

马仑,方庆艳,汪涂维,等. 混煤燃烧过程中的交互作用:煤种对混煤燃烧与  $\text{NO}_x$  排放特性的影响[J]. 煤炭学报,2017,42(9): 2440-2446. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1722

MA Lun, FANG Qingyan, WANG Tuwei, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Influence of coal rank on combustion and  $\text{NO}_x$  emission characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2440-2446. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1722

## 混煤燃烧过程中的交互作用:煤种对混煤燃烧与 $\text{NO}_x$ 排放特性的影响

马 仑,方庆艳,汪涂维,王廷旭,郭岸龙,谭 鹏,张 成,陈 刚

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**在沉降炉上开展了无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤以及不同配比(25%、50%、75%)下混煤燃烧特性实验,研究了“炉外”和“炉内”两种掺烧方式下煤种对混煤燃尽及  $\text{NO}_x$  排放特性的影响。结果表明,不同煤种掺混燃烧时促进和抑制两种交互作用具有差异性。“炉外”掺烧方式下,挥发分含量差异较大的煤掺混时,交互作用明显;尤其是掺烧75%高挥发分煤时,对燃尽抑制作用表现最为显著,混煤的燃尽降低;挥发分含量差异较小的煤掺混时,交互作用相对较小,混煤的燃尽率在各掺混比例下基本接近计算线性燃尽率;混煤燃烧的  $\text{NO}_x$  排放特性随挥发分较高的煤的掺混比例增加基本呈线性变化的规律。“炉内”掺烧方式下,随两种煤延迟混合时间的增加,交互作用逐渐减弱,各单煤的燃烧独立性增强,混煤燃尽率逐渐接近计算线性燃尽率;挥发分含量差异较大的煤掺混时,改变混合时间,混煤燃尽率变化显著,挥发分含量差异较小的煤掺混时,各单煤燃烧独立性较强,改变混合时间,混煤燃尽率变化不明显;混煤  $\text{NO}_x$  排放量随延迟混合时间的增加而逐渐降低。

**关键词:**混煤掺烧;掺烧方式;煤种;沉降炉;交互作用;燃尽率

中图分类号:TQ534

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)09-2440-07

### Interaction of blended-coal combustion process: Influence of coal rank on combustion and $\text{NO}_x$ emission characteristics

MA Lun, FANG Qingyan, WANG Tuwei, WANG Tingxu, GUO Anlong, TAN Peng, ZHANG Cheng, CHEN Gang

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The influence of coal rank on the combustion and  $\text{NO}_x$  emission characteristics are performed for four coals and their blended coals (25%, 50% and 75%) under the out-furnace and in-furnace blending methods in this paper. The results show that these two opposite effects during the blended coal combustion, i. e. the promote function and the restrain function, are different under different types of coals. Under the out-furnace blending method, the interaction of blended coal is obvious when the volatile content of coals is widely different; especially, the burnout rate decreases obviously and the restrain function are found at the blending ratio of 75%. The interaction of blended coal is slight when the volatile content of coals is similar, the blended-coal burnout rate is closed to the linear principle.  $\text{NO}_x$  emissions of blended coals follow the linear principle. Under the in-furnace coal blending method, the independent combustion of individual coals is enhanced as postponing the mixing time, and the blended-coal burnout rate is closed to the linear predicated value, the independent combustion of individual coals becomes stronger. For these coals with widely differ-

收稿日期:2016-12-06 修回日期:2017-04-01 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51676076)

作者简介:马 仑(1990—),男,四川巴中人,博士研究生。Tel:027-87542417-8510, E-mail: malun3g@126.com。通讯作者:方庆艳(1974—),男,湖北孝感人,副教授。Tel:027-87540249, E-mail: qyfang@hust.edu.cn

ent volatile content, the effect of the mixing time on the burnout is significant; but for these coals with similar volatile content, the blended-coal burnout rate change is slight as postponing the mixing time. NO<sub>x</sub> emissions of blended coals decrease as postponing the mixing time.

