

# 再燃过程影响因素及燃尽特性研究

苏 胜, 向 军, 孙路石, 邱建荣

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

**摘 要:**以包含两种低挥发分贫煤在内的 5 种煤作为主燃料, 在一台 36 kW 一维炉上对气体燃料再燃过程及其燃料燃尽特性进行了详细实验研究。实验表明, 相同条件下, 挥发分含量越高的煤作为主燃料时气体燃料再燃过程的脱硝效率能够达到越大, 当低挥发分煤种作为主燃料时, 必须采用更大气体再燃燃料比例和更长再燃区停留时间才能获得高挥发分煤种作为主燃料时相同的再燃脱硝效率。实验结果表明, 即使采用低挥发分煤作为主燃料, 当气体再燃燃料比例达到 10%~15%, 再燃区停留时间达到 0.7~0.9 s, 再燃区过量空气系数在 0.8~0.9 时, 气体燃料再燃过程就能在保证煤粉颗粒燃尽率不显著降低, 同时气体再燃燃料充分燃尽的前提下, 获得 50% 以上的再燃脱硝效率。

**关 键 词:**一维炉; 煤粉颗粒; 气体燃料; 再燃; 氮氧化物; 飞灰含碳量

中图分类号: TQ038 文献标识码: A

## 引 言

燃料再燃是一种新型的控制煤燃烧过程低氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放的燃烧技术, 可降低  $\text{NO}_x$  的排放量达 50% 以上<sup>[1]</sup>, 并且由于其改造费用低, 不易造成炉膛结渣和高温腐蚀等其它低  $\text{NO}_x$  燃烧技术带来的不良现象, 被认为是诸多低  $\text{NO}_x$  燃烧技术中最具发展潜力的<sup>[2-4]</sup>。燃料再燃中再燃燃料可以是各类燃料, 从燃煤电厂运输和使用的方便性考虑, 煤粉是首选再燃燃料, 但存在着造成飞灰含碳量增加、锅炉燃烧效率下降等一些问題<sup>[5]</sup>。气态碳氢燃料(甲烷、天然气等)由于在燃烧时能产生大量的烃类而又不含有氮、硫、灰等物质, 是普遍认为的最理想的再燃燃料<sup>[5-7]</sup>。随着我国“西气东输”工程的深化, 在气源丰富的燃煤锅炉上采用气体燃料再燃降低  $\text{NO}_x$  排放具有重要的应用价值。

近年来, 国内外众多学者针对气体燃料再燃过程进行了广泛研究, 通过对再燃过程影响参数优化

来提高脱硝效率<sup>[8-13]</sup>。然而, 根据我国国情, 燃煤电厂普遍采用的是较低挥发分的劣质煤<sup>[13]</sup>, 其反应活性较差, 这些优化的影响参数在以低挥发分煤作为主燃料的气体燃料再燃过程中适用性有待进一步确认和研究; 另一方面, 低挥发分煤种的燃尽特性也较差, 对于气体燃料再燃过程, 如何兼顾再燃脱硝效率与低挥发分煤和气体燃料的燃尽是再燃技术能否成功应用的关键<sup>[14-15]</sup>。

本研究以 5 种不同性质的煤种作为主燃料, 在一维炉上对气体燃料再燃过程进行了详细实验, 系统研究了各种关键因素对气体燃料再燃过程脱硝效率的影响规律, 深入考察了低挥发分煤种作为主燃料时气体燃料再燃过程中煤粉和气体燃料的燃尽特性, 以期获得适用范围更加广泛的气体燃料再燃过程优化参数, 为实施和优化适合我国国情的气体燃料再燃技术提供指导和依据。

## 1 实验过程

### 1.1 实验系统和方法

实验系统如图 1 所示。一维炉总高度约为 3.5 m, 炉膛内径 0.175 m, 炉膛采用积木式结构, 分为结构相同六级, 在每级炉体上布置有间距基本均匀的 6 个取样孔, 实验中通过每个取样孔及炉膛尾部均可抽取烟气和飞灰进行分析。炉膛由敷在每一级保温层上的耐高温电阻丝加热维持, 加热元件总功率为 36 kW, 炉膛温度可达 1 500 K。一维炉采用电磁振动给粉器, 实验中通过标定和给粉稳定性要求, 给粉量定为 1.8 kg/h 保持不变。一维炉燃烧器为同心套管直流燃烧器, 内管为一次风口, 外管为二次风口。

气体燃料再燃实验过程中, 高压钢瓶中的气体再燃燃料经减压阀减压后, 通过耐高温钢管从炉体侧面取样孔喷入炉膛; 尾部燃尽风由小型鼓风机提供, 通

收稿日期: 2008-05-07; 修订日期: 2008-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5086025 50776037); 教育部科学研究重大基金资助项目(306012)

