影响较小。由此可见,钝体主要影响一次风流场,进而影响着火。

2.2 热态试验结果

2.2.1 钝体扩展角对着火温度和着火距离的影响

对于半焦/烟煤混合燃料,本文通过测量炉膛轴向温度变化来研究其着火特性^[15-16],图 4 为沿炉膛中心线的轴向温度分布。对于不同的工况,温度变化趋势一致。 $0\text{ mm}<x<100\text{ mm}$ 时,由于低温煤粉射流从燃烧器射入高温炉膛,被炉壁辐射加热,温度骤然上升。 $100\text{ mm}<x<400\text{ mm}$ 时,温度持续上升,这是由于 2 股射流混合之后,混合燃料不断卷吸周围高温烟气进行强烈的对流换热,同时吸收炉膛内壁的辐射传热。分析认为:不同扩展角下混合射流着火距离区间为 $100\sim 400\text{ mm}$ 。 $x>400\text{ mm}$ 时,温度达到峰值,燃烧已基本稳定,不同扩展角轴向温度均较高且变得平稳。扩展角为 29° 工况的温度始终较高,而扩展角为 41° 工况的温度始终较低。从冷态的试验结果也可以看出,扩展角为 29° 工况射流经过钝体后形成对称的双峰,而后在炉膛中心线上再次混合叠加,最终形成单峰,单峰意味着更多的高温烟气被卷吸、更多的煤粉被输送到中心线,煤粉和气流充分混合有利于着火。而扩展角过大,射流偏转挠度偏大,煤粉过于分散,反而不利于着火。

根据谢苗诺夫热自燃理论中的着火临界条件,将轴向温度上升速率最快的位置定义为着火点,即图 4 中曲线的某个转折点 $(d^2t/dx^2=0)$ ^[17-19],同时结合着火距离区间排除不合理位置,对应点的轴向距离即为着火距离。对图 4 中扩展角为 25° 工况的温度曲线求二阶导数可得其着火距离(如图 5 所示),其他扩展角均采用该方法,然后在图 5 中找到着火距离所对应的温度,即为着火温度,见表 3。可以发现,随着扩展角的增大,着火距离逐渐减小,减幅高

达 39.4%,这是因为随着扩展角的增大,煤粉射流竖直方向的速度逐渐减小,而火焰传播速度不变,导致着火距离提前。但扩展角为 41°工况的着火距离过于靠近燃烧器出口,容易造成挂焦,甚至烧损燃烧器喷口。当然,钝体扩展角过小时,着火距离过大,煤粉容易熄灭,从而导致着火不稳定。

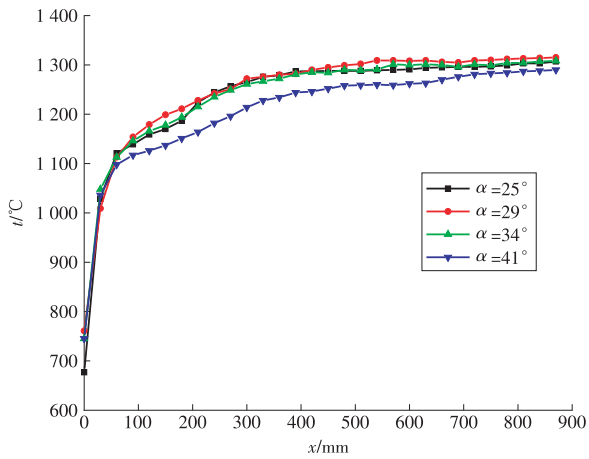


图 4 轴向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along the axial direction

