文章编号:1001-2060(2012)06-0702-07

流化床 O_2 /CO₂ 燃烧(IV) −氧浓度对 NO_x 和 N₂O 的影响

赵 科,谭 力,段翠九,吕清刚 (中国科学院工程热物理研究所,北京100190)

摘 要:循环流化床能实现高氧气浓度下的 O_2/CO_2 燃烧,进 而减少燃烧室尺寸并降低再循环烟气量。本研究使用两种 烟煤、一种褐煤,分别在 15 kW 循环流化床试验系统和 0.15 MW 循环流化床试验系统上进行试验,研究了氧气浓度对 NO_x 和 N_2O 的影响。结果表明,3 个煤种均在一次风氧气浓 度44.3%~55.3%、二次风氧气浓度 43.2%~60.2% 下实 现稳定燃烧。氧气浓度约 50% 燃烧时,煤中氮向 NO_x 的转 化率降低到空气气氛燃烧的 19%~60%,煤中氮向 N_2O 的 转化率降低到空气气氛燃烧的 20%~81%。

关 键 词: 流化床; O₂ / CO₂; 燃烧; N₂O; NO_x

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

循环流化床 O₂/CO₂燃烧技术在减缓 CO₂排放 方面具有一系列优势:(1) 能获得高浓度的 CO₂ ,烟 气中 CO₂浓度大于 90% ,以实现捕集和储存 CO₂。 (2) 保留了循环流化床燃料适应广、脱硫成本低等 优点。(3) 可以实现高氧气浓度下的稳定燃 烧^[1~4] 进而减少燃烧室尺寸,并降低再循环烟气风 机的能耗。

Hu 和 Feyza Kazanc 等人进行了 20% ~100% 氧 气范围内的燃烧试验,主要研究煤在滴管炉中 NO_x 等烟气成份的排放规律及影响因素,燃烧情况与实 际的循环流化床燃烧过程差异较大^[5~6]。有部分研 究者在循环流化床系统中进行了高氧气浓度下的相 关研究,University of Utah 在 0.33 MW 循环流化床 系统上进行氧气浓度 21% ~35% 的燃烧优化试 验^[7], Canmet Energy 与 FW 联合在 0.8MW 系统上 进行氧气浓度 29% 的燃烧试验^[8],东南大学在 50 kW 系统上进行了烟煤和无烟煤在 21% ~40% 氧气 浓度下的燃烧试验^[9],中国科学院在 30 kW 循环流 化床试验系统上实现了氧气浓度 $33\% \sim 35\%$ 时的 稳定燃烧^[1],并在 0.15 MW 循环流化床试验系统 (以下简称 0.15 MW 系统)上实现了氧气浓度约 50% 的稳定燃烧^[2]。可以看出,循环流化床上进行 的燃烧试验中,氧气浓度普遍不超过 40%,缺少高 氧气浓度,尤其高达 50% 氧气浓度下 NO_x 和 N₂0 排放的相关研究。基于此,本研究在 15 kW 循环流 化床空气燃烧试验系统(以下简称 15 kW 系统) 和 0.15 MW 系统上进行试验,研究不同氧浓度下 NO_x 和 N₂0 的生成规律。

1 试验研究

1.1 15 kW 系统(空气气氛燃烧试验系统)

15 kW 系统为绝热结构,燃烧室高度3000 mm,二次风口距布风板高度1500 mm,二次风口以下燃烧室的直径70 mm,二次风口以上燃烧室的直径100 mm。用 KM9106 烟气分析仪分析烟气中氧气浓度,烟气中其余组分用 GASMET DX4000 分析。详细介绍参见文献[3]。

1.2 0.15 MW 系统(高氧气浓度气氛燃烧试验系统)

0.15 MW 系统的燃烧室高度 6 000 mm 燃烧室 高度 0 ~ 2 000 mm 的直径 100 mm 2 000 ~ 6 000 mm 的直径 140 mm。燃烧室由浇注料制成 浇注料内布 置水冷管。烟气中氧气用氧化锆分析仪在线分析, 其余组分用 GASMET DX4000 分析。详细介绍参见 文献 [2]。