**Key words:** blend-coal combustion; blending method; coal rank; drop tube furnace; interaction; burnout characteristic

我国煤炭资源有限且分布不均,随国民经济持续快速的发展,电煤使用量持续增加。但是,由于煤炭价格持续涨高和煤炭运力不足,众多火电企业难以燃用设计煤种。煤种多、煤源杂、煤质差成为我国电煤供应的基本现状,使得火力发电企业的多煤种混烧成为当前局面下的必然选择。混煤燃烧不仅能扩展能源动力设备对燃料的适应性和降低运行故障率,还能提高燃料的燃烧效率和降低污染物的排放,在燃煤电站锅炉上得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。在混煤燃烧过程中,组分煤之间存在着复杂的耦合传热传质和化学反应的交互作用。一般说来,混煤燃烧时若煤种选择恰当、混合均匀、配比合理、创造良好的燃烧条件,发挥组分煤种各自的优越性,弥补单一煤种自身燃烧特性的缺陷,给锅炉的安全和经济性带来良好的影响。然而,混煤虽然是一个简单的机械混合过程,但由于不同煤种的组成及燃烧特性不同,掺烧时不可能同时满足掺混煤种的燃烧条件,因此若混煤配置不当,会造成燃烧设备运行水平下降,燃烧不稳定,效率降低,结渣积灰加剧,甚至造成锅炉灭火停炉事故。由于不同煤种的反应性不同,其混煤的着火、燃烧、燃尽和污染物排放特性等会受到混煤之间的交互作用影响而无法按线性可加性进行预测。国内外研究者对混燃过程中的交互作用及其对燃烧和污染物排放特性影响开展了理论、不同尺度下的实验与数值模拟研究<sup>[1-11]</sup>。混煤燃烧过程中组分煤之间同时存在着两种不同的相互作用:促进和抑制作用;这两种作用决定了混煤的着火和燃尽特性以及 NO<sub>x</sub> 排放特性<sup>[12-15]</sup>。在沉降炉上的研究表明<sup>[12-15]</sup>,采用炉外掺烧方式,贫煤和高挥发分烟煤掺混时,当烟煤的掺混比例小于 25% 时,促进作用起主导作用,有利于改善混煤的着火和燃尽特性;但当烟煤的掺混比例大于 25% 时,尤其是在 75% 左右时,抑制作用逐渐起主导作用,不利于改善混煤的燃尽特性,这就是所谓的“抢风现象”。在四角切圆煤粉锅炉上对混煤掺混方式研究的结果表明,混煤掺烧方式对混煤燃尽和 NO<sub>x</sub> 排放特性有明显的影 响,相较于炉外掺烧方式,合理的炉内掺烧方式可有效降低未燃尽碳与 NO<sub>x</sub> 排放量,但不合理的炉内掺烧方式反而会导致未燃尽碳与 NO<sub>x</sub> 排放量增加<sup>[16]</sup>。上述研究对加深混煤燃烧过程中存在的交互作用机理以及选择合理的混煤掺烧方

式具有重要的指导意义。但这些研究主要针对贫煤和高挥发分烟煤的混煤来开展的,鉴于实际电站锅炉中大差异特性混煤燃烧应用较多以及进一步加深对多阶煤混燃过程中的交互作用机理认识的需求,仍需对不同煤阶煤种的混煤燃烧进行更加系统的研究。

在前文中,建立了可以实现“炉内”和“炉外”两种掺烧方式的沉降炉实验系统,开展了混煤燃烧过程中的交互作用机理研究<sup>[12]</sup>和掺烧方式对混煤燃烧及 NO<sub>x</sub> 排放特性影响的研究<sup>[13]</sup>。本文在该实验系统上,采用无烟煤、贫煤、高挥发分烟煤和褐煤及其不同比例的混煤,进一步开展了混煤燃尽及 NO<sub>x</sub> 排放特性实验,研究了多阶煤混燃过程中的交互作用机理及其对混煤燃尽及 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响,以期深化对混燃过程中的交互作用机理的认识和为电站锅炉混煤掺烧优化调控提供理论依据和指导。

## 1 实验系统和工况

### 1.1 沉降炉实验系统

沉降炉实验台的实验系统如图 1 所示,主要包含给粉系统、沉降炉炉体、反应管以及由配气系统、温控系统、水冷却系统、取样分析系统等组成的辅助系统。反应管内径 70 mm,总长度 1 400 mm,有效加热段 1 000 mm。整个沉降炉炉体分为上、中和下 3 段