作者简介: 苏 胜(1977-)男, 湖北武汉人, 华中科技大学博士后。

过连接在鼓风机上的喷管也从取样孔喷入炉膛, 燃尽风量由流量计控制, 炉温为常温。实验中通过在不同位置的取样孔喷入再燃燃料和燃尽风来改变再燃区域停留时间, 在不同的工况下, 再燃燃料喷管进入炉膛的深度保持在炉膛的中心线位置, 再燃燃料流量通过流量计加以控制和测量, 温度保持为常温。

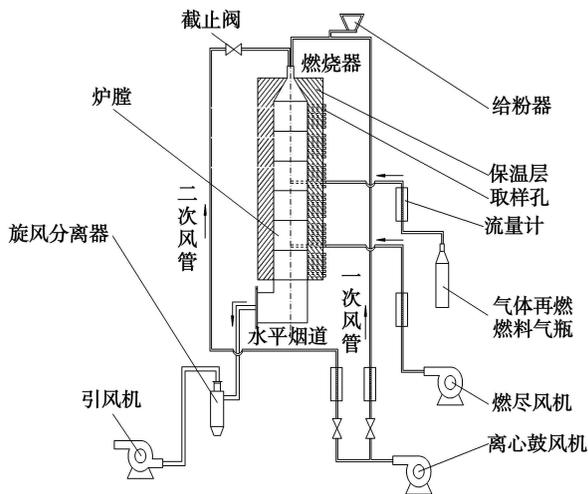


图 1 实验系统示意图

量计来调节和测量, 一次风量保持为  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  不变, 二次风量在  $4 \sim 7 \text{ m}^3/\text{h}$  之间进行调节, 以改变炉膛内的过量空气系数, 燃尽风量根据炉膛总风量和再燃燃料量进行调节, 以保持炉膛出口过量空气系数与无再燃的基本工况一致。炉膛及尾部烟气测量采用英国制造 KM940 型烟气分析仪, 其  $\text{NO}_x$  测量范围为  $0 \sim 5\,000 \text{ mL}/\text{m}^3$ , 精度为  $1 \text{ mL}/\text{m}^3$ 。

1.2 实验燃料

为了考察气体燃料再燃过程中主燃料煤种的影响, 同时也为了使实验结果具有更加广泛的意义, 实验选取了包含两种低挥发分贫煤在内的 5 种典型煤种作为主燃料煤种, 其煤质分析如表 1 所示。实验前, 5 种煤样经过了相同的干燥、制样和筛分过程, 实验中采用的煤粉粒径基本一致, 以减少对实验结果的影响。

实验中采用的气体再燃燃料为甲烷, 甲烷存储在高压气体钢瓶中, 纯度为 99.9%, 低位发热量约为  $35\,000 \text{ kJ}/\text{m}^3$ 。实验中, 为了考察气体再燃燃料对再燃脱硝效果的影响, 气体再燃燃料比例(气体再燃燃料发热量占入炉燃料总发热量的比值)分别以 5%、10%、15%和 20%进行了实验。

实验过程中, 一、二次风的风量可由风管上的流

表 1 煤质分析

煤种	工业分析/ % (wt)				元素分析/ % (wt)					$Q_{\text{net, ad}}$ / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$\text{FC}_{\text{ad}}$	$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$	$S_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	
褐煤 IK	8.30	22.12	39.80	29.78	49.90	3.40	13.82	1.10	1.38	18 188
烟煤 DT	2.66	10.52	27.47	59.35	75.48	4.34	4.69	1.52	0.79	26 831
烟煤 QS	2.03	31.36	17.49	49.12	56.52	2.82	5.09	0.70	1.48	22 298
贫煤 XT	0.50	23.91	12.79	62.80	68.11	2.48	2.92	0.33	1.75	17 008
贫煤 YL	1.48	26.30	12.56	59.66	61.89	1.79	6.50	1.06	0.98	24 715

