

煤粉热解气还原 NO 的数值研究

李小丽, 孙 锐, 张晓辉, 吴少华

(哈尔滨工业大学燃烧工程研究所, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Simulation Study on NO-reduction by Volatiles From Coal Devolatilization

LI Xiao-li, SUN Rui, ZHANG Xiao-hui, WU Shao-hua

(Research Institute of Combustion Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Study of nitric oxide (NO) reduction process by volatiles from coal devolatilization, based on the detailed chemical kinetic mechanism (1006 reversible reactions and 145 species), was performed in a plug flow reactor (PFR) of the chemical kinetic simulation package Chemkin 4.1 in the simulated reburning conditions. The main process parameters, such as gas temperature and equivalence ratio were studied and the influences of sulfur contained volatile species on NO reduction were also explored. The PFR simulation results show that, for a given equivalence ratio, reaction temperature higher than 1100K does not benefit NO reduction and the optimum temperature is 1100 K for NO reduction by coal volatiles at equivalence ratio 1.25. For a given temperature, with the increasing of equivalence ratio, NO reduction efficiency increases and HCN and NH₃ concentrations also increase while N₂ decreasing. The optimum NO reduction range of equivalence ratio is from 1.2 to 1.6 at temperature of 1200 K. For all tested cases, the effects of H₂S and SO₂ in volatiles on NO reduction efficiency are less than 5% compared with the tests of no sulfur contained volatile species involved, and H₂S has more influences on NO removing efficiency than SO₂.

KEY WORDS: coal devolatilization; NO reduction; reburning; mechanism; sulfur contained gas species; chemically reacting flow

摘要: 基于详细的化学动力学模型Dagaut机理(1006个反应, 145种组分), 利用Chemkin4.1软件中柱塞流反应器模型模拟了煤粉热解气再燃还原NO的反应过程, 揭示了影响热解气还原NO 2种主要因素(温度和当量比)的作用规律, 并研

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2006CB200303); 国家自然科学基金项目(50576020); 2005年度教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0336)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2006CB200303); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50576020).

究了热解气中含硫组分对NO还原的影响。结果表明: 当量比一定时, 温度高于1100K后不利于热解气还原NO, 当量比为1.25时热解气还原NO的最佳温度是1100K; 温度一定时, 随着当量比增加NO还原效率升高, 1200K时热解气还原NO最佳当量比范围为1.2~1.6, 且随着当量比增加反应器中HCN和NH₃浓度增大, 而N₂浓度减少; 在模拟的工况中, 热解气中的H₂S和SO₂对NO还原效率的影响不超过5%, 且H₂S对NO脱除的影响大于SO₂。

关键词: 煤热解; NO 还原; 再燃机理; 硫化物; 化学反应流动

0 引言

再燃技术是一种经济有效的低NO_x燃烧技术, 它可以降低NO_x排放50%以上^[1]。其主要的原理是将炉膛分为3个区: 主燃区、再燃区和燃尽区。绝大部分燃料在较低的富氧条件下燃烧产生烟气, 同时生成NO_x。在再燃区, 二次燃料喷入形成富燃料的环境, 烟气进入再燃区后其中的NO_x与碳氢化合物及其自由基反应, 转化为N₂、HCN和NH₃等。为了保证燃料的燃尽率, 通常在再燃区的上方喷入燃尽风, 这时在再燃区形成的氮的中间产物, 如HCN和NH₃将转化为N₂或NO。

近几年来, 国内对煤粉再燃的研究作了大量的工作, 研究主要集中于影响煤粉再燃的主要因素的作用规律及煤粉再燃的应用^[2-4], 煤粉再燃既包含挥发分的同相还原, 又包含煤焦的异相还原。对于再燃还原NO的同相反应机理, 主要集中于单一的碳氢化合物与氮氧化物相互作用, 或是碳氢化合物的简单组合。对热解气或气化气再燃的报道不多, 且这些气体大都是以生物质作为燃料取得的^[5-6]。有研究表明^[7]: 对于同相反应, 高挥发分煤种更有利于还原NO_x。因此, 研究煤粉热解气还原NO_x的机制就显