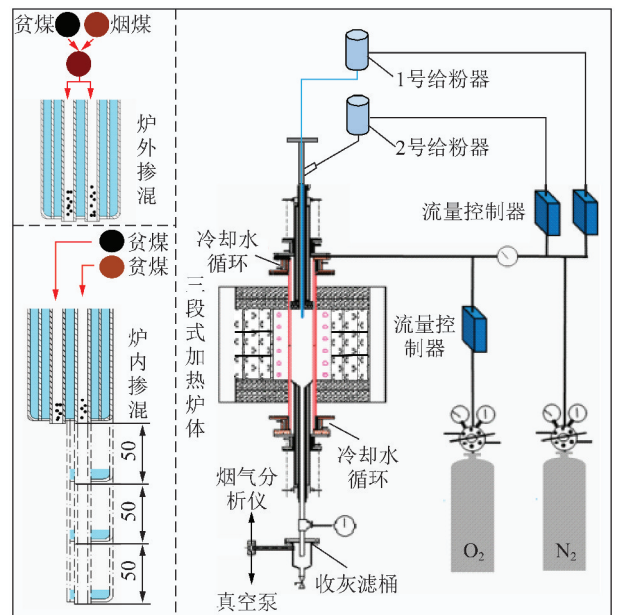


图 1 实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of the test bed

加热区域,以此来保证炉膛内加热温度的均匀分布。实验平台可实现“炉内”和“炉外”两种掺烧方式,如图1所示左侧所示:①将两种煤粉通过两个给粉器1号和2号分别送入炉内,这种方式即为“炉内”掺烧;②预先按比例掺混两种煤粉,然后通过两个给粉器送入炉内,这种方式即为“炉外”掺烧。本文采用给粉器为PEF-90AL型双级振动盘式的常压给粉器(日本Sanki公司生产),其工作原理为:煤粉在倒入给粉器后,在振动盘周围的凹槽中形成一个粉末层,煤粉在振动力的驱动下顺着凹槽向前移动,然后注入到出粉口。通过控制振动电机的电压与频率,实现对给粉量的精确控制,给粉范围为0~2 g/min,其

给粉精度在 $\pm 5\%$ 。在“炉内”掺烧方式下,给粉管采用了4种长度差,以控制两种煤粉在炉内的延迟混合时间,分别为0,50,100,150 mm。

## 1.2 实验工况

实验所用煤的元素分析和工业分析见表1,根据挥发分含量可以将煤分为两大类,低挥发分煤(无烟煤、贫煤)以及高挥发分煤(烟煤、褐煤)。煤粉粒径为75~125  $\mu\text{m}$ ,总给粉量为0.5 g/min;实验一次风为氮气,二次风为氮气/氧气混合气体,氧气的体积分数为15%,混煤中掺烧比例分别为0,25%,50%,75%,100%,过量空气系数取1.2,实验温度为1100  $^{\circ}\text{C}$ 。

表1 煤种工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of coals

煤种	工业分析/%				元素分析/%					LHV/ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$\text{FC}_{\text{ad}}$	$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$S_{\text{ad}}$	
褐煤	2.58	25.83	45.24	26.34	47.32	3.69	19.23	1.35	0.65	18.26
烟煤	2.05	17.13	29.86	50.96	61.21	3.76	14.37	0.97	0.51	25.60
贫煤	1.14	21.98	14.61	62.27	68.73	3.12	3.27	1.24	0.52	26.89
无烟煤	1.12	29.66	7.76	61.45	62.00	2.16	4.38	0.68	2.10	22.98

## 2 结果与讨论

### 2.1 “炉外”掺烧方式下不同煤种掺混时混煤的燃尽及NO<sub>x</sub>排放特性

在“炉外”掺烧方式进行了以下实验研究:低挥发分煤与高挥发分煤掺混、高挥发分煤与高挥发分煤掺混、低挥发分煤与低挥发分煤掺混。

#### 2.1.1 低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤的燃尽特性

“炉外”掺烧方式下低挥发分煤与高挥发分煤掺混燃烧特性如图2所示。可以看出,低挥发分煤掺混高挥发分煤时,随高挥发分煤掺烧比例的增加,混煤的燃尽率呈现出“先增大后减少、然后再增大”的变化趋势。这主要是由于在混煤燃烧中存在两种明显的交互作用:促进作用和抑制作用会,共同影响混煤燃尽特性<sup>[12-15]</sup>。前者产生的主要原因是高挥发分煤挥发分产率高,着火及燃烧快,提高了局部温度,促进了低挥发分煤的着火和燃烧;而后者产生的主要原因是高挥发分煤会抢先与氧气反应(即“抢风现象”),消耗大量的氧气,使低挥发分煤燃烧处于欠氧状态,阻碍了低挥发分煤的燃尽。

低挥发分煤与高挥发分煤掺混时,混煤挥发分含量差异排序为:褐煤+无烟煤>褐煤+贫煤>烟煤+无烟

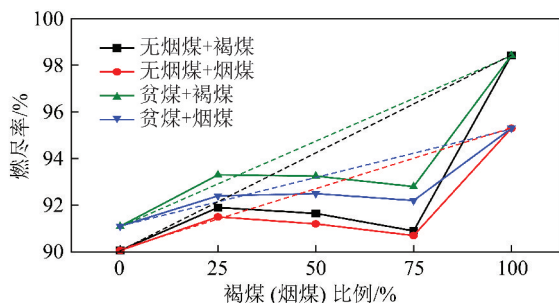


图2 炉外掺混下低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤燃尽特性

Fig. 2 Burnout characteristic of low-volatile coals blending with high-volatile coals under out-furnace blending method

煤>烟煤+贫煤。如图2所示,混煤燃尽率基本符合以下规律:褐煤+贫煤>烟煤+贫煤>褐煤+无烟煤>烟煤+无烟煤。可以看出,贫煤与高挥发分煤掺混的混煤燃尽率高于无烟煤与高挥发分煤掺混的混煤燃尽率;褐煤与低挥发分煤掺混的燃尽率高于烟煤与低挥发分煤掺混的混煤燃尽率。这表明,在低挥发分煤与高挥发分煤掺混时,低挥发分煤挥发分越高,混煤燃尽率越高;高挥发分煤挥发分越高,混煤燃尽率越高。这主要是因为:①低挥发分煤挥发分越高,“抢风现象”的抑制作用对其燃烧影响越小;②高挥发分煤挥发分越高,燃烧性能越好,在混煤燃烧中,其预先燃烧对于混煤中低挥发分煤的燃烧帮助(促进作用)更