1.3 试验样品

本研究使用大同煤、石沟驿煤和神木煤,工业分析及元素分析结果如表1所示,大同煤和神木煤为高钙煤,其灰成份如表2所示。15kW系统的试验

收稿日期: 2012-01-23; 修订日期: 2012-03-09

作者简介:赵 科(1979-),男,陕西宝鸡人,中国科学院工程热物理研究所助理研究员.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906084); 中国科学院知识创新工程重要方向基金资助项目(KGCX2 - YX - 399 + 3); 中国博士后科 学基金资助项目(20090450578)

中,试验床料为0.1~0.5 mm的河砂,质量3 kg,燃 料粒径为0~1 mm。0.15 MW系统试验中,试验床 料为0.1~2 mm的河砂,质量3 kg,大同煤的粒径为 0.3~4 mm,石沟驿煤和神木煤的粒径为0~4 mm, 各煤样的粒径分布如图1所示。

表 1 工业分析及元素分析 Tab. 1 Industrial and elementary analysis

	大同煤	石沟驿煤	神木煤
元素分析/%			
C_{ar}	58.08	49.90	64.91
H _{ar}	3.73	3.25	4.19
O_{ar}	8.58	10.73	11.65
S_{ar}	0.32	1.74	0.68
N_{ar}	1.04	0.68	0.99
工业分析/%			
M _{ar}	2.2	6.2	6.4
A_{ar}	26.05	27.50	11.19
${ m V}_{ m daf}$	38.15	40.48	37.69
$\mathrm{FC}_{\mathrm{ar}}$	44.38	39.46	51.35
$Q_{\rm net,ar}/{ m MJ}$ • kg ⁻¹	22.61	19.28	25.03

表2 灰成份(%)

Tab. 2 Ash composition(%)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO_3	$P_{2}O_{5}$	K ₂ 0	Na ₂ O
神木煤	49.26	16.79	8.5	12.25	1.22	0.83	5.42	0.04	2.53	0.92
大同煤	45.23	37.83	4.02	5.42	0.66	1.62	2.50	0.18	0.32	0.14

1.4 试验工况

试验中共安排23个工况。工况中的DT、SGY、 SM代表工况中使用煤为大同煤、石沟驿煤、神木 煤。其中,空气气氛的燃烧试验在15kW系统上完 成,共3个工况,分别记为DT、SGY和SM,试验中一 次风、二次风、返料风、播煤风均为空气。各工况的 试验条件如表所示3。高氧气浓度的燃烧试验在 0.15 MW系统上进行,试验条件如表4所示。高氧 气浓度的试验共安排20个工况,工况号DT1、SYG1、 SM1 分别表示大同煤、石沟驿煤、神木煤的第一个 工况,各煤种的工况序号相同时,其试验条件相同。 本研究中的一次风氧气浓度、二次风氧气浓度是根 据表4中空气流量和氧气流量所得的计算值。试 验中,研究了一次风氧气浓度、二次风流量比例和二 次风口位置的影响,各煤种的研究内容及工况顺序 相同,以大同煤的工况 DT1 ~ DT7 为例: DT1 ~ DT3 研究一次风氧气浓度对燃烧的影响,DT4 ~ DT6 研 究二次风流量比例对燃烧的影响,DT7 和 DT2 的风 量配比相同,研究二次风口位置的影响。



图 1 尿的粒径分型 Fig. 1 Coal particle diameter distribution

2 试验结果与分析

2.1 空气气氛的燃烧试验

3 种煤在 15kW 系统试验(空气气氛下燃烧)的 温度分布如图 2 所示。各工况下,沿燃烧室不同高 度的温度接近,同一煤种在不同高度的温差不超过 37℃,石沟驿煤在整个燃烧内的温差仅 17℃。飞灰 含碳量和燃烧效率如表 5 所示,大同煤和石沟驿煤 的飞灰含碳量分别为 9.5%和 9.6% 表明试验过程 中燃烧充分。烟气成份如表 6 所示,试验中烟气中 氧气 5.83% ~6.09%,与实际锅炉燃烧气氛接近, 烟气中 CO 为 31~168 mg/MJ 表明燃烧充分。

