论文

煤粉空气分级柔和燃烧及排放特性

韩翔^{1*}, 黄明明², 张哲巖², 徐瑞¹

1. 中国科学院大学物理学院, 北京 100049;

2. 中国科学院先进能源动力重点实验室(工程热物理研究所), 北京 100190

* E-mail: hanxiang@iet.cn

收稿日期: 2016-11-27; 接受日期: 2017-04-13; 网络出版日期: 2017-06-15

国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号: 51606194)资助

摘要 柔和燃烧(又称无焰燃烧)能有效降低煤粉燃烧NO、CO的排放, 空气分级燃烧同样有利于降低NO排放. 为了探索新的燃烧方式, 进一步降低燃煤锅炉NO_x排放, 本文进行空气分级柔和燃烧特性及排放的实验研究. 实验采用直径为500 mm, 长度为3000 mm, 热容量为0.3 MW/m³的气流床装置. 研究内容包括: 炉膛流场分布规律; 一二次风量占比、燃尽风入口位置对煤粉燃烧时炉膛内温度场, 出口处NO、CO排放的影响规律. 实验结果表明: 一二次风量占比增大时, NO排放先降低后增加, CO排放逐渐降低; 燃尽风入口位置靠近烟气出口有利于降低NO排放, 但CO排放有所增加. 当一二次风量占比为0.7, 燃尽风入口位置为2600 mm时, NO排放仅为139.8 mg/Nm³(本文中的NO、CO排放量统一折算到氧气浓度为 $\phi(\text{O}_2)=9\%$ 时的排放量). 飞灰中含碳量比无空气分级时稍微增加, 燃烧稳定性没有明显变化.

关键词 天然气锅炉柔和燃烧, 空气分级, 煤粉, NO/CO排放, 分级比, 分级位置, 气流床

1 引言

燃煤产生的氮氧化物是我国大气污染的主要污染物之一, 因此, 如何控制燃煤过程中NO等污染物的排放具有重要的意义. 近年来我国对于排放NO的要求越来越严格, 燃煤锅炉排放标准要求NO排放量不能超过300 mg/Nm³, 甚至200 mg/Nm³. 越来越严格的排放标准促使我们改进煤燃烧方法, 以便进一步降低NO排放量.

降低煤粉燃烧生成NO的方法有柔和燃烧、空气分级燃烧、低NO燃烧器、低氧化剂燃烧、燃料再燃等^[1].

柔和燃烧具有反应区弥散, 温度分布均匀, 峰值温度低, 燃料适应性强等特点^[2], 并且可有效降低热力型NO生成. Effuggi等人^[3]在实验级别的锅炉上进行了天然气和沼气的混合物柔和燃烧的实验研究, 其研究表明柔和燃烧过程温度分布比传统燃烧方式均匀, NO排放有所降低, 其良好的燃烧状况有利于降低污染物排放. Weber等人^[4]在热处理量为0.58 MW的锅炉进行柔和燃烧实验研究, 空气预热到1000℃, 其研究结果同样表明柔和燃烧条件下, 炉膛内温差小, 温度梯度比传统煤粉燃烧方式小, NO排放有大幅度下降. Saha等人^[5]用实验与模拟的方法, 在立式锅炉上研究湍流大小对煤粉柔和燃烧中污染物排放的影响, 研究表明

引用格式: 韩翔, 黄明明, 张哲巖, 等. 煤粉空气分级柔和燃烧及排放特性. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1256–1264
Han X, Huang M M, Zhang Z D, et al. Study on characteristics and emission in pulverized coal air-staged MILD combusting (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1256–1264, doi: 10.1360/N092016-00412

柔和燃烧情况下NO排放都小于125 ppmv(氧气浓度为 $\phi(\text{O}_2)=3\%$), 但大的湍流会使得掺混更强, 这一点会使得CO排放增加. Weidmann等人^[6]在空气加热到423 K条件下进行柔和燃烧实验研究, 并分析了输送气体对柔和燃烧污染排放的影响规律. Mei等人^[7]研究了二次风及燃尽风速度对于污染物排放的影响规律, 研究表明适当增加二次风速度有利于降低NO排放, 温度峰值下降, 且效果比提高燃尽风速度时要好.