大。在75%掺混比例下,褐煤/无烟煤实际燃尽率与线性燃尽率的偏离程度大于褐煤/贫煤;烟煤/无烟煤实际燃尽率与线性燃尽率的偏离程度大于烟煤/贫煤,这表明,单煤挥发分差异(即燃烧特性差异)越大,其混煤交互作用越明显,燃尽越易变差。

### 2.1.2 高挥发分煤掺混高挥发分煤、低挥发分煤掺混低挥发分煤时混煤燃尽特性

图3为“炉外”掺烧方式下高挥发分煤掺混高挥发分煤、低挥发分煤掺混低挥发分煤时混煤燃尽特性。可以看出混煤燃烧的燃尽率变化基本随高挥发分煤掺烧比例的增加而逐渐增加。烟煤掺烧褐煤时,混煤的燃尽率随掺混比例的增加而逐渐增加,但在掺混75%褐煤时混煤的燃尽率低于线性燃尽率,这主要是由于挥发分较高褐煤的煤燃烧消耗氧气的速率高于烟煤,存在轻微的抢风抑制作用。无烟煤与贫煤掺混燃烧时,混煤的燃尽率随贫煤的掺混比例增加而逐渐增加,且都高于线性燃尽率,这是由于无烟煤和贫煤都属于挥发分含量较低的小差异煤种,各自都能保持独立的燃烧特性。

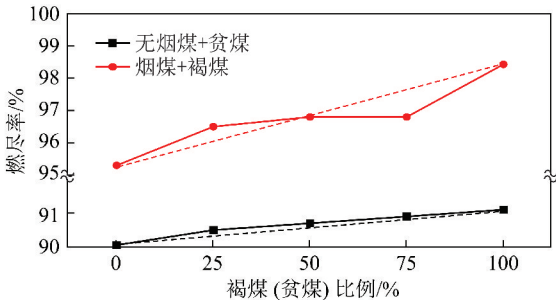


图3 炉外掺混下高挥发分煤掺混高挥发分煤、低挥发分煤掺混低挥发分煤时混煤燃尽特性

Fig. 3 Burnout characteristic of high-volatile coal blending with high-volatile coal, low-volatile coal blending with low-volatile coal under out-furnace blending method

### 2.1.3 不同煤种“炉外”掺混时混煤 NO<sub>x</sub> 排放特性

煤中挥发分热解生成的 HCN, NH<sub>3</sub> 等中间产物,在氧化性气氛下被氧化生成 NO<sub>x</sub>,通常来说 NO<sub>x</sub> 的排放量:①随燃料 N 的增加而增加;②挥发分高的煤(烟煤和褐煤)的燃料 N 转化率高于挥发分低的煤(无烟煤和贫煤)<sup>[17]</sup>,故对于本文研究所用单煤 NO<sub>x</sub> 的排放量:烟煤(或褐煤) > 贫煤 > 无烟煤。虽然褐煤燃料 N 高于烟煤燃料 N,但烟煤 NO<sub>x</sub> 的排放量高于褐煤,这是因为在较强的氧气性气氛下,HCN 比 NH<sub>3</sub> 更容易被氧化为氮氧化物,对于烟煤 HCN/NH<sub>3</sub> 的比例较大,而褐煤热解过程产生 HCN/NH<sub>3</sub> 的比例较小<sup>[18]</sup>。“炉外”掺烧方式下的不同混煤燃烧 NO<sub>x</sub> 排放结果如图4所示。混煤燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 的释放

基本处于其组分煤单独燃烧的 NO<sub>x</sub> 值之间,虽然但存在一定的波动,但 NO<sub>x</sub> 的释放基本是呈线性变化的。除了烟煤掺混褐煤外,其余混煤 NO<sub>x</sub> 的排放量随挥发分较高的煤的掺混比例增加而增加,这表明炉外掺烧方式对混煤燃烧中生成的 NO<sub>x</sub> 并没有明显降低。

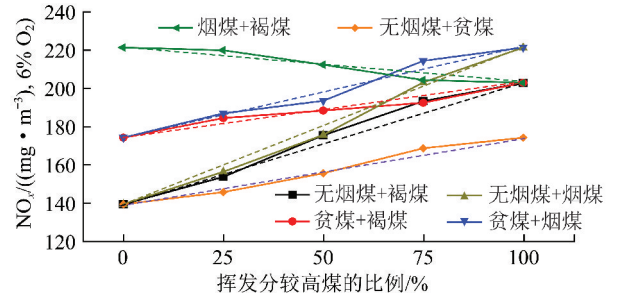


图4 炉外掺混下不同混煤的 NO<sub>x</sub> 排放特性

Fig. 4 NO<sub>x</sub> emissions characteristic of different blended coals under out-furnace blending method