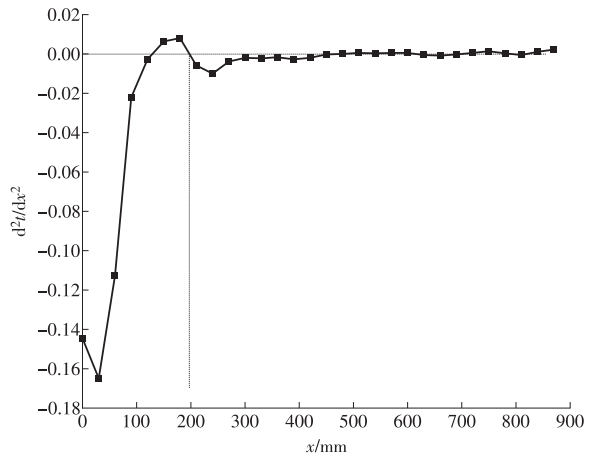


图 5 扩展角为 25°时的着火距离

Fig. 5 Ignition distance with extensive angle of 25°

表 3 不同扩展角下混合燃料射流的着火距离和着火温度

Tab. 3 Ignition distance and ignition temperature of the blended fuel jet flow at different extensive angle

项目	扩展角/(°)			
	25	29	34	41
着火距离/mm	198	180	145	120
着火温度/°C	1 202	1 211	1 172	1 126

2.2.2 钝体扩展角对径向温度分布的影响

除了轴向温度分布,炉膛径向温度分布也可以反映混合燃料的着火燃烧过程^[16,20]。

如图 6 所示,4 组扩展角工况下,随着轴向距离 x 的增加,径向温度均呈逐渐上升的趋势,但 $x > 820$

mm 后,所有径向温度基本不再增加,说明燃烧已达到了稳定状态。 $x=180$ mm 截面,所有工况下从 $r=40$ mm 处到中心的温度均呈现逐渐上升的趋势,这是因为钝体下的回流区煤粉质量浓度较高,停留时间相对较长,燃烧强度高。 $r > 50$ mm 后,温度下降平缓且保持较低水平。 $x=340$ mm 截面,在靠近中心的区域,随着煤粉向下和向外的扩散,迅速上升温度的径向距离由 40 mm 增加到 60 mm,且温度上升速率变大,扩展角为 25°,29° 工况的温度分别达到峰值 1 309 °C 和 1 325 °C。此时,二次风与一次风开始混合参与氧化反应, O_2 的增加促使燃烧强度增加,温度升高。 $r > 60$ mm 后,温度缓慢下降,但仍维持在 1 200 °C 以上。 $x=500 \sim 980$ mm 范围,随着燃烧的进行,靠近中心区域($r=0 \sim 60$ mm 范围)的温度随着 x 的增大逐渐变得平缓且保持在很高的值。 $r > 60$ mm 后,随着 x 的增加,温度降幅逐渐变小,整体维持在 1 250 °C 以上。

在整个 x 截面,扩展角为 29° 工况的温度始终大于其他工况的温度,扩展角为 41° 工况的温度始终最低。但随着 x 的增加,扩展角为 25°,29°,34° 工况的温度差逐渐缩小,这种温差只在 $x=340$ mm 之前比较显著,这和冷态试验结果一致,说明钝体对初期着火影响较大,进而影响主燃区的温度。