表 3 空气气氛燃烧的试验条件(m³/h)

Tab. 3 Test conditions of combustion in an air atmosphere(m^2/h)						
工况	煤	一次风量	二次风量	返料风	播煤风	总风量
DT	大同煤	7.8	4.2	1.5	1.5	15
SGY	石沟驿煤	7.8	4.2	1.5	1.5	15
SM	神木煤	7.8	4.2	1.5	1.5	15

高氧气浓度燃烧的试验条件(m³/h)

	Tab. 4 Test conditions of combustion at a high oxygen concentration(m ⁻ /h)								
工况	一次风空气	一次风氧气	二次风空气	二次风氧气	返料风空气	总风量			
DT1 \SGY1 \SM1	22.88	13.80	8.71	15.00	3.25	63.64			
DT2、SGY2、SM2	19.05	17.22	12.78	11.58	3.25	63.88			
DT3 \SGY3 \SM3	16.12	19.92	15.63	8.70	3.25	63.62			
DT4、SGY4、SM4	31.67	28.80	0	0	3.25	63.72			
DT5 \SGY5 \SM5	22.23	19.98	9.53	8.70	3.25	63.69			
DT6、SGY6、SM6	15.88	14.46	15.96	14.34	3.25	63.89			
DT7 SM7	19.05	17.22	12.78	11.58	3.25	63.88			

注:0.15 MW 系统的试验中,返料风仅使用空气,未使用氧气。

表4





表5 飞灰含碳量及燃烧效率

Tab. 5 Carbon content of the flying ash and the

combustion efficiency

工况	飞灰含碳量/%	燃烧效率/%
DT	9.5	95.8
SGY	9.6	95.7

表6	烟气成份

T	'ab. 6)	Composition	of	the	flue	gas
---	--------	---	-------------	----	-----	------	-----

т'u	02	N_2O	СО	NO	SO_2
上ル	1%	/mg • MJ $^{-1}$			
DT	5.83	97	118	82	167
SGY	6.03	68	31	94	1 390
SM	5.65	100	168	162	475

2.2 高氧气浓度的燃烧试验

2.2.1 燃烧温度

本课题组在 0.15 MW 系统上进行的石沟驿煤 燃烧优化的试验结果表明:石沟驿煤在高氧气浓度

下可以保证燃烧稳定,燃烧室内250、800、1600、 2 500、4 000、5 700 mm 均稳定无波动 ,各时刻的温 度都在平均温度的 ±20℃ 范围内波动 烟气中 N_2O_{3} NO_x、SO₂等均保持稳定^[4]。基于此,在 0.15MW 系 统上进行大同煤和神木煤在高氧气浓度下的试验。 三个煤种的温度分布见图 3(本文中,石沟驿煤的 6 个工况即文献 [4]的6个工况,工况的 SGY1 - SGY6 对应文献[4]中的工况1~工况6)。所有工况均稳 定运行1小时 燃烧大同煤与神木煤时 与燃烧石沟 驿煤相同,燃烧室内250、800、1600、2500、4000、 5 700 mm高度处均稳定无波动,大同煤及神木煤的 温度及烟气稳定性与文献 [4] 基本相同,工况内均 未发生结焦现象。试验中控制燃烧室平均温度在 820~900 ℃,图3中可以看出,部分工况中有少数 测点超出控制范围 其中 SGY3、SGY4、SGY5、SGY6、 SM4、SM5 工况中有部分点的温度超过 900℃,DT4 工况中 250 mm 处的温度为 791℃,低于控制范围。 其它工况的所有点的温度均在控制范围内。3 个煤 种共进行 20 个工况,燃烧室内温度均匀,同一个工 况下 250、800、1 600、2 500、4 000、5 700 mm 的温度 差别不超过80℃。综上3个煤种在高氧气浓度下 的燃烧稳定 燃烧温度接近实际循环流化床。与空 气气氛的燃烧试验相比 燃烧室内温度水平接近 如 图2所示。