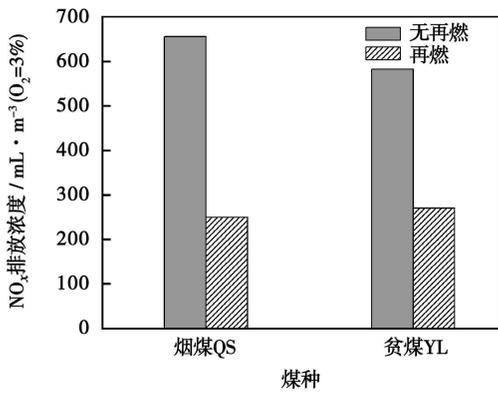
2 实验结果与分析

2.1 主燃料煤种的影响

图 2 和图 3 给出了相同实验条件下, 以不同煤种作为主燃料时基本工况和再燃工况下  $\text{NO}_x$  排放浓度。

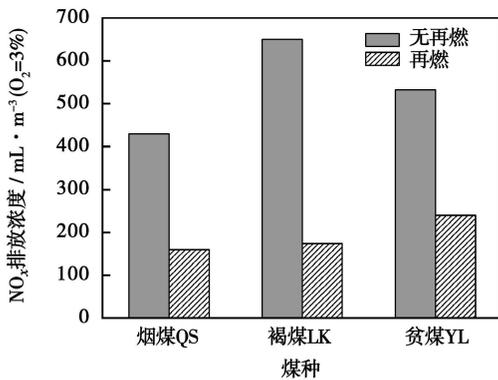
由图 2 和图 3 可以看出, 基本工况下,  $\text{NO}_x$  排放浓度与煤种挥发分含量和含氮量有关。再燃工况下, 当不同煤种作为主燃料时, 气体燃料再燃过程均能降低  $\text{NO}_x$  排放量, 但对不同主燃料煤种, 再燃工况下的脱硝效率有所不同。如图 2 所示, 相同再燃条件下, 烟煤 QS 作为主燃料时再燃脱硝效率(62%)

大于贫煤 YL 作为主燃料时的再燃脱硝效率(53%)。如图 3 所示, 褐煤 IK 作为主燃料时, 再燃脱硝效果最为明显, 其  $\text{NO}_x$  排放浓度从基本工况下的约  $650 \text{ mL}/\text{m}^3$  降低到再燃工况下的约  $174 \text{ mL}/\text{m}^3$ , 脱硝效率高达 73%; 贫煤 XT 作为主燃料时再燃脱硝效果最差, 其  $\text{NO}_x$  排放浓度从基本工况的  $532 \text{ mL}/\text{m}^3$  降低到再燃工况的约  $240 \text{ mL}/\text{m}^3$ , 脱硝效率仅为 55%; 烟煤 DT 作主燃料时,  $\text{NO}_x$  排放浓度从基本工况下的约  $430 \text{ mL}/\text{m}^3$  降低到再燃工况下的约  $160 \text{ mL}/\text{m}^3$ , 其再燃工况下  $\text{NO}_x$  排放浓度虽然比褐煤 IK 作主燃料时的  $\text{NO}_x$  排放浓度要低, 但其脱硝效率约为 63%, 介于褐煤 IK 和贫煤 XT 之间。



基本工况过量空气系数 1.15, 再燃工况再燃区停留时间 0.9 s, 再燃燃料比例 15%, 再燃区过量空气系数约 0.9。

图 2 不同主燃料下 NO<sub>x</sub> 排放浓度(QS 和 YL)



基本工况过量空气系数 1.2, 再燃工况再燃区停留时间 0.7 s, 再燃燃料比例 20%, 再燃区过量空气系数约 0.9。

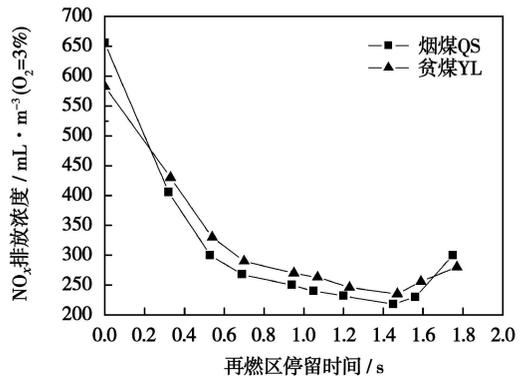
图 3 不同主燃料下 NO<sub>x</sub> 排放浓度(DT, LK 和 XT)

从实验结果可知, 在气体燃料再燃过程中, 相同再燃工况条件下, 挥发分含量越高的煤种作为主燃料时再燃脱硝效率能够达到越大; 或者说当主燃料煤种的挥发分含量越高时, 采用气体燃料再燃能够越容易对 NO<sub>x</sub> 的排放进行控制。产生这种现象的主要原因是由于煤中挥发分的含量有所不同引起的。煤中的氮主要由挥发分 N 和焦炭 N 两部分组成, 煤中挥发分含量越高, 在主燃烧区中 NO<sub>x</sub> 生成速率也就越大, 生成的 NO<sub>x</sub> 也就相对较多, 同时在最后的燃尽区中生成的 NO<sub>x</sub> 也就相对较少, 主燃烧区域中生成的大量 NO<sub>x</sub> 进入再燃区后能够促进再燃反应的进行, NO<sub>x</sub> 排放浓度迅速降低, 从而也会有较高的再燃脱硝效率。