得尤为重要。

本文先用经 TGA 验证的 FG-DVC 模型对煤的快速热解成分进行模拟, 取得所需的热解气成分及含量; 再基于详细的化学动力学模型, 利用 Chemkin4.1 软件中的柱塞流反应器 (plug flow reactor, PFR) 代码对影响煤粉热解气还原 NO 的主要因素进行了研究, 并分析了热解气中含硫组分对 NO 还原效率的影响。

1 反应器模型

本文采用柱塞流反应器对理想恒温条件下的化学反应过程进行模拟, 如图1所示, 并且假设: ①还原剂与烟气预先完全混合, 忽略实际过程中混合效率的影响; ②还原剂与烟气的预混气体在反应之前达到预反应温度, 忽略升温过程的影响; ③反应过程保持恒温^[8]。

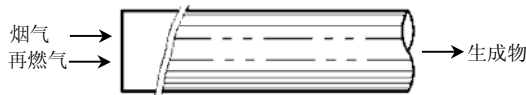


图 1 柱塞流反应器示意图
Fig. 1 Schematic of the PFR

本研究不涉及气固相反应, 该模型涉及的控制方程如下所示^[9]:

质量控制方程为

$$\rho u \frac{dA}{dx} + \rho A \frac{du}{dx} + uA \frac{d\rho}{dx} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; u 为气体轴向速度, m/s ; A 为流动方向上的横截面积, m^2 。

气体组分方程为

$$\rho u dY_k / dx = W_k \omega_k \quad (2)$$

式中: Y_k 为组分 k 的质量分数, %; ω_k 为化学反应的组分物质的量生成率, mol/s ; W_k 为组分 k 的相对分子质量。

动量方程为

$$A \frac{dP}{dx} + \rho u A \frac{du}{dx} + \frac{dF}{dx} = 0 \quad (3)$$

式中: $dF/dx = a_1 \cdot (\rho u^2 f / 2)$, f 为摩擦阻力系数; 对于层流 $f = 16/Re$, 湍流 $f = 0.0791Re^{-0.25}$; F 为反应器壁面和气体之间的摩擦阻力。

气体状态方程为

$$p\bar{W} = \rho RT \quad (4)$$

式中: p 为气体绝对压力, Pa ; \bar{W} 为气体平均相对分子质量; R 为理想气体常数; $8.3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体温度, K 。

在反应过程保持恒温的假设下, 不需要求解能

量方程, 结合化学反应动力学参数, 求解微分方程和代数方程, 就可得出反应系统内压力和组分浓度分布等。

2 动力学模型

由于再燃是非常复杂的物理化学过程, 它包含再燃燃料的部分氧化和热解、中间产物与NO之间的反应以及各种自由基之间的反应。如果计算机的代价可以接受, 通常希望尽可能地采用更为全面的反应机理, 以更好地反应实际的再燃过程。Dagaut从天然气和低碳氢燃料($\text{C}_1\text{-C}_4$)还原NO的详细化学动力学机理出发, 总结出了Dagaut模型(145种组分, 1006个反应)^[5,10], 它是近年来发展起来的最为详细的模型之一^[11]。并且该机理在不断完善的过程中已经广泛用于烃类物质及热解气还原反应模拟^[5,10-13]。因此, 对于煤粉热解气的还原, 本文采用Dagaut模型进行研究。

3 煤粉热解过程模拟计算

本文使用的某煤粉热解气是通过经TGA试验验证的FG-DVC模型对煤的热解成分进行模拟取得的, 试验所用煤粉的元素分析和工业分析如表1所示。FG-DVC模型全称官能团的解聚、气化、交联模型, 它是预测煤粉热解产物(气体、焦油和焦炭)种类和含量的综合模型。目前FG-DVC模型在国内还没有被广泛使用, 因而用TGA试验对其作验证, 再用验证过的模型来分析在高加热速率热解条件下的挥发分量及其组成成分。