空气分级燃烧是降低NO生成量最有效的方法之一. 很多学者对空气分级燃烧降低NO的特性进行了实验研究^[8-18]. Ribeirete和Costa^[19]在竖式圆桶型燃烧器上进行空气分级燃烧实验研究, 实验总结了分级风沿炉膛轴向位置变化对NO、CO排放及燃尽率的影响. 分析得出分级位置靠近出口时, NO排放较低, 当分级位置到炉膛前端距离为610 mm时, NO排放降低45%; 当上述距离为1510 mm时, NO排放降低70%. 但当分级位置到炉膛前端距离大于1000 mm时, CO排放量明显增加. Fan等人^[20]在电加热多通道一维燃烧器上进行空气分级燃烧研究, 文章中研究了分级风位置及分级风量变化对NO排放的影响. 分析发现小分级比能较大程度降低NO排放量, 如分级比为0.9时, NO排放为1000 mg/Nm³; 分级比为0.75时, NO排放量低于700 mg/Nm³; 分级比为0.61时, NO排放为200~300 mg/Nm³. Li等人^[10]总结了空气分级燃烧中分级位置等对NO排放的影响规律. 赵琛杰^[14]在0.5 MW的水煤浆实验台上进行水煤浆的分级燃烧实验研究, 分别从分级风分配比例、分级风送入方式等对空气分级燃烧的影响规律, 研究发现通过调节上述条件, 当燃尽风比例为18%时, NO_x排放量能够降低到212 mg/m³(氧气浓度为 $\phi(\text{O}_2)=6\%$), 同样证明了空气分级有助于降低NO_x排放^[1]. NO排放量随分级空气入口位置向下移动呈单

调降低, 但飞灰中含碳量稍微增加^[10,21].

许多单位对煤粉的柔和燃烧及煤粉的空气分级燃烧做过研究, 但对2种燃烧方式的综合, 空气分级柔和燃烧的研究很少. 此种燃烧方式既能利用柔和燃烧降低CO、NO, 并可在此基础上利用空气分级进一步降低NO. 因此本文采用直径为500 mm, 长为3000 mm, 热容为0.3 MW/m³的水平燃烧实验装置, 研究空气分级柔和燃烧的特性. 本文主要研究内容有: 炉膛流场的分布规律; 一二次风量占总风量比例, 燃尽风入口位置对煤粉燃烧炉膛内温度场, NO、CO排放的影响规律.

2 实验系统及方法

实验所用实验台主要由炉膛主体、煤粉运输装置、空气压缩装置、烟气测量装置组成. 炉膛主体如图1(b)所示, 炉膛主体是内径为500 mm, 长为3000 mm的圆桶, 缩口长为600 mm, 出口直径为100 mm. 炉膛两侧每500 mm处有直径为40 mm的测量孔, 用来测量炉膛内温度. 左右两个燃尽风喷嘴垂直于炉膛轴向布置, 以对冲的方式喷入炉膛, 入口直径为16 mm. 测量孔在实验时保持密封, 减少检测口漏风、火焰外窜等问题. 缩口处有烟气检测孔, 烟气从检测孔流出后进入Testo350加强型烟气分析仪(仪器分析NO和CO排放的分辨率为1 mg/Nm³, NO分析精度为 ± 7 mg/Nm³或读数的 $\pm 5\%$, CO分析精度为 ± 6 mg/Nm³或读数的 $\pm 5\%$), 实现分级柔和燃烧工况烟气成分在线检测. 烟气经冷却后进行飞灰收集, 然后放空. 炉膛前端喷嘴布置结构如图1(a)所示. 煤粉喷口位于炉膛前端圆心正上方116 mm处, 直径为20 mm; 二次风喷嘴为圆周上3个直径为8 mm的圆孔.

煤粉运输采用气力输送方式. 煤粉输送风量为

图1 燃烧器和实验手段. (a) 喷嘴布置; (b) 卧式炉体结构图(俯视图)

17 Nm³/h, 煤粉流量为22 kg/h. 空气经干燥后进入压缩空气缓冲罐, 通过转子流量计为实验提供压缩空气.

本试验采用煤粉作为燃料, 试验工况如表1, 设定4组工况的过量空气系数为1.1, 空气入口温度为常温. 试验中分别比较了一二次风量占比、燃尽风入口位置对空气分级柔和燃烧特性的影响. 试验所用煤粉的工业分析、元素分析、热值等参数如表2所示. 所用煤粉粒径分布如表3所示.