### 2.2 再燃区停留时间的影响

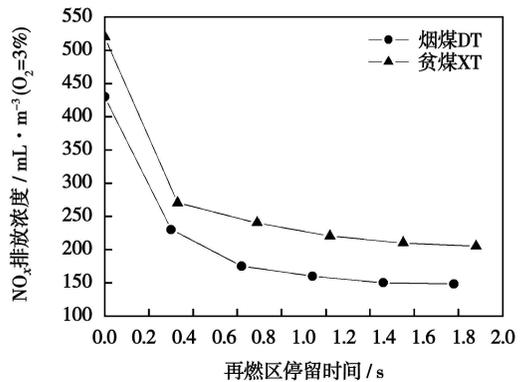
图 4 和图 5 给出了实验得到的 NO<sub>x</sub> 排放浓度与再燃区停留时间之间的关系, 其中再燃区停留时间  $t=0$  s 时表示无再燃的基本工况。实验中, 分别

通过固定燃尽风的喷入位置, 同时改变再燃燃料喷口的位置和固定再燃燃料的喷入位置, 如图 4 所示, 也改变燃尽风喷口的位置来改变再燃区的停留时间, 如图 5 所示。



再燃区过量空气系数约 0.9, 再燃燃料比例 15%。

图 4 不同再燃区停留时间下 NO<sub>x</sub> 排放浓度(改变再燃燃料料喷口)



再燃区过量空气系数 0.9, 再燃燃料比例 20%。

图 5 不同再燃区停留时间下 NO<sub>x</sub> 排放浓度(改变燃尽风喷口)

图 4 和图 5 显示, 对于不同的煤种, 提高再燃区停留时间均有利于降低 NO<sub>x</sub> 的排放浓度。实验结果表明, 对于低挥发分的煤种而言, 相同的再燃条件下, 要获得与高挥发分煤种相同的再燃脱硝效率, 需要更长的再燃区停留时间。由图 4 和图 5 还可以看出, 对于不同的主燃料煤种, 当再燃区停留时间超过 0.9 s 后, 虽然进一步增大再燃区停留时间都可使脱硝效率进一步提高(提高约 5%), 但作用并不明显。这说明虽然增大再燃区的停留时间可以提高再燃脱硝效率, 但当再燃区停留时间达到一定数值后, 其对脱硝效率的影响趋于缓和。图 4 还显示当再燃区停留时间达到约 1.5 s 后, 此时进一步增大再燃区停

留时间不仅没有使 NO<sub>x</sub> 排放浓度进一步降低, 反而使 NO<sub>x</sub> 排放浓度有所增大。这是因为实验中当燃尽风喷入位置一定, 增大再燃区停留时间必然会使再燃燃料喷口位置靠近主燃烧器出口, 减少煤粉在主燃烧区停留时间, 因此会使过多氧气进入再燃区, 减弱再燃燃料对 NO<sub>x</sub> 还原作用, 导致 NO<sub>x</sub> 的排放浓度又有所增大。

根据实验结果, 考虑到不同煤种作为主燃料时, 再燃区停留时间达到 0.7~0.9 s, 气体燃料再燃过程就能获得较高(50%以上)的再燃脱硝效率。

### 2.3 气体再燃燃料比例的影响

图 6 显示了在煤粉给粉量和风量(二次风量 6.5 m<sup>3</sup>/h, 一次风量 5 m<sup>3</sup>/h)一定的条件下, 不同气体再燃燃料比例下 NO<sub>x</sub> 排放浓度, 其中气体再燃燃料比例 β=0 表示无再燃的基本工况下 NO<sub>x</sub> 的排放浓度。

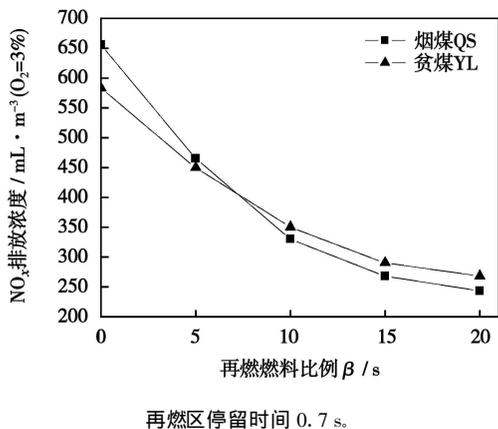


图 6 不同气体再燃燃料比例下 NO<sub>x</sub> 排放浓度

由图 6 可以看出, 增大气体再燃燃料比例, 即增大气体再燃燃料量可以有效的降低 NO<sub>x</sub> 的排放浓度, 对于不同的主燃料煤种, 气体再燃燃料比例达到 10%~15% 时, 就能获得 50% 以上的再燃脱硝效率; 但当气体再燃燃料比例由 15% 进一步增大至 20% 左右时, 再燃脱硝效率虽然仍可以继续增加, 但提高的并不明显, 仅为 4% 左右。实验结果表明, 气体燃料再燃过程中必须提供足够的再燃燃料才能获得较高再燃脱硝效率, 但是当气体再燃燃料量达到一定比例后, 继续增大气体再燃燃料比例对提高再燃脱硝效率的作用并不明显, 而且对气体燃料再燃过程而言也是不经济的。实验结果表明, 当不同的煤种作为主燃料时, 气体再燃燃料比例达到 10%~15%, 就能获得比较满意的再燃脱硝效率。