## 2.2 “炉内”掺烧方式下混煤燃尽及 NO<sub>x</sub> 排放特性

在“炉内”掺烧方式下,通过改变两根给粉管长差  $\Delta L$  控制两种煤粉在炉内延迟混合的时间,  $\Delta L$  值越大,表明两者混合越延迟。基于前文的研究<sup>[13]</sup>,挥发分较高的煤从长管送入反应器,而挥发分较低的煤从短管送入反应器。

### 2.2.1 低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤燃尽特性

“炉内”掺烧方式下低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤的燃尽特性结果如图5所示。给粉管长差  $\Delta L=0$  时,低挥发分煤和高挥发分煤同时送入炉内,这与“炉外”掺混相似,混煤燃烧中促进和抑制两种交互作用共同影响燃尽特性。当高挥发分煤的掺混比例小于25%时,促进作用起主导作用,有利于改善混煤的着火和燃尽特性;但当高挥发分煤的掺混比例大于25%时,尤其是在75%左右时,抑制作用逐渐起主导作用,不利于改善混煤的燃尽特性(无烟煤掺混褐煤燃尽特性变差最为明显)。当高挥发分煤的掺混比例小于25%时,混煤燃尽率随混合时间的延迟而逐渐减小,这是因为“炉内”掺烧方式下,高挥发分煤先燃烧提高燃烧区域局部温度的促进作用对混煤燃烧起主导作用,随混煤混合时间的延迟,促进作用逐渐减弱,混煤的燃尽率逐渐降低。而对于当高挥发分煤的掺混比例大于25%时,混煤燃尽率随混合时间的增加而逐渐增大,这主要是由于高挥发分煤先燃烧消耗氧气对烟煤燃烧的抑制作用占主导作用,随混合时间的增加,抑制作用逐渐减弱,混煤的燃尽率逐渐增加。

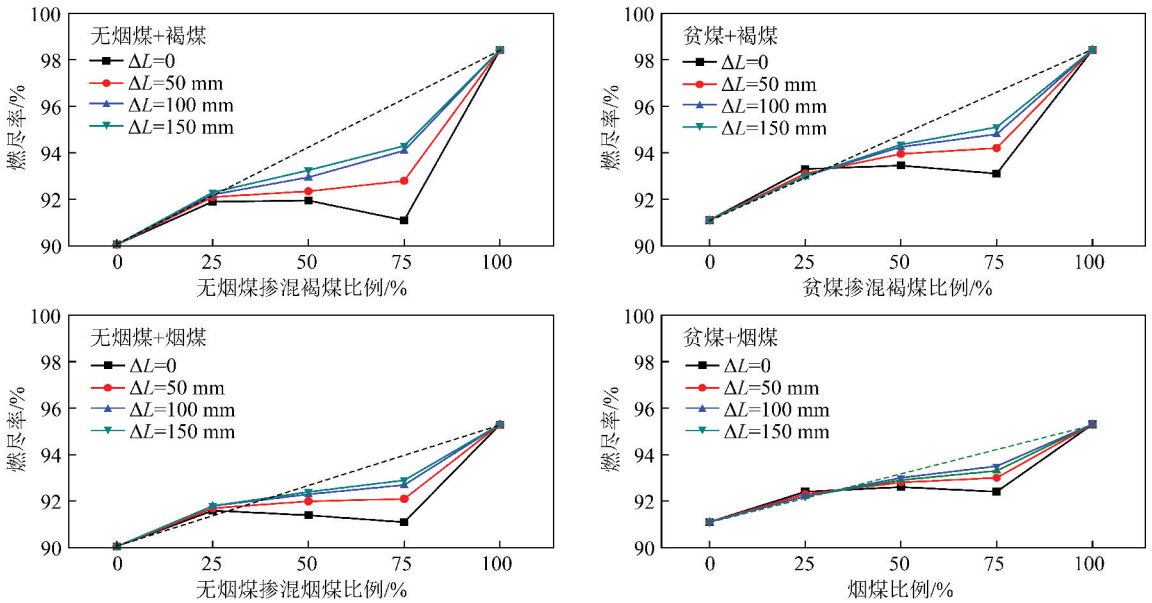


图5 炉内掺混下低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤燃尽特性

Fig. 5 Burnout characteristic of low-volatile coals blending with high-volatile coals under in-furnace blending method