3 数值计算

为了能够分析实验过程中炉膛内流场、回流等问

表1 空气分级柔和燃烧实验工况

工况	热负荷(MW)	燃尽风位置 (mm)	一二次风量 占比
1	0.3	600	0.5~0.9
2	0.3	1000	0.5~0.9
3	0.3	1600	0.5~0.9
4	0.3	2600	0.5~0.9

表2 煤粉的工业分析与元素分析^{a)}

分析项目		数值
工业分析 (air-dried, wt%)	M	3.62
	A	19.71
	V	30.71
	FC	45.96
	C	61.54
元素分析 (air-dried, wt%)	H	3.8
	O	9.47
	N	1.1
	S	0.58
$Q_{ad,net}$ (kJ/kg)		24959

a) M, 水分(moisture); V, 挥发分(volatile); FC, 固定碳(fixed-carbon); A, 灰分(ash)

表3 煤粉粒径分布

粒径(μm)	粒径分布(%)
53	0.18
75	1.95
90	35.07
106	41.67
125	13.57
180	5.93
212	1.63

题, 本文利用UG, Fluent等软件进行本次实验的模型建立和数值计算. 所建模型为全尺寸, 炉膛模型采用六面体网格, 并对喷嘴等位置进行局部加密, 总网格数约为250万个. 选择Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 湍流强度设置为10%, 采用SIMPLE算法, 动量、能量等方程采用二阶迎风格式, 采用非预混PDF燃烧模型, P-1辐射模型, 挥发分析出采用双方程挥发反应模型, 焦炭燃烧采用动力扩散控制反应速率模型, 计算中当残差小于10⁻⁶时认为收敛.

3.1 改变一二次风量占比时计算结果分析

图2为燃尽风入口位置Z=2600 mm, 一二次风量占比在0.3~0.8范围内变化时, 炉膛内轴向速度云图与迹线分布. 一二次风量占比在0.3~0.8范围内变化时, 炉膛内速度云图和迹线分布基本形态相似. 由图可看出, 煤粉入口侧存在一个大的回流区, 当一二次风量占比在0.3~0.8范围内变化时, 回流区逐渐增大. 其原因是高速射流风卷吸周围物料, 形成局部回流区. 一二次风量占比增大时, 射流风速增大, 对周围物料的卷吸增强, 因此回流区增大.

3.2 改变燃尽风位置时计算结果分析

图3为一二次风量占比为0.6, 不同燃尽风位置变化时, 炉膛内轴向速度云图与迹线分布. 由图可看出, 煤粉入口侧存在一个大的回流区, 随着燃尽风入口位置离炉膛前端距离增大时, 回流区增大并稍微向后移动. 其原因是高速射流风卷吸周围物料, 因此形成局部回流区. 燃尽风入口离炉膛前端较近时, 燃尽风的喷入影响二次射流风形成的回流区, 当燃尽风入口靠近出口时, 影响减小.

4 实验结果分析

4.1 实验火焰形态

实验前用天然气对炉膛进行预热, 当温度达到1100℃时, 通入煤粉, 天然气和煤粉同时预热炉膛, 当温度达到1250℃左右时, 按照所列工况表开始进行实验.

图4(a)为分级位置Z=1600 mm时, 过量空气系数为1.1, 一二次风量占比在0.6~0.9范围内变化, 以及旋流和射流(无分级)各工况的火焰图片. 由图中可以看出,

图2 (网络版彩图)燃尽风位置 $Z=2600\text{ mm}$ 时,不同一二次风量占比条件下炉膛轴向速度云图及迹线分布

图3 (网络版彩图)一二次风量占比为0.6时,不同燃尽风位置时炉膛轴向速度云图及迹线分布

旋流燃烧可以看到明显的火焰,且火焰明亮.射流燃烧时,整体上看柔和燃烧火焰图片较普通的燃烧方式暗,炉膛内没有明显火焰,此时为柔和燃烧方式.分级

比在0.6到无分级工况变化时,火焰逐渐变暗,从形态上来说更趋向于柔和工况.其原因主要是,当分级比较大如0.9时,二次风有较高的速度,高速的二次射流

图4 (网络版彩图)煤粉柔和分级燃烧火焰图片. (a) 分级位置 $Z=1600$ mm; (b) 分级比为0.8

风,能够卷吸更多烟气,有较好的混合效果,使得炉膛内燃烧状况更好.