2.2.2 飞灰含碳量和燃烧效率

不同工况下的飞灰含碳量如图 4 所示,燃烧效 率如图 5 所示。石沟驿煤的飞灰含碳量最低,为 10.1%~18.53%,神木煤的飞灰含碳量次之,为 16.55%~24.65%,大同煤的飞灰含碳量最高,为 20.0%~29.9%。燃烧效率而言,神木煤燃烧效率 最高,为93.8%~96.24%,石沟驿煤为90.07%~ 95.1%,大同煤为83.37%~90.42%。





空气气氛燃烧试验和高氧气浓度燃烧试验的停 留时间接近,均为1.6 s。温度水平接近,均为820 ~900℃。燃烧时烟气中 O₂浓度接近,均为6%左 右。空气燃烧试验中,大同煤和石沟驿煤的飞灰含 碳量分别为9.5%和9.6%,均低于高氧气浓度燃 烧,如表5所示。可能性如下:第一,高氧气浓度燃 烧时,烟气中 CO₂浓度较空气燃烧中高,煤在稀相区 燃尽时,高浓度的 CO₂对燃烧有一定抑制作用,导致 飞灰含碳量高。Saravanan 在热重分析仪上研究了 焦炭在 0~80% CO₂浓度下的燃烧特性^[10],结果表 明,对同一种焦炭(文献 [10]中 char A),CO₂浓度 20% 时燃尽温度仅 644℃,CO₂浓度 80% 的燃尽温度 737℃,表明 CO₂浓度高时燃尽难。第二,飞灰含碳 量受到入炉粒径、热破碎性、旋风分离器分离效率的 综合影响。因此,研究认为,空气气氛燃烧试验和高 氧气浓度燃烧试验在两套试验系统上进行,入炉粒 径、热破碎性、旋风分离器分离效率等均不相同,而 且每个参数对飞灰含碳量影响都较大,高氧气浓度 燃烧试验中飞灰含碳量高是上述两种原因共同作用 的结果。





Fig. 4 Carbon content of the flying ash





2.2.3 烟气中 CO、CO₂及 O₂

烟气中 CO、CO₂及 O₂如表 7 所示。高氧气浓度 燃烧时 除工况 SGY1 和 SM3 外,其它工况的 CO 低 于 400 mg/MJ,燃烧充分。烟气中 O₂为 2.8% ~ 7.3% ,与空气气氛燃烧试验中接近。由于平均氧气 浓度提高,烟气中 CO₂浓度大幅度提高,达到37.7% ~48.8%。

表7 烟气中 $CO_{3}CO_{2}$ 及 O_{2} Tab. 7 CO CO_{2} and O_{2} content of the flue gas

	CO ₂ /%	CO/mg • MJ $^{-1}$	$\mathrm{O}_2/\%$
DT1	47.9	146	5.8
DT2	46.8	64	5.9
DT3	44.5	70	6.9
DT4	48.8	40	6.3
DT5	46.9	45	6.3
DT6	44.9	53	7.3
DT7	46.1	71	6.7
SGY1	44.4	1482	3.6
SGY2	42.9	62	4.2
SGY3	40.7	43	4.9
SGY4	42.8	32	3.9
SGY5	40.2	22	6.1
SGY6	37.7	28	6.8
SM1	48.0	44	2.8
SM2	46.4	40	4.5
SM3	42.5	504	7.1
SM4	45.0	321	4.1
SM5	41.4	84	7.1
SM6	41.7	153	6.0
SM7	41.4	359	6.3

2.3 氧浓度对 NO_x 的影响

为方便讨论,定义煤中氮向 NO_x 的转化率 $(CR_{N \to NO_x})$,如式(1)所示。即:

$$CR_{N \to NO_x} = \frac{烟气中 NO_x 的氮的质量}{煤中氮的质量} \times 100\%$$

(1)

各工况下的煤中氮向 NO_x 的转化率如图 6 所 示。可见,高氧气浓度燃烧时,配风仍可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 。通过配风,大同煤可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 的 11% 石沟驿煤可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 的 50% 神木煤可 以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 的 60%,优化配风是高氧气浓度燃 烧时降低 NO_x 的有效方法。