表 1 试验煤样的元素分析和工业分析

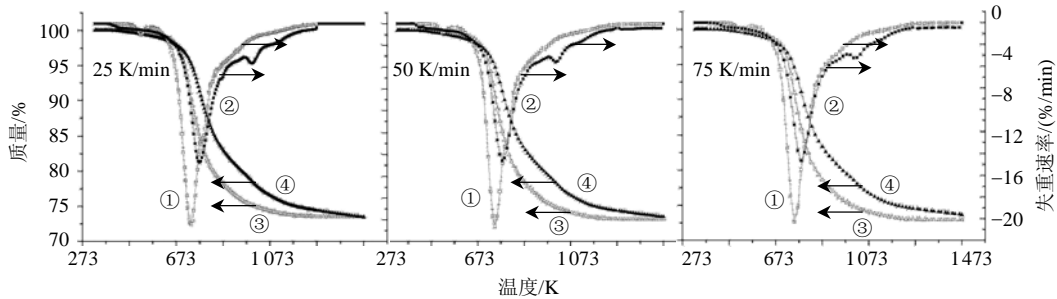
Tab. 1 Ultimate and proximate analysis of tested coal samples

元素分析						工业分析			%
C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	O_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	M_{ad}	
47.93	2.97	0.79	1.94	6.66	36.91	22.6	37.69	2.8	

试验仪器采用Mettler-Tolardo公司生产的TGA/SDT851e型热重分析仪。热重试验过程中采用纯度为99.999%的高纯氮作为保护性气体, 以保证试验样品处于完全热解状态。试验前, 以150 mL/min的流量向热天平中通入高纯氮气, 吹扫大约1h, 将加热区的空气排空后, 再打开热天平的电源对样品进行吹扫并继续通入高纯氮。之后装入(40±0.5) mg样品, 并启动加热程序。当系统温度达到40℃后恒温5 min, 目的是为了减少装入样品时带进的空气对试验结果的影响, 恒温结束后分别以不同的升温速率(25、50、75℃/min)开始程序升温, 加热到1200℃

后恒温 10 min。FG-DVC以煤质干燥无灰基成分作为输入模型模拟对象,以TGA升温数据作为加热条件,结合热解试验工况分别对不同升温速率下的热解过程进行模拟。对不同工况下的TG、DTG结果和FG-DVC计算结果进行比较,如图2所示。可看出,不同升温速率下的DTG曲线均为单峰曲线,并且模拟结果与试验结果趋势吻合较好,到达热解终温时的失重率基本一致。这说明FG-DVC模型可以较好地挥发分慢速热解进行预测。AFR曾用FG-DVC计算过8种煤快速热解,并与EPRI的实验数据对比,

发现模型预测值和试验值吻合很好,因此可以认为FG-DVC模型适合于模拟煤的快速热解过程^[14]。利用FG-DVC模型对试验煤样进行高升温速率下模拟计算,条件为:初温 497 K,终温 1623 K,升温速率 13 622 K/s。这与超细煤粉在再燃区的升温速率在数量级上一致^[15]。考虑热解气中含硫组分的前提下,其主要组分计算结果见表2。选择文献[16]中的反应器,其内径 0.9 cm,长为 19 cm,该反应器在建造过程中已经将反应物在轴向的扩散特性最小化^[16]。



①—FG-DVC 模拟的 DTG 曲线; ②—实验测得的 DTG 曲线; ③—FG-DVC 模拟的 TG 曲线; ④—实验测得的 TG 曲线

图2 不同加热速率下热重测量结果与FG-DVC模拟结果对比

Fig. 2 TG measurements and FG-DVC modeling results for yield and weight loss rate (on dry basis) at different heating rates

表2 煤粉热解气组分表

Tab. 2 Gas species content of volatiles from coal devolatilization

组分	CO ₂	NH ₃	CO	H ₂	HCN	H ₂ O	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	NO ₂	N ₂	SO ₂	H ₂ S
体积分数/%	1.042	0.108	7.16	43.216	0.159	23.544	14.764	1.846	1.23	1.901	1.297	0.008	1.295	0.212	2.218

PFR设置2个入口,一为烟气入口,另一为再燃燃料及其氧化剂入口。对于所有模拟的工况,设气体总流量为1200 mL/min(标准状态),其中烟气流量为900 mL/min,再燃燃料和再燃区送风量共为300 mL/min,即整个再燃区产生的烟气量约为总气体流量的25%,烟气的成分为CO₂、H₂O、NO和N₂,物质的量分数分别为0.13、0.11、0.002和0.758。这样,2入口气体混合后能够保持初始的NO体积分数为0.1%。为了研究含硫组分(H₂S和SO₂)对热解气还原NO的影响,将热解气中除含硫组分之外的所有气体作为再燃燃料的计算工况设为工况1,不考虑热解气中SO₂的工况设为工况2,不考虑热解气中H₂S的工况设为工况3,考虑热解气中所有组分的工况设为工况4,各工况组分的浓度关系是基于煤粉热解气中各组分的浓度计算得到,即依据表2中的结果计算取得。本文定义NO还原效率为

$$\text{还原效率} = \frac{[\text{NO}]_{\text{in}} - [\text{NO}]_{\text{out}}}{[\text{NO}]_{\text{in}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:[NO]_{in}为反应器入口的NO物质的量浓度;