图4(b)是一二次风量占比(即分级比)为0.8时,分级位置从600 mm变化到2600 mm及无分级各工况的火焰图片.由图中可看出,分级位置越靠近炉膛出口时,炉膛内火焰越趋于柔和形态,炉膛越暗,其原因是当分级位置靠前时,燃尽风的喷入破坏了二次风形成的回流涡,使得其卷吸烟气减少,部分破坏了柔和燃烧形成条件,因此,分级位置越靠后越有利于柔和燃烧条件的形成,但空气分级柔和燃烧最优的实验工况则要综合多个因素,达到总体最优.

4.2 一二次风量占比对空气分级柔和燃烧的影响

4.2.1 一二次风量占比对炉膛温度的影响

空气分级柔和燃烧可结合柔和燃烧的温度均匀,减少NO和CO排放与空气分级燃烧降低NO排放的优势.图5为过量空气系数为1.1,一二次风量占比在0.5~0.9范围内变化时,炉膛内温度沿炉膛轴向变化的趋势图.由图中可看出,当一二次风量占比在0.6~0.9范围内变化时,测温点温度差小于 100°C .尤其是当一二次风量占比比较大,如一二次风量占比为0.9时,测温点的温差为 70°C 左右.原因是当一二次风量占比比较大时,二次风风速较高,有利于柔和燃烧.从数值模拟结果(图2)也可看出一二次风量占比增大时,烟气卷吸增强,回流的烟气对炉膛前端反应物有更强的预热作用,因此前端有较高的温度.由图中可知,炉膛内最高温度点距离喷嘴较远,甚至当一二次风量占比为0.5时,最高温度点出现在了炉膛尾部.炉膛前端的相对低温更利于降低NO.

图5 (网络版彩图)燃尽风位置 $Z=2600$ mm时,不同一二次风量占比时炉膛内温度分布

4.2.2 一二次风量占比对NO, CO排放的影响

保持实验过量空气系数为1,分级风即燃尽风位置不变,一次风不变,一二次风量占比在0.5~0.9之间变化,观察煤粉分级燃烧NO, CO的排放情况及生成规律.

图6(a)为NO排放随一二次风量占比在0.5~0.9范围内变化的趋势图,图中可以看出当一二次风量占比从0.5~0.9范围内变化时,NO的排放先下降后上升,一二次风量占比在0.7~0.8之间时,排放较小.由于炉膛温度分布可知炉膛内温度不超过 1200°C ,在此温度下,热力型NO生成很少,生成的NO主要来自于煤粉中的挥发分燃料N.但当一二次风总量占比在0.5~0.9之间变化时,主燃烧区富燃,表现为还原性气氛,生成大量的CO, HN, HCN, NH_3 等还原性组分,在还原气氛中煤粉燃烧可抑制NO的生成,并且促进 NO_x 的还原反应,

图6 (网络版彩图)不同一二次风量占比时NO排放(a)和CO排放(b)的变化趋势

使得燃料中的N元素主要以 N_2 的形式生成,因此能够降低NO的生成量.在燃尽区分级风的加入对烟气有冷却作用和稀释作用,使得烟气中的可燃成分在进一步燃烧的情况下也不会生成太多的NO.当一二次风量占比较小,如0.5,0.6时,由于主燃烧区过度缺氧,燃烧效率较低,释放热量较少,不足以使NO有效还原,另外二次风量小,不足以维持二次风的高速射流,数值模拟分析也可看出此时炉膛内流场回流较弱,掺混效果较差,烟气对反应物的预热效果差.炉膛内柔和燃烧效果较差,温度分布不均匀,使得NO排放升高.当一二次风量占比过高,如0.9时,NO的排放增加,主要是因为当一二次风量占比太高时,由模拟结果可知回流效果很强,烟气的预热效果好,但主燃烧区的还原性气氛较弱,还原性成分如CO, H₂, HCN, NH₃等生成量少,不足以使生成的燃料NO充分转化为 N_2 .没有达到良好的分级效果.因此NO的排放规律呈现随一二次风量占比的增加先降低后升高的趋势.