### 2.4 再燃区过量空气系数的影响

实验中, 通过改变炉膛顶部二次风量来改变再

燃区平均过量空气系数, 考察了再燃区过量空气系数对气体燃料再燃过程脱硝效果的影响。具体的实验工况为: 保持炉膛顶部一次风量不变(5 m<sup>3</sup>/h), 改变炉膛顶部二次风量(4~7 m<sup>3</sup>/h), 气体再燃燃料比例维持在 15% 不变, 再燃区停留时间约为 0.9 s。表 2 列出了实验中各工况条件下平均过量空气系数和 NO<sub>x</sub> 排放浓度值, 其中基本工况下 NO<sub>x</sub> 排放浓度值指相应一、二次风量下, 不投入气体再燃燃料和燃尽风时的 NO<sub>x</sub> 排放浓度值。

表 2 不同过量空气系数下 NO<sub>x</sub> 排放浓度

	二次风流量/ m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> (一次风流量/ 5 m <sup>3</sup> /h)				
	4	5	6	6.5	7
<b>烟煤 QS</b>					
主燃区平均过量空气系数 α <sub>p</sub>	0.89	1.00	1.09	1.14	1.18
再燃区平均过量空气系数 α <sub>R</sub>	0.75	0.83	0.91	0.96	1.00
基本工况 NO <sub>x</sub> 排放浓度/ mL <sup>o</sup> m <sup>-3</sup> (O <sub>2</sub> = 3%)	620	670	635	656	660
再燃工况 NO <sub>x</sub> 排放浓度/ mL <sup>o</sup> m <sup>-3</sup> (O <sub>2</sub> = 3%)	260	215	222	250	300
再燃脱硝效率/ %	58	68	65	62	55
<b>贫煤 YL</b>					
主燃区平均过量空气系数 α <sub>p</sub>	0.86	0.96	1.05	1.10	1.15
再燃区平均过量空气系数 α <sub>R</sub>	0.72	0.80	0.88	0.92	0.96
基本工况 NO <sub>x</sub> 排放浓度/ mL <sup>o</sup> m <sup>-3</sup> (O <sub>2</sub> = 3%)	530	560	610	583	595
再燃工况 NO <sub>x</sub> 排放浓度/ mL <sup>o</sup> m <sup>-3</sup> (O <sub>2</sub> = 3%)	290	268	256	270	298
再燃脱硝效率/ %	45	52	58	54	50

如表 2 所示, 对于不同的主燃料煤种, 实验条件下当再燃区平均过量空气系数 α<sub>R</sub> 小于 0.8 时, 主燃烧区平均过量空气系数 α<sub>p</sub> 也小于 1, 此时基本工况下炉膛内为贫氧燃烧状态, NO<sub>x</sub> 排放浓度在 α<sub>p</sub> 达到最小值时最低, 但此时喷入气体再燃燃料进行再燃实验, 并没能获得再燃工况下最低的 NO<sub>x</sub> 排放浓度值, 对于不同煤种而言, 再燃工况下 NO<sub>x</sub> 排放浓度最小值出现在 α<sub>p</sub> 为 1 左右, 同时 α<sub>R</sub> 为 0.8~0.9 左右的条件下, 此时再燃脱硝效率也达到最大值。这可能是由于当主燃烧区的空气量接近于理论空气量时, 生成的 NO<sub>x</sub> 浓度会达到最大值, 如表 2 所示, 而在主燃烧区生成的大量 NO<sub>x</sub> 进入再燃区可以促进再燃反应的进行, 因此会提高再燃脱硝效率。实验结果说明, 气体燃料再燃过程中增大 NO<sub>x</sub> 初始浓度可以提高再燃脱硝效率, 但在实际再燃过程中, 通常都不会采用增大 NO<sub>x</sub> 初始浓度的办法来提高脱

硝效率,但是,在实际再燃过程中,可以选择在 $NO_x$ 生成浓度较大的地方喷入气体再燃燃料,这对提高再燃脱硝效率是十分有利的。

表2中实验结果同时显示,实验条件下,存在着使再燃脱硝效率达到最大值的最佳再燃区平均过量空气系数。根据实验结果,对于不同挥发分含量煤种作为主燃料时,最佳再燃区平均过量空气系数约为0.8~0.9,这一结论与文献[3]中的研究结果是一致的。