### 2.2.2 高挥发分煤掺混高挥发分煤、低挥发分煤掺混低挥发分煤时混煤燃尽特性

“炉内”掺烧方式下高(低)挥发分掺混高(低)挥发分煤时混煤的燃烧特性结果如图6所示。由图6可知,无烟煤与贫煤掺混的混煤,随混合时间的增加(给粉管长差 $\Delta L$ 增加),混煤的燃尽率变化不大。这表明低挥发分煤掺混燃烧时,各单煤燃烧独立性较强,延迟混煤时间对混煤燃尽特性影响较小,其交互作用不明显。而对于高挥发分烟煤掺混褐煤,掺混25%褐煤的混煤燃尽率随混合时间的延迟而逐渐减小,而对于掺混50%褐煤和75%褐煤,混煤燃尽率随混合时间的增加而逐渐增大,其原因与2.2.1节类似。

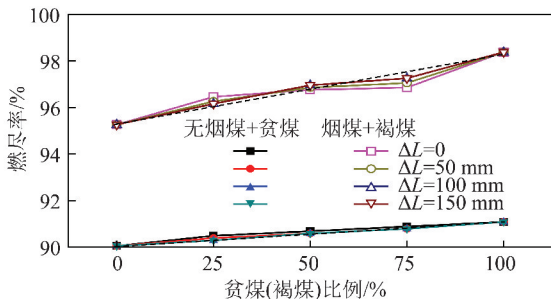


图6 炉内掺烧方式下高挥发分煤掺混高挥发分煤、低挥发分煤掺混低挥发分煤时混煤燃烧特性

Fig. 6 Burnout characteristic of high-volatile coal blending with high-volatile coal, low-volatile coal blending with low-volatile coal under in-furnace blending method

### 2.2.3 不同煤种炉内掺混时混煤 $\text{NO}_x$ 排放特性

“炉内”掺烧方式下不同煤种掺混燃烧的 $\text{NO}_x$ 排

放结果如图7所示。在给粉管差异 $\Delta L=0$ 时,两种煤粉同时送入炉内混合燃烧,随掺混比例的增加,混煤 $\text{NO}_x$ 的释放基本都是呈线性变化的。在各个掺混比例下,随给粉管差异 $\Delta L$ 逐渐增大(即:两种煤混合时间的延迟), $\text{NO}_x$ 排放量逐渐降低。这是由于炉内掺烧方式下,挥发分较低的煤会优先与氧气接触着火,挥发分热解生成的 $\text{HCN}$ , $\text{NH}_3$ 等中间产物,其中一部分中间产物被氧化生成 $\text{NO}_x$ ,一部分中间产物被还原生成 $\text{N}_2$ ,同时,挥发分较高的煤延迟送入反应器,快速着火燃烧生成大量的 $\text{HCN}$ , $\text{NH}_3$ 等中间产物,且造成该燃烧区域氧量较低,还原性比较强,挥发分较低的煤生成的 $\text{NO}_x$ 会与挥发分较高的煤生成的 $\text{HCN}$ , $\text{NH}_3$ 等中间产物发生反应生成 $\text{N}_2$ ,从而降低混煤的总体 $\text{NO}_x$ 排放。随给粉管差异 $\Delta L$ 的增加,挥发分较低的煤独立燃烧程度增加,消耗更多氧气形成贫氧气氛,越有利于挥发分较高的煤生成的 $\text{HCN}$ , $\text{NH}_3$ 等中间产物的生成,并还原挥发分较低的煤生成的 $\text{NO}_x$ ,进一步降低混煤的总体 $\text{NO}_x$ 排放。同时,挥发分较低的煤生成的 $\text{NO}_x$ 会与挥发分较高的煤燃烧生成的焦炭反应发生异相还原反应,被还原成 $\text{N}_2$ <sup>[19]</sup>。综上所述,炉内掺烧方式且延迟煤的混合有利于降低混煤燃烧中生成的 $\text{NO}_x$ 。

### 2.2.4 不同煤种炉内掺混时混煤 $\text{NO}_x$ 排放特性

“炉内”掺烧方式下不同煤种掺混燃烧的 $\text{NO}_x$ 排放结果如图7所示。在给粉管差异 $\Delta L=0$ 时,两种煤粉同时送入炉内混合燃烧,随掺混比例的增加,混煤 $\text{NO}_x$ 的释放基本都是呈线性变化的。在各个掺混比例下,随给粉管差异 $\Delta L$ 逐渐增大(即:两种煤混合时

间的延迟), NO<sub>x</sub> 排放量逐渐降低。这是由于, 炉内掺烧方式下, 挥发分较低的煤会优先与氧气接触着火, 挥发分热解生成的 HCN, NH<sub>3</sub> 等中间产物, 其中一部分中间产物被氧化生成 NO<sub>x</sub>, 一部分中间产物被还原生成 N<sub>2</sub>, 同时, 挥发分较高的煤延迟送入反应器, 快速着火燃烧生成大量的 HCN, NH<sub>3</sub> 等中间产物, 且造成该燃烧区域氧量较低, 还原性比较强, 挥发分较低的煤生成的 NO<sub>x</sub> 会与挥发分较高的煤生成的 HCN, NH<sub>3</sub> 等中间产物发生反应生成 N<sub>2</sub>, 从而降低混煤的