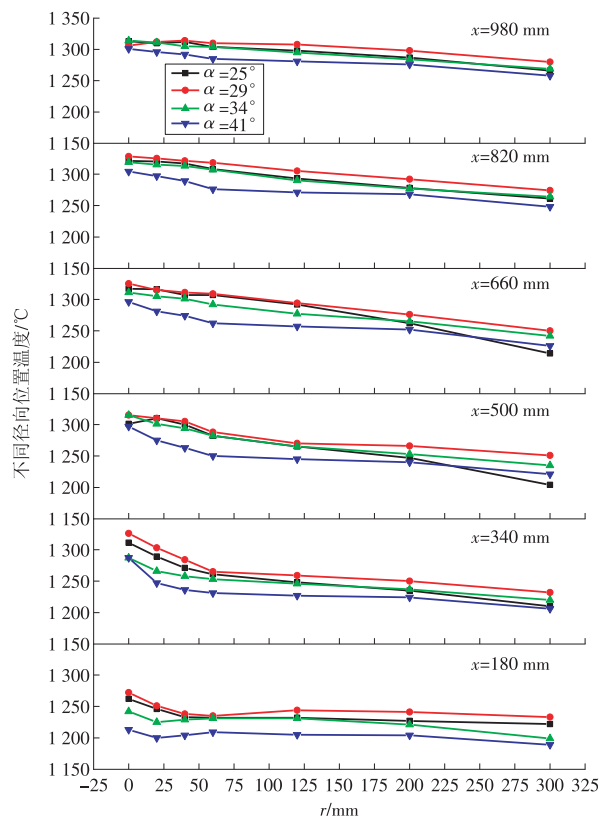


图 6 不同扩展角下径向温度分布

Fig. 6 Radial distribution of temperature with different extensive angles

2.2.3 钝体扩展角对径向烟气分布的影响

燃烧区径向 $\varphi(\text{O}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 的分布可反映混合燃料的着火过程,如图7、图8所示。 $x=180\text{ mm}$ 截面,中心处 $\varphi(\text{O}_2)$ 较高,主要原因是靠近一次风喷口和煤粉燃烧强度较弱。随后,在 $x=60\text{ mm}$ 处 $\varphi(\text{O}_2)$ 出现一个峰,峰两侧 $\varphi(\text{O}_2)$ 较低且右侧数值明显低于中心轴线的数值,这是因为刚从燃烧器喷口射出的煤粉质量浓度较高,先从外圍着火,而右侧靠近二次风,氧气丰富,燃烧较左侧剧烈,以至于 $r=100\text{ mm}$ 处 $\varphi(\text{O}_2)$ 出现一个谷, $\rho(\text{CO})$ 出现一个峰。特别是扩展角从 25° 增加至 29° 时,径向 $\rho(\text{CO})$ 明显升高,峰值增幅显著且峰的位置向外侧移动。从以上着火距离的结果看:相对于其他工况,扩展角为 25° 工况煤粉的着火还未完全开始,此时 $\rho(\text{CO})$ 较小;而扩展角为 29° 工况中心处 $\varphi(\text{O}_2)$ 保持较高的水平,这为下游中心区域的强烈燃烧反应提供了一定量的 O_2 。

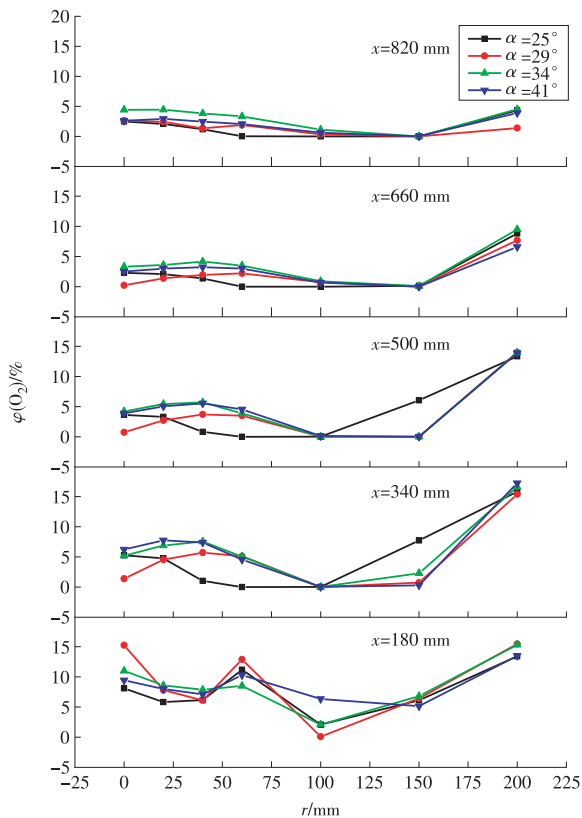


图7 不同扩展角下径向 $\varphi(\text{O}_2)$ 分布

Fig. 7 Radial distribution of $\varphi(\text{O}_2)$ with different extensive angles

$x=340\text{ mm}$ 截面,在中心处,扩展角为 29° 工况的 $\varphi(\text{O}_2)$ 降幅最大(由 15.47% 降至 1.40%), $\rho(\text{CO})$ 也出现一个小的峰值 $1.87 \times 10^4\text{ mg/m}^3$,远大于其他工况,说明经过钝体分开的2束煤粉一部分随着风流重新在中心混合并且着火较为强烈,这与图4中 29° 工况轴向温度较高的结果吻合。扩展角为 25° 工况,在 $r=40\sim 100\text{ mm}$ 的范围内出现 $\varphi(\text{O}_2)$ 超低区域,