### 2.5 燃料燃尽特性分析

气体燃料再燃过程中,由于再燃区为贫氧燃烧区域,煤粉颗粒不能充分燃烧,因此可能会对煤粉颗粒的燃尽产生一定的影响,当再燃过程主燃料为低挥发分煤种时,煤粉颗粒的燃尽可能更加恶化。实验中,当贫煤YL作为主燃料时,在一维炉膛的最后一级的最后一个取样孔(第6级第6个取样孔)抽取飞灰,通过对飞灰含碳量变化的研究,考察了气体燃料再燃过程对煤粉颗粒燃尽特性的影响。图7给出了再燃过程中飞灰含碳量的相对变化率随再燃区停留时间的变化曲线,其中飞灰含碳量相对变化率 $\lambda$ 定义为:

$$\lambda = \frac{\text{再燃工况飞灰含碳量} - \text{基本工况飞灰含碳量}}{\text{基本工况飞灰含碳量}} \times 100\%$$

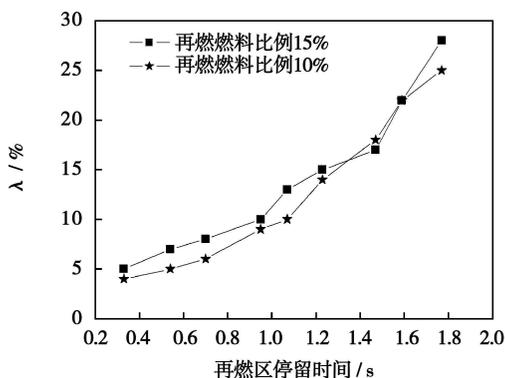


图7 飞灰含碳量相对变化率(改变再燃燃料喷口)

由图7可见,相对于基本工况下飞灰含碳量而言,随着再燃区停留时间增加,再燃工况下飞灰含碳量逐渐增大。实验中,燃尽风的喷入位置没有改变,增大再燃区的停留时间必然会使煤粉颗粒在主燃烧区的停留时间减少,这不利于煤粉颗粒在主燃烧区的充分燃烧;同时,由于再燃区停留时间增大,煤粉颗粒在贫氧的再燃区中不能够充分燃烧,燃尽程度会进一步恶化。图中还显示,再燃区停留时间相同时,随着气体再燃燃料比例增大,再燃过程飞灰含碳量有所增大。实验条件下,气体再燃燃料比例的改变

实际上反映了再燃区平均过量空气系数的变化,随着再燃燃料比例的增大,再燃区平均过量空气系数逐渐减小,这对煤粉颗粒在再燃区的燃尽是不利的。因此,随着气体再燃燃料比例的增大,飞灰含碳量有所增大。

图7的实验结果显示,当再燃区停留时间在1.8s左右时,飞灰含碳量的相对变化率达到了25%~30%,相对于基本工况下煤粉颗粒的燃尽率而言,再燃工况下的煤粉燃尽特性明显恶化。然而,当再燃区停留的时间在0.6~0.9s之间时,气体再燃条件下飞灰含碳量相对变化率小于10%,飞灰含碳量绝对变化量很小,再燃工况下煤粉燃尽率并没有明显降低,而由实验结果可知,此时再燃脱硝效率已达到50%以上,如图4所示。实验结果表明,气体燃料再燃过程采用合适的优化参数,能够在 $NO_x$ 排放浓度达到理想水平的前提下,使煤粉颗粒的燃尽程度不显著降低,从而不会影响到气体燃料再燃过程的经济性。

实验过程中,不同气体再燃燃料比例下,炉膛出口烟气中 $CH_4$ 等可燃性气体含量几乎为零,表明喷入的气体再燃燃料已反应完全;另外,由于燃尽风的喷入,炉膛出口烟气中氧浓度达到了约3%,存在剩余氧量,这也间接说明了气体再燃燃料已经充分燃尽,从而保证了再燃过程的经济性。

## 3 结论

以5种不同性质的煤作为主燃料,在一维炉上对气体燃料再燃过程进行了详细实验,系统研究了各种关键因素对再燃脱硝效率的影响,同时对再燃过程燃料的燃尽特性进行了考察,得出以下结论:

(1) 实验结果表明,相同条件下,挥发分含量越高的煤作为主燃料时气体燃料再燃过程的脱硝效率能够达到越大;当低挥发分煤种作为主燃料时,必须要采用更大气体再燃燃料比例和更长再燃区停留时间才能获得高挥发分煤种作为主燃料时相同的再燃脱硝效果;对于不同煤种作为主燃料时,存在着使 $NO_x$ 还原率达到最大值的最佳再燃区平均过量空气系数。