图6(b)为CO排放随一二次风量占比在0.5~0.9间变化的趋势图,由图可以看出,随一二次风量占比的增加,CO排放逐渐降低.其原因是随着一二次风量占比从0.5~0.9增加,主燃烧区的过量空气系数逐渐增加,燃尽率逐渐增加,火焰温度也逐渐增加,使得CO更多地转化为CO₂,另外,随着一二次风量占比的增加,二次风速随之增加,回流比增大,气固掺混更均匀,高温烟气对反应物的预热加强,加快了燃烧反应速度,高速的射流使得柔和燃烧效果更好,炉膛内温度更加均匀,烟气转化也更加完全,补充风即燃尽风量较少,使得其不会对烟气的温度造成太大冷却效果,进一步减少烟气中CO含量.

4.3 燃尽风位置对空气分级柔和燃烧的影响

4.3.1 燃尽风位置对炉膛温度的影响

空气分级燃烧中,主燃烧区的还原性气氛抑制NO的生成.如数值冷态计算(图3)显示,可从燃尽风喷嘴所在截面划分,燃尽风之前为还原区,燃尽风之后为氧化区.烟气在主燃烧区停留时间的长短也影响着NO的还原效果,因此空气分级燃烧中要求燃尽风入口距离主燃烧区要有一定距离.对于不同的煤种、不同的燃烧器,燃尽风到主燃烧区的距离有所不同.因此本组工况采用固定一二次风量占比,燃尽风入口到炉膛顶部距离从600 mm变化到2600 mm.由图7中测温点的温度曲线可以看出,燃尽风入口位置不同,炉膛内温度最高点的位置也不同.燃尽风喷入炉膛内,在燃尽

图7 (网络版彩图)一二次风量占比为0.9,不同分级风位置时温度分布

风喷口下游, 炉膛内烟气温度的有稍微上升的趋势. 当燃尽风入口距离炉膛前端较远时, 炉膛前端温度较低.

4.3.2 燃尽风位置对NO, CO排放的影响

图8(a)为过量空气系数为1.1, 固定一二次风量占比, 燃尽风到炉膛前端距离分别为600, 1000, 1600和2600 mm时, 烟气中NO排放量. 可以看出, 当燃尽风入口位置到炉膛前端距离增加时, NO排放量逐渐减小, 当燃尽风入口位置到炉膛前端距离为2600 mm时, NO的排放量为 139.8 mg/Nm^3 (一二次风量占比为0.7). 燃尽风到炉膛前端距离增加时, 主燃烧区变长, 体积增大, 烟气在还原气氛中停留的时间增加, 促进了烟气中NO还原, 而烟气在燃尽区的停留时间减少, 因此燃尽风入口位置到炉膛前端的距离增加时, NO排放量有大幅度的减少. 另外从数值模拟结果(图3)可以看出, 燃尽风的通入影响炉膛内回流的发展, 影响了高温烟气对反应物的掺混和预热作用, 燃尽风入口位置到炉膛前端的距离增加时, 燃尽风对炉膛流场的影响变小 (如燃尽风入口位于炉膛尾部平推流区域中), 较好的柔和燃烧工况对降低NO的排放有一定效果.

从图中可看出, 一二次风量占比为0.7时, NO的排放曲线低于一二次风量占比为0.9时的排放曲线. 当燃尽风轴向位置Z为2600 mm时, 排放量基本相同. 说明当一二次风量占比比较小时, 主燃烧区的还原性气氛较强, 燃尽风入口位置到炉膛前端的距离相对较小时, NO排放较小. 而一二次风量占比为0.9时, 则燃尽风入口位置距离炉膛前端需要更长的距离才能使NO

的排放有较低水平.