由图 6 中还能看出,相比配风,氧气浓度对 $CR_{N \to NO_x}$ 影响更大。相比空气气氛燃烧,所用的 3 个 煤种在高氧气浓度燃烧时 $CR_{N \to NO_x}$ 均大幅度降低。 大同煤在空气气氛燃烧时, $CR_{N \to NO_x}$ 为 8.4%,高氧 气浓度下 $CR_{N\to NO_x}$ 降低到 3.2%~3.6%。石沟驿煤 在空气气氛燃烧时, $CR_{N\to NO_x}$ 为 12.4%,高氧气浓度 下 $CR_{N\to NO_x}$ 降低到 3.8%~7.5%。神木煤空气气氛 下燃烧时 $CR_{N\to NO_x}$ 为 16.5%,高氧气浓度下 $CR_{N\to NO_x}$ 为 3.1%~7.8%。综上,高氧气浓度燃烧 (约 50%)时, $CR_{N\to NO_x}$ 为空气气氛燃烧的 19% ~60%。

二次风流量比例和燃烧室温度是影响 NO_x 最 重要的两个因素 ,0. 15 MW 系统试验中的工况 DT5、SGY5、SM5 与 15 kW 系统中的二次风流量比 例接近。但是 ,DT 和 DT5、SM 和 SM5、SGY 和 SGY5 相比 ,煤种相同、二次风流量比例接近、燃烧室温度 接近 ,但 $CR_{N\to NO_x}$ 相差很大 ,进一步证明氧浓度对 $CR_{N\to NO_x}$ 影响较大。

煤在高氧气浓度燃烧时 燃烧后生成高浓度的 CO₂,CO₂与 H 反应生成 CO,如式 2 所示。Peter glarborg 研究了 CH₄在 O₂/N₂和 O₂/CO₂下的燃烧试 验[11],试验条件如表8所示。各种气氛下保持过量 空气系数约为 2, O_2/N_2 气氛时, 无 CO 生成; 但气氛 中有 76% 的 CO2时,即使反应温度 1 000 ~1 500℃, 烟气中 CO 仍保持 1 250 mg/m³,证明发生式(2) 的 反应。Hirotatsu Watanabe 测量了 $CH_4 \subset O_2/N_2$ 和 O₂/CO₂下的 OH 生成量^[12],测量结果表明 O₂/CO₂ 下的 OH 生成量更多 进一步证明式(2) 在高 CO2浓 度下更多。CO,和 H 反应生成 CO 和 OH 通过 2 个 途径减少了 NO_x 的生成。第一 在富燃料区 OH 的 存在加强了 NH₃和 HCN 转化为 NO ,但生成的 NO 在富燃料区快速被还原为 N₂,因此进入氧化区的 NO_x 前驱物减少,从而降低了 NO_x 生成量。在 0.15 MW系统中 密相区为富燃料区 满足上述反应 发生。第二,通过式(2)产生大量 CO,CO 是还原性 物质 还原生成的 NO 即:

$$CO_2 + H = CO + OH$$
 (2)

表 8 CH₄在 O₂ / N₂和 O₂ / CO₂下的燃烧^[11]

Tab. 8 Combustion of CH_4 in an $\mathrm{O}_2/\mathrm{N}_2$ and $\mathrm{O}_2/\mathrm{CO}_2$ atmosphere

	$CH_4/mg \cdot m^{-3}$	$O_2/mg \cdot m^{-3}$	CO_2 / %	N_2 /%
O_2/N_2	994	4 010	0	99.5
O_2/CO_2	1 000	3 940	76.0	23.5

实际的循环流化床 O_2/CO_2 燃烧中 .再循环烟气 与纯氧混合进入燃烧室燃烧 ,预期 $CR_{N\to NO_x}$ 更低。 第一 , CO_2 浓度进一步提高 ,燃烧室出口的 CO_2 浓度 超过 90% ,通过式(2) ,生成的 CO 和 OH 更多 ,减少 NO_x 的生成。第二,密相区为还原性气氛,再循环烟气中的 NO_x 和 N₂O 进入密相区后,被 CO、碳氢化合物(未燃烧的挥发份)和焦炭还原。