[NO]_{out}为反应器出口的NO物质的量浓度。根据文献定义^[17],当量比的计算公式为

$$\text{当量比} = \left(\frac{\text{燃料质量}}{\text{氧化剂质量}} \right)_{\text{inlet}} / \left(\frac{\text{燃料质量}}{\text{氧化剂质量}} \right)_{\text{stoi}} \quad (6)$$

4 结果及讨论

4.1 温度对热解气脱硝效率的影响

为了考察温度对热解气还原NO的影响,固定当量比为1.25,研究工况1条件下温度对热解气还原NO的影响,如图3所示。从3(a)可以看出,温度低于1000 K时,有较高的氧含量存在,而温度高于1100 K后,氧含量非常低。这说明,在给定的反应器长度范围内(温度为1000 K时,停留时间为0.67s),温度低于1000 K时燃烧很不完全;只有当温度高于1100 K反应速率加快之后,反应器内才表现强烈的富燃料环境。当温度从900 K升高到1000 K时,H₂和CH₄的浓度急剧下降,伴随着它们的燃烧,出口氧浓度在这一范围内也迅速降低。值得注意的是,出口H₂的浓度在反应器温度为1000 K时出现

低谷，之后开始上升，温度超过 1400 K 后又有所回落。低谷的产生是由于以下原因造成：当温度升到 1000 K 时与 O₂ 较高的反应速率使得 H₂ 和 CH₄ 等碳氢化合物消耗较多，导致这 3 种气体的含量在 900 K 到 1000 K 之间骤降；而当温度高达 1100 K 后反应器中的反应速率极快，虽然 H₂ 和碳氢化合物含量下降都很快，但由于 H-H 键能高于 C-H 键能，温度升高更有利于碳氢键的断裂，从而碳氢化合物消耗更多的氧量，这样竞争的结果使 H₂ 的消耗量减少，此外高的温度有利于 C₂、C₃ 碳氢化合物裂解产生 H₂，两者同时作用使得温度高于 1000 K 后反应器出口 H₂ 浓度上升。还可以看到，反应器出口 CO 的含量随着温度的升高呈单调下降趋势，直到氧浓度为零后才开始有所上升。

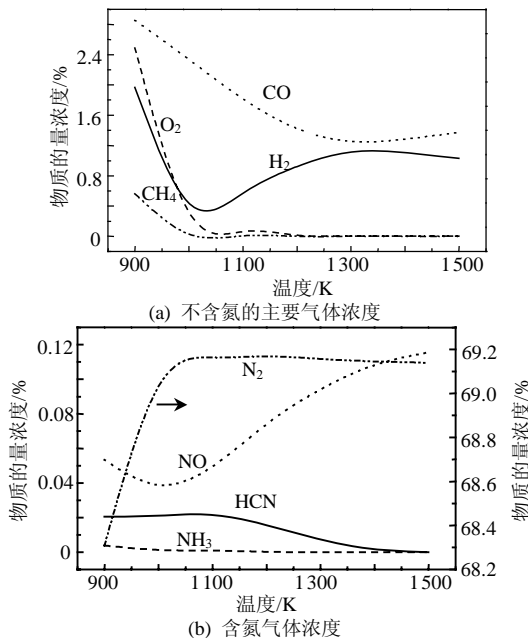


图 3 工况 1 条件下温度对热解气还原 NO 的影响
 Fig. 3 Effect of temperature on NO reduction by gases from devolatilization without sulfur contained species