图8(b)为一二次风量占比不变, 燃尽风入口位置变化时, CO的排放变化趋势. 由图中曲线走势可以看出, 随着燃尽风入口位置到炉膛前端距离逐渐增大时, CO排放量从小幅度增加到后端大幅度增加. 燃尽风入口位置到炉膛前端距离从600 mm变化到1000 mm时, 燃尽区变短, 烟气停留时间变短, 烟气中CO转化 CO_2 的时间变短, 但如图3所示燃尽风位置向后移动, 主燃烧区变长, 二次高速射流形成的回流增加, 增强了高温烟气的预热效果, 形成的柔和燃烧效果增加, 良好的柔和燃烧工况有利于降低CO, 综合上述因素, CO曲线在前部分稍微增加, 当燃尽风入口位置到炉膛前端距离继续增加时, 燃尽风对柔和燃烧造成的影响变小, 而由于烟气燃尽时间缩短造成的影响变大, 造成曲线后部分CO有大幅度增加.

4.4 空气分级柔和燃烧对煤粉燃尽率的影响及改进措施

空气分级柔和燃烧方式, 由于存在还原区, 炉膛内温度相对较低, 煤粉颗粒相对较大, 固体颗粒在燃尽区停留时间短, 又由于燃尽风温度低, 其升温预热需要时间, 并且在一定程度上干扰炉膛内的流场. 另外, 试验阶段炉膛较短, 实际锅炉中, 反应区不但有炉膛, 还有低温过热器、高温过热器、省煤器、空气预热, 部分氧化反应提前进行, 实际锅炉氧化时间长于试验炉, 这些因素共同作用, 使得飞灰中含碳量偏高, 飞灰中碳元素的质量分数达到7%, 因此空气分级燃烧不利于

图8 (网络版彩图)不同分级风位置时NO排放(a)和CO排放(b)的变化趋势

降低飞灰中含碳量. 综合此种燃烧方式的特点可以得到降低飞灰中含碳量以及降低烟气中CO含量的方法.

(1) 燃尽风预热: 提高燃尽风的温度能够加快燃尽风与烟气中可燃成分的反应, 并且有助于提高燃尽区温度, 从而提高燃烧完全度.

(2) 增加燃尽风速度: 提高燃尽风速度有利于增强燃尽风与烟气的掺混, 使得O₂分子能够同CO、飞灰中的碳等充分接触, 提高反应速率.

(3) 降低煤粉颗粒直径: 实验所用煤粉颗粒平均直径比较大, 选用平均粒径较小的煤粉能增强气固接触, 提高燃烧反应速率, 从而提高燃烧完全度.

(4) 燃尽风喷嘴采用切向进气, 使得燃尽区以旋流方式向前运动, 有助于增强混合, 并且延长烟气的停留时间, 使得CO、固体颗粒等有较长的时间进行反应.

5 结论

为了降低煤粉燃烧NO等污染物的排放量, 进行了煤粉的空气分级柔和燃烧, 实验中研究分析了一二次风量占比、燃尽风入口位置等对炉膛内温度场, 出口处NO、CO排放的影响规律. 通过实验获得如下结论.

(1) 空气分级柔和燃烧能够进一步降低NO排放.

(2) 一二次风量占比增大时, NO排放先降低后增加, CO排放则逐渐降低.

(3) 燃尽风入口位置靠近烟气出口有利于降低NO排放, 但CO排放增加. 当一二次风量占比为0.7, 燃尽风入口位置2600 mm处时, NO排放仅为139.8 mg/Nm³.

(4) 飞灰中含碳量比无分级时稍微有所增加, 燃烧稳定性没有明显变化.