图6 煤中氮向 NO_x 的转化率

Fig. 6 Nitrogen conversion rate of coal into NO_{χ}

2.4 氧浓度对 N₂O 的影响

定义煤中氮向 N₂O 的转化率($CR_{N\to N_2O}$),如式 (3)所示。各工况下的煤中氮向 N₂O 的转化率如图 7 所示。配风对大同煤和石沟驿煤的 $CR_{N\to N_2O}$ 影响 较大,但对神木煤影响较小。不同配风下,石沟驿的 $CR_{N\to N_2O}$ 为 3.8% ~5.6%,大同煤 $CR_{N\to N_2O}$ 为 7.7% ~10.8%。神木煤高氧气浓度燃烧试验的 7 个工况 中(SM1 – SM7),工况 SM4 的 $CR_{N\to N_2O}$ 最低,为 2.8%,其它 6 个工况接近,为 3.5% ~3.7%。由图 3 可以看出,工况 SM4 的燃烧室 800 和 2 500 mm 处 温度在各个工况中均最高 800 mm 处 936°C,其它 工况 855 ~910°C 2 500 mm 处 926°C,其它工况 860 ~ 890°C, N₂ O 在高温下分解,故工况 SM4 的 $CR_{N\to N_2O}$ 较其它工况低,即:

 $CR_{N \to N_2 0} = \frac{烟气中 N_2 0 的氮的质量}{煤中氮的质量} \times 100\%$ (3)

氧气浓度对 $CR_{N\to N_20}$ 影响较大。空气气氛燃烧 时,神木煤 $CR_{N\to N_20}$ 为 13.8%,大同煤 $CR_{N\to N_20}$ 为 13.4%,石沟驿煤 $CR_{N\to N_20}$ 为 12.3%。氧气浓度提 高到约50%时,神木煤、大同煤、石沟驿煤的 $CR_{N\to N_20}$ 分别降低到空气气氛燃烧的20%~27%、 57%~81%、31%~45%。即,高氧气浓度燃烧时, $CR_{N\to N_20}$ 降低为空气气氛燃烧的20%~81%。本研 究认为有两个原因:第一,CO₂与 H 反应生成CO和 OH 在富燃料区 OH 的存在加强了 NH₃和 HCN 转 化为 NO,进而减少了 NH₃和 HCN 的量。NH₃和 HCN 也是 N₂O 的前驱物,进而 N₂O 的生成量减少。 第二,虽然燃烧室内测点所测量的温度与空气燃烧 接近 但煤颗粒的表面温度可能高于空气气氛燃烧, N_2O 在高温下极易分解 , $故减少了 N_2O$ 。





3 结 论

在 15 kW 系统和 0.15 MW 系统上进行 3 个煤 种在空气气氛和高氧气浓度下燃烧试验,得到以下 结论:

(1)3个煤种均在平均氧气浓度约50%、一次 风氧气浓度44.3%~55.3%、二次风氧气浓度 43.2%~60.2%实现稳定燃烧,燃烧室内不同高度 的温度、压力、烟气中各组分均稳定无波动,工况内 未发生结焦现象,各工况下均燃烧稳定。

(2) 配风可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 。通过配风,石沟 驿煤可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 的 50%,神木煤可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 的 60%,大同煤可以降低 $CR_{N\to NO_x}$ 的 11%。 高氧气浓度燃烧(约 50%)时, $CR_{N\to NO_x}$ 为空气气氛 燃烧的 19%~60%。

(3) 空气气氛燃烧时 神木煤 $CR_{N \to N_20}$ 为13.8%, 大同煤 $CR_{N \to N_20}$ 为13.4%,石沟驿煤 $CR_{N \to N_20}$ 为 12.3%。高氧气浓度下燃烧时,石沟驿 $CR_{N \to N_20}$ 为 3.8%~5.6% 神木煤 $CR_{N \to N_20}$ 为2.7%~3.7%,大 同煤 $CR_{N \to N_20}$ 为7.7%-10.8%。高氧气浓度燃烧 时, $CR_{N \to N_20}$ 降低到空气气氛燃烧的20%~81%。