总体 NO<sub>x</sub> 排放。随给粉管差异  $\Delta L$  的增加, 挥发分较低的煤独立燃烧程度增加, 消耗更多氧气形成贫氧气氛, 越有利于挥发分较高的煤生成的 HCN, NH<sub>3</sub> 等中间产物的生成, 并还原挥发分较低的煤生成的 NO<sub>x</sub>, 进一步降低混煤的总体 NO<sub>x</sub> 排放。同时, 挥发分较低的煤生成的 NO<sub>x</sub> 会与挥发分较高的煤燃烧生成的焦炭反应发生异相还原反应, 被还原成 N<sub>2</sub><sup>[19]</sup>。综上所述, 炉内掺烧方式且延迟煤的混合有利于降低混煤燃烧中生成的 NO<sub>x</sub>。

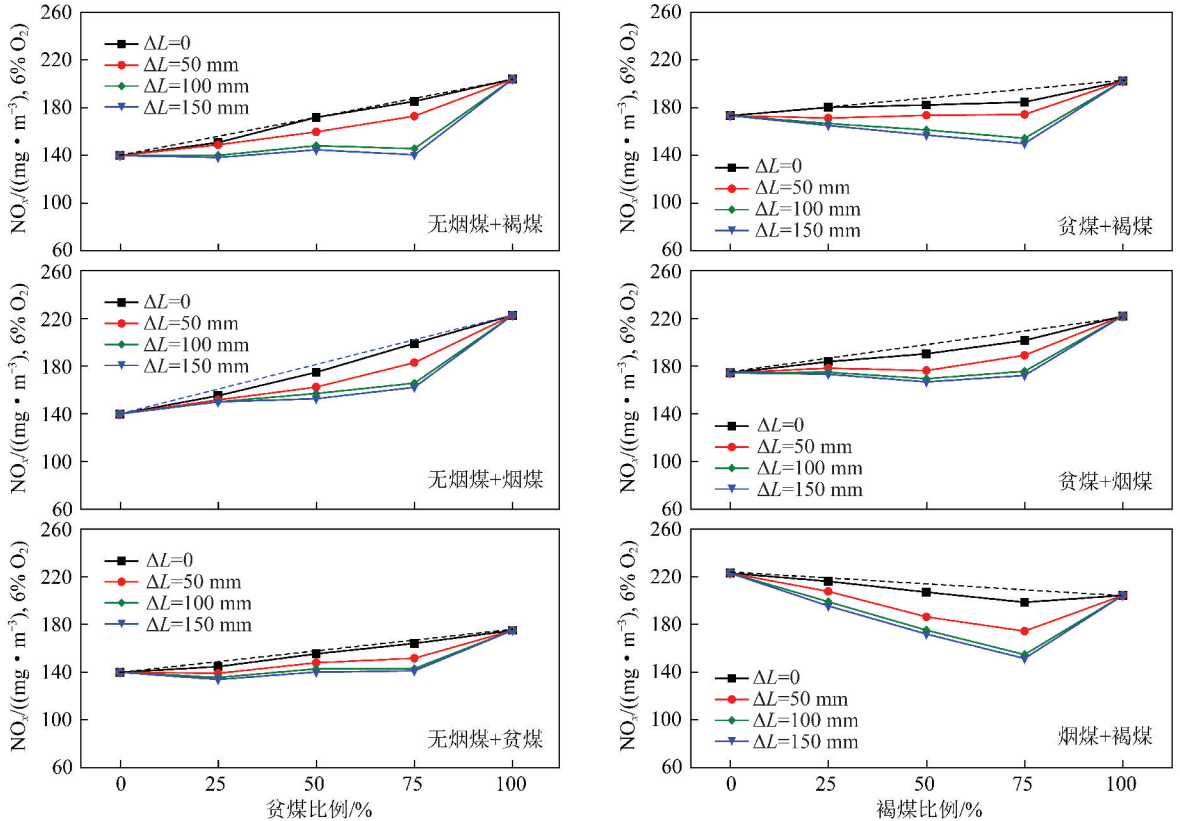


图7 炉内掺混下不同混煤的 NO<sub>x</sub> 排放特性

Fig. 7 NO<sub>x</sub> emissions characteristics of different blended coals under in-furnace blending method

### 3 结 论

(1) 不同煤种掺混燃烧中存在的促进和抑制两种交互作用具有差异性。

(2) “炉外”掺烧方式下, 挥发分含量差异较大的煤掺混时, 交互作用明显, 尤其是掺烧 75% 高挥发分煤时, 抑制作用表现最为显著, 混煤的燃尽明显变差, 且差异越大, 交互作用越明显; 挥发分含量差异较小的煤掺混时, 交互作用不明显, 混煤燃尽率在各掺混比例下接近计算线性燃尽率。混煤 NO<sub>x</sub> 排放量随掺烧比例增加呈线性变化规律。