图 3(b) 是反应器出口主要含氮组分的变化情况。由 (b) 可知，温度的升高有利于 HCN 和 NH₃ 的转化，主要表现为在反应器出口的浓度下降。NO 的浓度在温度为 1000 K 时有一个转折点，在此之前温度的升高有利于 NO 的还原，而温度超过 1000 K 后 NO 的浓度则升高。原因是温度低于 1000 K 时，能够有效还原 NO 的碳氢化合物及其自由基浓度较高，虽然反应器中仍有氧存在 (图 3(a))，但较低的反应速率使得碳氢化合物与 NO 发生还原反应成为可能，而且温度的升高也有利于还原反应的进行，最终导致出口 NO 的浓度下降。当温度超过 1000 K 后，反应速率增加很快，NO 在与氧争夺碳氢化合物的过程中失去

优势，而且随着温度的升高反应物在反应器中的停留时间下降，两者综合作用导致 NO 的脱除效果下降。尽管温度为 1000 K 时反应器出口 NO 的浓度较低，但为了保证较高的燃烧效率，1000 K 并不是热解气还原 NO 的最佳温度。综合考虑图 3(a) 和 (b)，本文认为热解气还原 NO 的最佳温度应为 1100 K。

4.2 当量比对热解气脱硝效率的影响

图 4 反映的是温度为 1200 K 时当量比的变化对反应器出口主要组分的影响。由图 4(a) 可知，随着当量比的增加，反应器中氧含量降低。当量比增加到 1.2 时，反应器出口的氧浓度已接近于零。反应器中随着当量比的增加而降低的氧浓度导致 H₂、CO 和 CH₄ 等碳氢化合物消耗减少，反应器出口处浓度增加。而大量的 H₂、CO 和 CH₄ 等碳氢化合物将系统中的 NO 还原为 N₂ 和 HCN 等氮的中间产物，从而导致 HCN 和 NH₃ 浓度增加，NO 浓度降低，如图 4(b) 所示。由图 4(b) 还可看出，当量比在 1.2 至 1.6 的范围内 NO 的浓度随着当量比的增加线性降低；而当量比增大至 1.6 后，再增加当量比反应器出口 NO 的浓度变化不大，反而导致不完全燃烧增加，见图 4(a)。这说明热解气还原 NO 的最佳当量比区间是 1.2~1.6，且当量比为 1.6 时有较高的 NO 还原率。从图 4(b) 中还可以看到，随着当量比的增加，出口 HCN 的浓度增加幅度较 NH₃ 大很多。一个原因是在参有含氮化合物的富燃料气体火焰中，HCN 是燃料氮/碳氢化合物相

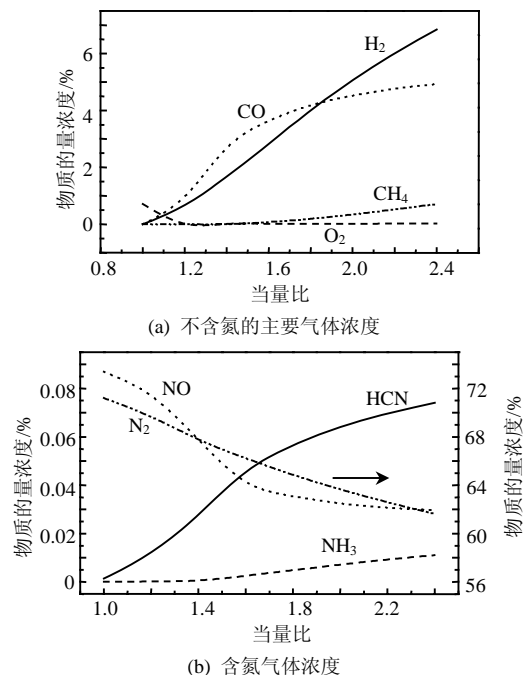
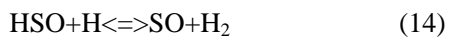
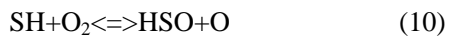
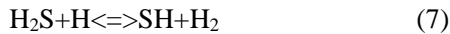


图 4 工况 1 条件下，当量比对热解气还原 NO 的影响
 Fig. 4 Effect of equivalence ratio on NO reduction by gases from devolatilization without sulfur-containing species