参考文献:

[1] 赵 科,吕清刚,段翠九. 流化床 O₂/CO₂ 燃烧(I) - 高氧浓 度下的燃烧试验 [J]. 热能动力工程 2011 26(4):453-456. ZHAO Ke, LU Qing-gang, DUAN Cui-jiu, et al. O₂/CO₂ combustion on a fluidized bed(I)-Combustion experiment at a high oxygen concentration [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2011 26(4):453-456.

- [2] 赵 科 段翠九 谭 力 筹. 流化床 O₂/CO₂ 燃烧(II)-高氧浓度的中试研究[J]. 热能动力工程 2012 27(3):350-354.
 ZHAO Ke ,DUAN Cui-Jiu ,TAN Li ,et al. O₂/CO₂ combustion in a fluidized bed (II) Pilot study at a high oxygen concentration [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2012, 27(3):350-354.
- [3] 赵 科 谭 力 段翠九 筹. 流化床 O₂/CO₂ 燃烧(Ⅲ)-氧浓度 对粒径的影响[J]. 热能动力工程 2012 27(4):449-454..
 ZHAO Ke ,DUAN Cui-Jiu ,TAN Li ,et al. O₂/CO₂ combustion in a fluidized bed (Ⅲ) -Influence of the oxygen concentration on the particle diameter [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2012 27(4):449-454.
- [4] 赵 科,谭 力,段翠九,等. 流化床 O₂/CO₂ 燃烧(V)-高氧浓度的燃烧优化[J]. 热能动力工程.(已录用)
 ZHAO Ke, DUAN Cui-Jiu, TAN Li ,et al. O₂/CO₂ combustion in a fluidized bed(V) -Combustion optimization at a high oxygen concentration [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. (Accepted)
- [5] Hu Y ,Naito S ,Kobayashi N ,et al. CO₂ ,NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases
 [J]. Fuel 2000 ,79(15) : 1925 1932.
- [6] Kazanc F ,Khatami R ,Crnkovic P M ,et al. . Emissions of NO_x and SO₂ from coals of various ranks ,bagasse ,and coal-bagasse blends burning in O₂ /N₂ and O₂ /CO₂ environments [J]. Energy & Fuel , 25(7) 2850 – 2861.
- [7] Ahn J ,Okerlund R ,Fry A ,et al. Sulfur trioxide formation during

oxy-coal combustion [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control 2011(5):s127-135.

- [8] Jia L ,Tan D ,Mccalden Y et al. Commissioning of a 0.8 MWth CF-BC for oxy-fuel combustion [C] //Proceedings of the 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidization Technology - CFB-10. Engineering Conferences International: Sunriver 2011: 569 - 576.
- [9] 段伦博 周 鹜 屈成锐,等. 50 kW 循环流化床 O₂/CO₂ 气氛 下煤燃烧及污染物排放特性[J].中国电机工程学报 2011 31 (5):7-12.

DUAN Lun-bo ,ZHOU Wu ,QU Cheng-rui ,et al. Combustion and pollutant emission characteristics of coal in a 50 kW circulating fluidized bed in an O₂ /CO₂ atmosphere [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2011 31 (5):7–12.

- [10] Saravanan V ,Shivakumar R ,Jayanti S ,et al. Evaluation of the effect of the concentration of CO₂ on the overall reactivity of drop tube furnace derived Indian sub-bituminous coal chars during CO₂ /O₂ combustion [J]. Industrial &Engineering Chemistry Research 2011 50(23) : 12865 12871.
- [11] Glarborg P ,Bentzen L L B. Chemical effects of a high CO₂ concentration in oxy-fuel combustion of methane [J]. Energy & Fuel , 2008 22(1): 291 – 296.
- [12] Watanabe H ,Yamamoto J ,Okazaki K ,et al. NOx formation and reduction mechanisms in staged O₂/CO₂ combustion [J]. Combustion & Flame 2011 ,158(7):1255-1263.