参考文献

- 1 赵琛杰, 周俊虎, 刘建忠, 等. 水煤浆空气分级燃烧及排放特性试验研究. 中国电机工程学报, 2011, 31: 13–17
- 2 Tu Y, Liu H, Chen S, et al. Numerical study of combustion characteristics for pulverized coal under oxy-MILD operation. *Fuel Process Technol*, 2015, 135: 80–90
- 3 Effuggi A, Gelosa D, Derudi M, et al. Mild combustion of methane-derived fuel mixtures: Natural gas and biogas. *Combust Sci Tech*, 2008, 180: 481–493
- 4 Weber R, Smart J P, Kamp W. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air. *Proc Combust Institute*, 2005, 30: 2623–2629
- 5 Saha M, Dally B B, Medwell P R, et al. Burning characteristics of Victorian brown coal under MILD combustion conditions. *Combust Flame*, 2016, 172: 252–270
- 6 Weidmann M, Verbaere V, Boutin G, et al. Detailed investigation of flameless oxidation of pulverized coal at pilot-scale (230 kW_{th}). *Appl Therm Eng*, 2015, 74: 96–101
- 7 Mei Z, Li P, Wang F, et al. Influences of reactant injection velocities on moderate or intense low-oxygen dilution coal combustion. *Energ Fuels*, 2014, 28: 369–384
- 8 Richards G H, Maney C Q, Borio R W, et al. Ulter low NO_x intergrated system for emission control from coal-fired boilers. Alstom Power Inc. (US) Technical Report, 2002
- 9 Taniguchi M, Kamikawa Y, Tatsumi T, et al. Staged combustion properties for pulverized coals at high temperature. *Combust Flame*, 2011, 158: 2261–2271
- 10 Li S, Xu T, Hui S, et al. Optimization of air staging in a 1 MW tangentially fired pulverized coal furnace. *Fuel Process Technol*, 2009, 90: 99–106
- 11 Fan W, Li Y, Guo Q, et al. Coal-nitrogen release and NO_x evolution in the oxidant-staged combustion of coal. *Energy*, 2017, 125: 417–426
- 12 Spliethoff H, Greul U, Rüdiger H, et al. Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility. *Fuel*, 1996, 75: 560–564
- 13 旷金国. 高效空气分级燃烧控制燃煤排放的技术理论研究. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2010
- 14 赵琛杰. 水煤浆空气分级燃烧技术降低排放试验研究及数值模拟研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2011
- 15 周俊虎, 匡建平, 周志军, 等. 粉煤气化炉冷态和热态流场分布特性的数值模. 中国电机工程学报, 2007, 27: 30–35
- 16 佐双吉. 空气分级燃烧降低排放技术的研究. 硕士学位论文. 保定: 华北电力大学, 2007
- 17 王浩, 邹琳江. 空气分级燃烧降低排放技术的研究. 工业加热, 2008, 37: 8–11
- 18 Xing X, Wang B, Lin Q. Structure of reaction zone of normal temperature air flameless combustion in a 2 ton/h coal-fired boiler furnace. *Proc I Mech E*, 2007, 221: 473–480

- 19 Ribeirete A, Costa M. Impact of the air staging on the performance of a pulverized coal fired furnace. *Proc Combust Inst*, 2009, 32: 2667–2673
- 20 Fan W, Lin Z, Kuang J, et al. Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion. *Fuel Process Technol*, 2010, 91: 625–634
- 21 Ribeirete A, Costa M. Detailed measurements in a pulverized-coal-fired large-scale laboratory furnace with air staging. *Fuel*, 2009, 88: 40–45

Study on characteristics and emission in pulverized coal air-staged MILD combusting

HAN Xiang¹, HUANG MingMing², ZHANG ZheDian² & XU Rui¹

¹ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Moderate & Intense Low-oxygen Dilution (MILD) combustion is a useful measure to reduce NO_x, CO emission significantly. It also works well to reduce NO_x in air-stage combustion. So we take air-stage MILD combustion as our study theme direction. The study was carried on a 0.3 MW/m³ large-scale laboratory entrained furnace whose radius is 500 mm and length is 3000 mm. The study content includes: flow distribution of the entrained furnace; effect on the temperature distribution and NO_x, CO emission of the pulverized coal entrained furnace for different air-stage coefficient and stage air location. The main conclusions are as follows: NO emission firstly decreases and then increases as air-stage coefficient increases, CO emission decreases continually; it is benefit to decrease NO emission but CO emission increases when air-stage location is close to the outlet. NO emission reaches only 139.8 mg/Nm³ when air-stage coefficient is 0.7 and stage air location is 2600 mm (all the emission value in this test for the NO and CO is converting to O₂ concentration $\phi(\text{O}_2)=9\%$). It slightly increases the carbon content in fly ash using air-stage combustion and combustion stability does not change significantly.

MILD combustion, air-stage, pulverized coal, NO/CO emissions, stage air coefficient, stage air location, entrained furnace

doi: 10.1360/N092016-00412