(2) 根据实验结果,气体再燃燃料比例达到10%~15%,再燃区停留时间达到0.7~0.9s,再燃区过量空气系数在0.8~0.9时,气体燃料再燃过程就能获得比较理想的50%以上再燃脱硝效率。

(3) 相对于基本工况下的飞灰含碳量而言,气

体燃料再燃过程中飞灰含碳量总体趋势上是增大的,煤粉颗粒的燃尽率是降低的,但实验结果同时表明,当气体燃料再燃过程采用合适的优化参数值时,能够在  $\text{NO}_x$  排放浓度达到理想水平的前提下,使煤粉颗粒的燃尽率不显著降低,同时能够保证气体再燃燃料的充分燃尽,从而不会影响到再燃过程的经济性。

#### 参考文献:

- [1] HILL S C, SMOOT L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26 (4/6): 417-458.
- [2] SMOOT L D, HILL S C, XU H.  $\text{NO}_x$  control through reburning[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(5): 385-408.
- [3] 张忠孝,姚向东,乌晓江,等. 气体再燃低  $\text{NO}_x$  排放试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9):99-102
- [4] 钟北京,傅维标. 气体燃料再燃对  $\text{NO}_x$  还原的影响[J]. 热能动力工程, 1999, 14 (6):419-423.
- [5] 方 斌,罗永浩,陆 方,等. 燃煤锅炉再燃技术中再燃燃料的特性与选择[J]. 热能动力工程, 2004, 19 (5): 443-446.
- [6] BILBAO R, MILLERA A, AIZUETA M U, et al. Evaluation of the use

of different hydrocarbon fuels for gas reburning[J]. Fuel, 1997, 76(14/15): 1401-1407.

- [7] 张 强,刘艳华,许晋源. 再燃烧技术中燃料的选取原则[J]. 工业炉, 2000, 21(3): 9-11.
- [8] PETER M, VLADIMIR M Z, LOC H, et al. Alternative fuel reburning[J]. Fuel, 1999, 78(3): 327-334.
- [9] HAMPARTSOUMIAN E, FOLAYAN O G, NIMMO W, et al. Optimisation of  $\text{NO}_x$  reduction in advanced coal reburning systems and the effect of coal type[J]. Fuel, 2003, 82(4): 373-384.
- [10] 白旭东,王 阳,赵炎钧,等. 超细化煤粉的投入量对再燃效果影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20 (6): 596-598.
- [11] 赵 莉,阎维平,戴文楠,等. 温度对超细煤焦再燃还原  $\text{NO}$  效率的影响[J]. 热能动力工程, 2007, 22 (6):647-650.
- [12] 仇中柱,潘卫国,任建兴,等. 天然气再燃降低  $\text{NO}_x$  排放的实验研究[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 126-129.
- [13] 贺学志,王春昌. 低  $\text{NO}_x$  燃烧器的煤质适应性研究[J]. 热力发电, 2003, 8: 12-15.
- [14] 杨卫娟,周俊虎,刘茂省,等. 煤粉再燃过程中飞灰含碳量的影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 116-120.
- [15] MCCAHEY S, MCMULLAN J T, WILLIAMS B C. Techno-economic analysis of  $\text{NO}_x$  reduction technologies in p. f. boilers[J]. Fuel, 1999, 78(14): 1771-1778.

(编辑 何静芳)

#### 新技术、新工艺

## 500 MW 输出功率、59.3%效率的联合循环动力单元

据《Gas Turbine World》2009 年年度手册报道,东京电力公司的电站已经成为展示三菱重工新设计的 500 MW 输出功率和 59.3%效率的 701G2 联合循环装置的展览场所。

3 套单轴联合循环动力单元已被安装,每个单元是围绕以天然气作为燃料的一台 334 MW 燃气轮机、一台无补燃的余热锅炉和一台额定输出功率为 172 MW 的汽轮机组成。

前两个 G2 动力单元已分别于 2007 年 6 月和 2008 年 6 月投入商业运行。第三台机组于 2008 年 6 月 22 日达到满负荷。

701G2 是用于 50 Hz 电力生产的三菱重工蒸汽冷却大功率燃气轮机系列的最新型号。它结合了用于燃烧火焰筒和第 1、2 列涡轮叶片环的已得到证实的蒸汽冷却技术。