(陈 滨 编辑)

新技术、新工艺 🗓 ᢩᠮ᠋᠊᠋᠋ᡘᠯᠮᡘᡢᠢᢧᠴᡄ ᢩ ᢅᡧ᠋᠄᠋᠄ᢣ᠄᠄᠄᠄᠄᠄᠄᠄

汽轮机过渡工况对奥氏体钢壳体零件金属内蠕变裂纹增长的影响

据《Теплоэнергетика》2011年9月刊报道,到目前为止,在热能动力工程中,为了提高发电装置的功率和 效率,开发了以600℃、30 MPa 新蒸汽参数工作的汽轮机装置。这些汽轮机最高温度部件材料都是由含铬 8.5%~12%补充加入钼、钡、铌、钨后最近又加入钴等合金成份的高铬钢制成。

但是,α晶格钢具有自身固有的600~620℃温度极限。为了过渡到新温度水平(600℃以上),需要有更 高耐热性能的材料,这样只有γ晶格钢和合金。

这种材料的一个范例是 ЭИ-612BДП 奥氏体钢。其壳体零件(停汽阀和调节阀) 在 650℃、35 MPa 新蒸 汽参数下,已成功地运行 10 000 h 以上。

通过带切口的圆柱形试样在温度-力条件下的试验,给出了 ЭИ-612BД∏ 奥氏体钢抗裂性的估算结果。 该试验条件模拟了汽轮机过渡工况汽缸金属加载的情况。

考虑到周期加载对裂纹增长的影响,提出了进行变工况和运行检查的时间间隔。

(吉桂明 摘译)

burner. The axial speed gradient and temperature at the outlet of the burner will increase with an increase of the taperness of the bluff body at the outlet and it is proper to choose 34.21 degrees as the taperness of the bluff body at the outlet of a burner. **Key words**: low heating value coal-bed gas ,partially pre-mixing ,bluff body ,flow return zone ,numerical simulation

流化床 O_2/CO_2 燃烧(N) -氧浓度对 NO_x 和 N_2O 的影响 = O_2/CO_2 Combustion in a Fluidized Bed (N) -Influence of the Oxygen Concentration on NO_x and N_2O [刊 汉]/ZHAO Ke ,TAN Li ,DUAN Cui-jiu ,LU Qinggang (Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(6). -702 ~708

A circulating fluidized bed can realize O_2/CO_2 combustion at a high oxygen concentration thus reducing the size of the combustion chamber and the recycling flue gas quantity. The authors have tested two bituminous coal ranks and a lignite coal in a 15 kW circulating fluidized bed test system and a 0.15 kW one respectively. The influence of the oxygen concentration on the NO_x and N₂O was studied. The research results show that all the three coal ranks can realize stable combustion when the oxygen concentration of the primary air ranges from 44.3% to 55.3% and that of the secondary air is between 43.2% and 60.2%. When the oxygen concentration is about 50% the conversion rate of nitrogen in the coal to NO_x will decrease to 19% -60% of the nitrogen in the coal while the conversion rate of nitrogen in the coal to N₂O will decrease to 20% -81% of the nitrogen in the coal when burning in the air atmosphere. **Key words**: fluidized bed O_2/CO_2 combustion N₂O NO_x

改进的神经网络 PID 火电厂主汽温控制研究 = Study of the Control Over the Main Steam Temperature in a Thermal Power Plant Based on an Improved Neural Network PID (Proportional Integral and Differential) Control [刊,汉]/GAO Kun-lun, LIANG Xiao, WANG Jie, ZHANG Heng (College of Electrical Engineering, Zhengzhou University Zhengzhou China, Post Code: 450001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Pow-er. - 2012 27(6). -709~714

In the light of problems and shortcomings existing in the traditional neural network PID control systems ,presented were measures for improvement. For the structure of the network ,by adding a single-connected network layer ,the parameters of the PID controller corresponding to the output of the network were intervened. As for the tactics for learning the network linkage weight value , a parameter index was chosen to real time monitor the error of the sys-