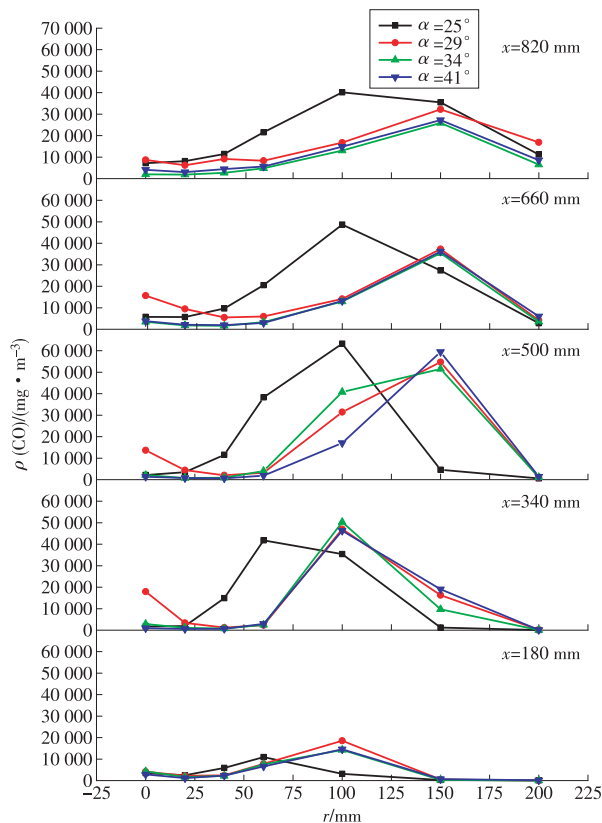


图8 不同扩展角下径向 $\rho(\text{CO})$ 分布

Fig. 8 Radial distribution of $\rho(\text{CO})$ with different extensive angles

高强的还原性气氛导致 $\rho(\text{CO})$ 峰值高至 $4.37 \times 10^4\text{ mg/m}^3$,此时混合射流的燃烧已十分剧烈。扩展角大于 25° 时, $\varphi(\text{O}_2)$ 超低区域向右移到 $r=100\sim 150\text{ mm}$ 范围内, $\rho(\text{CO})$ 峰值小幅增加,约为 $5.00 \times 10^4\text{ mg/m}^3$,说明燃烧反应区随着钝体扩展角的增大而向外侧移动,燃烧强度也有一定程度的增加。 $x=500\text{ mm}$ 处与 $x=340\text{ mm}$ 处烟气的分布规律一致,不再赘述。

对于各个工况,随着燃烧的进一步增强, $\varphi(\text{O}_2)$ 整体略微降低,而 $\rho(\text{CO})$ 达到最大值 $63\,296\text{ mg/m}^3$ ($\alpha=25^\circ$), $54\,701\text{ mg/m}^3$ ($\alpha=29^\circ$), $51\,540\text{ mg/m}^3$ ($\alpha=34^\circ$), $59\,470\text{ mg/m}^3$ ($\alpha=41^\circ$),但峰值差距不甚明显。此阶段燃烧反应最为剧烈,挥发分几乎完全析出,热量基本来自焦炭的燃烧。

$x=660\text{ mm}$ 截面,各工况下 $\varphi(\text{O}_2)$ 在径向持续降低,其中扩展角为 25° 工况的 $\varphi(\text{O}_2)$ 超低区域由原来的 $r=40\sim 100\text{ mm}$ 扩大到 $r=40\sim 150\text{ mm}$,这是由于随着煤粉向下游沉降,剧烈燃烧区域扩大外延。各工况下 $\rho(\text{CO})$ 峰值首次出现下降,但依然维持较高水平,这是由于高温缺氧还原性气氛下CO对 NO_x 的还原强度增加,即焦炭燃烧氧化反应生成的CO量小于CO参与还原反应的消耗量。CO不仅能反映燃烧强度,还是一种在高温缺氧环境下重要的 NO_x 还原物质^[21-22]。