(3) “炉内”掺烧方式下, 随两种煤延迟混合时间的增加, 交互作用逐渐减弱, 混煤燃尽率逐渐接近计算线性燃尽率, 各单煤的燃烧独立性增强; 挥发分含

量差异较大的煤掺混时, 改变混合时间, 混煤燃尽率变化显著, 挥发分含量差异较小的煤掺混时, 各单煤燃烧独立性较强, 改变混合时间, 混煤燃尽率变化不明显。混煤 NO<sub>x</sub> 排放量随延迟混合时间的增加而逐渐降低。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈刚, 方庆艳, 张成, 等. 电站锅炉配煤掺烧及经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.  
CHENG Gang, FANG Qingyan, ZHANG Cheng, et al. Coal blending and economic operation for power station boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [2] 邱建荣, 马毓义, 曾汉才, 等. 混煤特性的综合性实验研究[J]. 动力工程, 1993, 13(2): 32-36.  
QIU Jianrong, MA Yuyi, ZENG Hancan, et al. Coal blend fea-

- tures comprehensive experimental research [J]. Power Engineering 1993, 13(2):32-36.
- [3] 翁安心,周昊,张力,等.不同煤种混煤燃烧时  $\text{NO}_x$  生成和燃尽特性的实验[J].热能动力工程,2004,19(3):242-246.  
WENG Anxin,ZHOU Hao,ZHANG Li, et al. Experimental research of the  $\text{NO}_x$  generation and burnout characteristics during the combustion of blended coals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2004,19(3):242-246.
- [4] WILLIAMS A,POURKASHANIAN M,JONES J M, et al. Chapter 7: Two-component coal combustion[J]. Combustion and Gasification of Coal,2000:187-209.
- [5] IKEDA M,MAKINO H,MORINAGA H, et al. Emission characteristics of  $\text{NO}_x$  and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals [J]. Fuel, 2003, 82(15):1851-1857.
- [6] LIU G,LI Z,CHEN Z, et al. Effect of the anthracite ratio of blended coals on the combustion and  $\text{NO}_x$  emission characteristics of a retrofitted down-fired 660-MW utility boiler[J]. Applied Energy, 2012,95:196-201.
- [7] RILEY J T,GILLELAND S R,FORSYTHE R F, et al. Non-additive analytical values for coal[A]. 7th International Conference on Coal Testing[C]. Charleston,SC,1989.
- [8] WANG C,LIU Y,ZHANG X, et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China[J]. Energy & Fuels,2011,25(8):3634-3645.
- [9] CHI T,ZHANG H,YAN Y, et al. Investigations into the ignition behaviors of pulverized coals and coal blends in a drop tube furnace using flame monitoring techniques[J]. Fuel,2010,89(3):743-751.
- [10] BISWAS S,CHOUDHURY N,SARKAR P, et al. Studies on the combustion behaviour of blends of Indian coals by TGA and drop tube furnace [J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(3):191-199.
- [11] WANG C,LIU Y,ZHANG X, et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China[J]. Energy & Fuels,2011,25(8):3634-3645.
- [12] 马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:机理实验研究与数值模拟[J].煤炭学报,2015,40(11):2647-2653.  
MA Lun,WANG Tuwei,FANG Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Experimental study and numerical simulation of mechanism[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(11):2647-2653.
- [13] 马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:掺烧方式对混煤燃烧特性的影响[J].煤炭学报,2016,41(9):2340-2346.  
MA Lun,WANG Tuwei,FANG Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Influence of coal blending methods on combustion characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(9):2340-2346.
- [14] LEE B,KIM S,SONG J, et al. Influence of coal blending methods on unburned carbon and  $\text{NO}$  emissions in a drop-tube furnace[J]. Energy & Fuels,2011,25(11):5055-5062.
- [15] LEE B H,EDDINGS E G,JEON C H. Effect of coal blending methods with different excess oxygen on unburned carbon and  $\text{NO}_x$  emissions in an entrained flow reactor [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11):6803-6814.
- [16] BAEK S H,PARK H Y,KO S H. The effect of the coal blending method in a coal fired boiler on carbon in ash and  $\text{NO}_x$  emission [J]. Fuel,2014,128:62-70.
- [17] CHEN S L,HEAP M P,PERSHING D W, et al. Fate of coal nitrogen during combustion [J]. Fuel,1982,61(12):1218-1224.
- [18] FLETCHER T H,SOLUM M S,GRANT D M, et al. Chemical structure of char in the transition from devolatilization to combustion[J]. Energy & Fuels,1992,6(5):643-650.
- [19] GLARBORG P,JENSEN A D,JOHNSSON J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2003,29(2):89-113.