701G2 的燃烧系统由 20 个管—环式燃烧室组成。每个燃烧室的过渡段被蒸汽通过双壁结构来冷却,以便达到更均匀的冷却效果。

单轴 701G2 压气机压比为 20:1,压气机转速为 3 000 r/min,空气质量流量为 737 kg/s。

燃气轮机转子是具有正扭矩特性的螺栓连接结构。转子由二元件可倾瓦轴承和一个上半部固定的轴承支承。推力轴承是一个具有前缘开槽润滑系统的双作用式轴承。

烟气垂直流动的 HRSG(余热锅炉)被设计成使装置的底座最小并便于安装。由 MHI(三菱重工)供应的 3 800 t 重 HRSG 是模块式设计和装配,以便减少现场的建造和焊接。

除了电力生产以外,新装置被设计成把来自 HRSG 的低温工艺过程用蒸汽供应到附近的几个工厂。

作为一个主要的设计特点,在热重新启动条件下运行,每个 500 MW 联合循环单元可以从燃气轮机点火起在 50 min 时间内达到满负荷。

这意味着,整个 1 500 MW 联合循环电站装机容量能够从热停机在不到 1 h 内响应东京电网迅速的负荷波动。

(吉桂明 摘译)

pressure and flash system being compared. The analytic results show that the improved dual-pressure circulation system has a maximum power output and the flash system, however, is simple in structure and flexible in operating modes. Both systems feature relatively wide applications. **Key words:** cement kiln, medium and low temperature waste heat utilization, genetic algorithm, dual-pressure cycle, flash cycle

**再燃过程影响因素及燃尽特性研究 = Study of the Influencing Factors and Burn-out Characteristics of a Re-burning Process**[刊, 汉] / SU Sheng, XIANG Jun, SUN Li-shi, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 507 ~ 512

With five kinds of coal, including two types of low volatile lean coal, serving as the main fuel, a detailed experimental study was conducted of the reburning process and fuel burn-out characteristics of gaseous fuels on a 36 kW one-dimensional boiler. The test results show that under same conditions, the higher the volatile content of the coal which serves as the main fuel, the greater the denitrification efficiency of the gaseous fuel in the reburning process. When a coal of low volatile content serves as the main fuel, a bigger proportion of gaseous reburning fuel and a long residence time in the reburning zone will be required to attain the same reburning denitrification efficiency as that of a coal with a high volatile content. The test results indicate that even if a low-volatile coal was used as a main fuel, when the gaseous reburning fuel proportion is 10% to 15%, the residence time in the reburning zone reaches 0.7 s to 0.9 s and the excess air factor in the reburning zone is between 0.8 and 0.9, the gaseous fuel reburning process can ensure that the burn-out rate of pulverized-coal particles will not drop significantly. In the meanwhile, under the precondition of the gaseous fuel being sufficiently burned up, a reburning denitrification efficiency of above 50% can be obtained. **Key words:** one-dimension boiler, coal particle, gas fuel, reburning, nitrogen oxide, carbon content of flying ash

**600 MW 超临界机组掺烧印尼褐煤、越南无烟煤试验研究 = Experimental Study of Mixed Combustion of Indonesia-originated Lignite and Vietnam-originated Anthracite in a 600 MW Supercritical Unit**[刊, 汉] / ZHAO Zhen-ning, ZHANG Qing-feng (North China Electric Power Science Research Institute Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045), TONG Yi-ying, FANG Zhan-ling (Datang International Power Generation Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 513 ~ 518

An experiment was performed of burning four kinds of bituminous coal, including Shenhua-and-Tashan-originated coal, and Indonesia-originated lignite, in a mixed combustion of Vietnam-originated anthracite on a 600 MW supercritical boiler with its design coal rank being high quality bituminous coal under an opposed-firing mode. Through combustion adjustment, it can guarantee a proportion of 40% Vietnam-originated coal to burn steadily, the coking characteristics of Shenhua and Indonesia-originated coal can be significantly improved. However, the flying ash combustible content increases and the flying ash particle diameter becomes bigger. The test results show that the burn-out of anthracite is more difficult to attain than its ignition and steady combustion. The effective means to solve this problem and give due consideration to the safety of equipment items can be given as follows: the fineness of pulverized coal should be close to the requirement for anthracite combustion to the maximum possible degree while the primary air temperature and its feed rate should be controlled as required for easily-ignited coal ranks. In addition, the concentration of pulverized coal, swirling intensity, centralized oxygen supply, activity of the easily-ignited coal rank and boiler load etc. all exercise a relatively big influence on the combustion of the coal mixture. **Key words:** 600 MW supercritical unit, Indonesia-originated lignite, Vietnam-originated anthracite, mixed combustion

**人字齿轮承载接触分析的模型和方法 = A Model and Method for Load-bearing Contact Analysis of Herringbone Gears**[刊, 汉] / WANG Cheng, FANG Zong-de, ZHANG Shun-li (College of Electromechanical Engineering, North