$x=820$ mm 截面,在 $r=0\sim 150$ mm 范围内,中心线附近扩展角为 29° 工况的 $\varphi(\text{O}_2)$ 略微上升,但 $\rho(\text{CO})$ 由 $15\,670\text{ mg/m}^3$ 降至 $8\,677\text{ mg/m}^3$,说明中心区域燃烧强度开始降低。其他工况下, $\varphi(\text{O}_2)$ 变化不大,而 $\rho(\text{CO})$ 峰值持续下降但不显著,说明混合燃料处于稳定燃烧阶段且反应在还原性气氛中进行。在 $r=150\sim 200$ mm 范围内,各工况下 $\varphi(\text{O}_2)$ 随燃烧的进一步外延而降低, $\rho(\text{CO})$ 也小幅升高,说明煤粉燃烧范围在慢慢扩大。

2.2.4 钝体扩展角对 NO_x 排放的影响

煤粉燃烧过程中 NO_x 的生成类型主要是燃料型 NO_x ,占 NO_x 排放总量的75%以上^[23],本文主要讨论燃料型 NO_x ,图9为不同扩展角的径向 $\rho(\text{NO}_x)$ 分布。

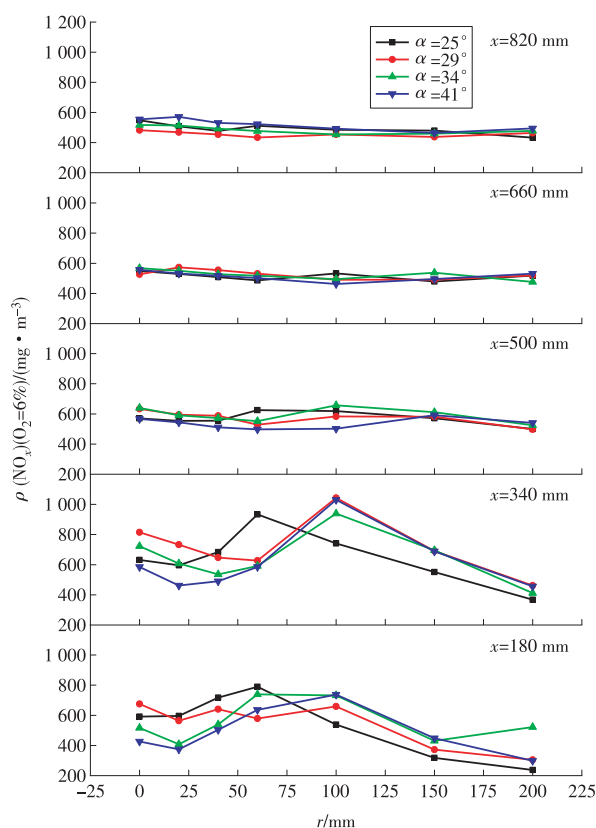


图9 不同扩展角下径向 $\rho(\text{NO}_x)$ 分布

Fig. 9 Radial distribution of $\rho(\text{NO}_x)$ with different extensive angles

$x=180$ mm 截面,扩展角为 25° 工况和其他工况的 $\rho(\text{NO}_x)$ 峰值分别出现在 $r=60$ mm 处和 $r=100$ mm 处且数值很大,说明该截面着火初期燃烧很强烈,这和前面讨论的烟气规律一致。所有扩展角工况的 $\rho(\text{NO}_x)$ 均在 $x=340$ mm 截面达到峰值,在 $x=500$ mm 截面开始迅速降低,这是因为 $\rho(\text{CO})$ 峰值在该截面也达到了最大值,氧气匮乏,还原性气氛强,极大程度抑制了 NO_x 的形成。 $x=660$ mm 和 $x=820$ mm 截面, $\rho(\text{NO}_x)$ 均已稳定且均低于 571 mg/m^3 ($\varphi(\text{O}_2)=$

6%),这些结果表明钝体稳燃技术能有效降低 NO_x 的排放。随着 x 的增加, $\rho(\text{NO}_x)$ 相对较稳定,因此可以将 $x=820$ mm 截面作为主燃区出口,各工况下该截面的 $\rho(\text{NO}_x)$ 平均值分别为 $492, 456, 484, 518\text{ mg/m}^3$ ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$),扩展角为 29° 工况 $\rho(\text{NO}_x)$ 最低,下降了 62 mg/m^3 ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$),这可以从前面的冷态结果解释。由于扩展角为 29° 工况中轴线上单峰的存在,部分煤粉被卷吸到炉膛中心区域,提高了煤粉的整体燃烧效率和火焰稳定性,氧气被充分消耗,燃烧产生的大量CO对 NO_x 的还原分解加速,使已形成的NO与 NH_3 反应生成 N_2 ,并使 NH_3 与其他的 NH_3 反应,从而达到低 NO_x 排放的目的;同时,燃烧温度升高和煤颗粒停留时间延长在一定程度上促进了 NO_x 还原并对 NO_x 的生成具有一定的抑制作用。

综合考虑 NO_x 排放水平、着火以及稳燃等方面,推荐在试验范围内混合射流的钝体扩展角可取为 29° ,对应的阻塞比为0.23。

3 结论

在 $x=0\sim 340$ mm,不同扩展角的钝体对一次风流场的影响显著。随着钝体扩展角的增大,一次风速度和峰值减小,不同工况下二次风速的峰值差距不大。扩展角为 29° 工况,射流表现出较好的刚性,衰减缓慢,一次风速的2个峰沿炉膛中心线合并成1个峰,射流刚性增强。随着扩展角的增大,湍流强度增加,速度呈先增后减的趋势。 $x>500$ mm 后,一次风和二次风逐渐混合且速度保持在较低水平,在径向不同位置上的速度也基本保持一致。随着扩展角的增大,着火距离逐渐减小,减幅达39.4%,但扩展角为 41° 工况煤粉的着火过于提前,着火起始点过于靠近燃烧器出口,造成燃烧器出口附近结焦,甚至烧损燃烧器。在轴向(x)不同截面,扩展角为 29° 工况的温度始终大于其他工况,扩展角为 41° 工况的温度始终最低。随着 x 的增加,扩展角为 $25^\circ, 29^\circ, 34^\circ$ 工况的温差逐渐缩小,这种温差只在 $x=340$ mm 之前较显著,说明钝体扩展角对初期着火影响较大。着火初期,随着扩展角的增大, $\varphi(\text{O}_2)$ 的谷和 $\rho(\text{CO})$ 的峰在径向向外侧逐渐移动,强还原性气氛也逐渐外延。 $x=820$ mm 截面,各工况下 $\rho(\text{NO}_x)$ 平均值均较低, NO_x 减排效果较好,扩展角为 29° 工况的 $\rho(\text{NO}_x)$ 最低。从冷态流场看,中轴线上单峰的存在使部分煤粉被卷吸到炉膛中心区域,提高了煤粉燃烧效率,温度较高且分布均匀,氧气充分被消耗,还原性气氛较强, NO_x 得到抑制。综上所述,结合轴向温度、径向温度及炉膛烟气分布3方面的试验数据,推荐半焦混合燃烧的合适钝体扩展角为 29° 。

参考文献:

- [1]王建国, 赵晓红. 低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 382-388.
WANG Jianguo, ZHAO Xiaohong. Demonstration of key technologies for clean and efficient utilization of low-rank coal[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 382-388.
- [2]YAO H, HE B, DING G, et al. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156(9): 708-721.
- [3]ZHANG Jinping, JIA Xiaowei, WANG Chang'an, et al. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends[J]. Fuel, 2019, 247(9): 87-96.
- [4]IKEDA M, MAKINO H, MORINAGA H, et al. Emission characteristics of NO_x and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals[J]. Fuel, 2003, 82(15): 1851-1857.
- [5]MOON C, SUNG Y, EOM S, et al. NO_x emissions and burnout characteristics of bituminous coal, lignite, and their blends in a pulverized coal-fired furnace[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 62(5): 99-108.
- [6]WANG Chang'an, LIU Yinhe, ZHANG Xiaoming, et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China[J]. Energy Fuels, 2011, 25(7): 3634-3645.
- [7]SMREKAR J, POTOČNIK P, SENEGAČNIK A. Multi-step-ahead prediction of NO_x emissions for a coal-based boiler[J]. Applied Energy, 2013, 106(6): 89-99.
- [8]周怀春, 孙丹萍, 方庆艳, 等. 煤粉稳燃技术的发展历程和展望[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 658-663.
ZHOU Huaichun, SUN Danping, FANG Qingyan, et al. Development and prospect of combustion stabilizing technologies of pulverized coal[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 658-663.
- [9]XU Minghou, YUAN Jianwei, HAN Caiyuan, et al. Investigation of particle dynamics and pulverized coal combustion in a cavity bluff-body burner[J]. Fuel, 1995, 74(12): 1913-1917.
- [10]ESQUIVA-DANO I, NGUYEN H T, ESCUDIÉ D. Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames[J]. Combustion & Flame, 2001, 127(4): 2167-2180.
- [11]ESQUIVA-DANO I, ESCUDIÉ D. A way of considering the influence of the bluff-body geometry on the non-premixed flame stabilization process[J]. Combustion & Flame, 2005, 142(3): 299-302.
- [12]TONG Yiheng, LIU Xiao, CHEN Shuang, et al. Effects of the position of a bluff-body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131(2): 507-521.
- [13]ZENG Guang, SUN Shaozeng, YANG Xuefen, et al. Effect of the primary air velocity on ignition characteristics of bias pulverized coal jets[J]. Energy Fuels, 2017, 31(3): 3182-3195.
- [14]ZENG Guang, SUN Shaozeng, ZHANG Wenda, et al. Effects of bias concentration ratio on ignition characteristics of parallel bias pulverized coal jets[J]. Energy Fuels, 2017, 31(12): 14219-14227.
- [15]PRATIONO W, JIAN Z, CUI J, et al. Influence of inherent moisture on the ignition and combustion of wet Victorian brown coal in air-firing and oxy-fuel modes: Part 1: The volatile ignition and flame propagation[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 138(10): 670-679.
- [16]LIU Chunlong, LI Zhengqi, ZHAO Yang, et al. Influence of coal-feed rates on bituminous coal ignition in a full-scale tiny-oil ignition burner[J]. Fuel, 2010, 89(7): 1690-1694.
- [17]PRATIONO W, LIAN Z. Influence of steam on ignition of Victorian brown coal particle stream in oxy-fuel combustion: In-situ diagnosis and transient ignition modelling[J]. Fuel, 2016, 181(10): 1203-1213.
- [18]GOSHAYESHI B, SUTHERLAND J C. A comparison of various models in predicting ignition delay in single-particle coal combustion[J]. Combustion & Flame, 2014, 161(7): 1900-1910.
- [19]YE Yuan, LI Shuiqing, ZHAO Fengxuan, et al. Characterization on hetero-homogeneous ignition of pulverized coal particle streams using CH^+ chemiluminescence and 3 color pyrometry[J]. Fuel, 2016, 184(11): 1000-1006.
- [20]CLEMENTS B R, ZHUANG Q, POMALIS R, et al. Ignition characteristics of co-fired mixtures of petroleum coke and bituminous coal in a pilot-scale furnace[J]. Fuel, 2012, 97(7): 315-320.
- [21]THOMAS K M. The release of nitrogen oxides during char combustion[J]. Fuel, 1997, 76(6): 457-473.
- [22]AARNA I, SUUBERG E M. A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. Fuel, 1997, 76(6): 475-491.
- [23]PHONG-ANANT D, WIBBERLEY L J, WALL T F. Nitrogen oxide formation from Australian coals[J]. Combustion & Flame, 1985, 62(1): 21-30.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

孙刘涛(1989—),男,河南鹿邑人,在读博士研究生,从事煤洁净燃烧研究(E-mail:1095532412@qq.com)。

孙锐*(1970—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,工学博士,从事煤粉燃烧理论、大气污染与防治等方面的研究(E-mail:sunsr@hit.edu.cn)。