互作用的主要产物,反应区中的燃料氮主要以HCN的形式存在,这与FG-DVC模拟结果(表2)一致。另一个更重要的原因是由于在富燃料火焰中,HCN是碳氢化合物还原NO的最主要中间产物,且有限的停留时间也限制了HCN的转化,使得HCN的浓度升高。此外还可发现,随着当量比的增加,N₂浓度呈线性降低趋势,见图4(b)。

4.3 热解气中含硫组分对NO脱除的影响

含硫组分对NO转化的影响见图5。由图5(a)可以看到,热解气中含硫组分H₂S和SO₂对NO的脱除有一定的影响,但影响不大。总体上为温度低于1150 K时含硫组分抑制NO的脱除,而温度高于1150 K后则促进NO的脱除。在所研究的温度段内,工况3(含SO₂的热解气)与工况1(不考虑含硫组分的热解气)还原NO的效果非常相似,而工况2(含H₂S的热解气)和工况4(既含H₂S又含SO₂)的还原效果也相近。Molero^[18]在类似的条件下取得的实验结果表明SO₂的加入对NO没有太大的影响,这与本文的结果比较吻合。由此可知,H₂S对NO脱除的影响较SO₂大,且H₂S和SO₂对NO脱除的综合效果与只有H₂S的作用效果相近。一个原因是热解气中H₂S的含量较SO₂大很多;另一个原因是在当量比为1.25的条件下,大量的H₂S会反应生成SO₂,在这一过程中消耗了O₂和H、O、OH等自由基,从而降低了NO的生成。根据敏感性分析的结果,H₂S氧化生成SO₂的主要反应如下:



由于反应系统是高浓度的富燃料环境,且温度不高(900~1500 K),因此热力型NO和快速型NO的生成量可以忽略,从而认为反应器内的含硫组分能够有效降低燃料型NO的生成。由(b)可知:当量比低于1.6时,含硫组分能够有限地提高NO的转化率;而当量比高于1.6时,含硫组分对NO脱除的作用效果则相反,且当量比越高,作用效果越明显。但是在所研究的当量比范围内(1~2.4),含硫组分对NO还原效率的影响不超过5%。

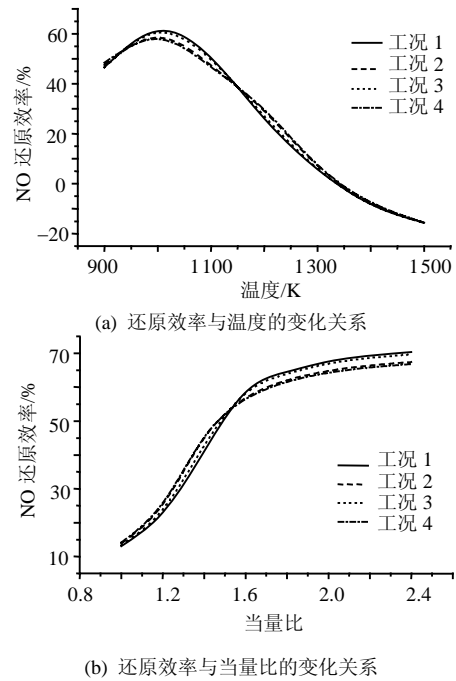


图5 含硫组分对NO还原的影响

Fig. 5 Effect of sulfur-containing species on NO reduction

5 结论

本文采用化学动力学模拟的方法,对使用FG-DVC模拟取得的某煤粉热解气还原NO反应的主要影响因素(温度和当量比)进行了研究和分析,并且考虑了煤粉热解气中含硫组分H₂S和SO₂的影响。研究主要得出了以下结论:

(1) 当量比为1.25的前提下,温度低于1400 K时,热解气中的CH₄等碳氢化合物比H₂更容易着火燃烧。温度高于1100 K后,温度继续升高不利于热解气还原NO。为了保证较高的燃烧效率和NO还原率,此当量比下热解气还原NO的最佳温度为1100 K。

(2) 温度一定时,随着当量比的增加NO的还原效率升高。1200 K时还原NO的最佳当量比范围是1.2~1.6,且当量比为1.6时能取得接近60%的NO还原率。随着当量比的增加HCN和NH₃浓度都有增加,但前者增幅更大。而N₂浓度的变化则与当量比呈单调反比关系。

(3) 温度低于1150 K时含硫组分抑制NO的脱除,高于1150 K后则促进NO的脱除;当量比低于1.6时,含硫组分能够提高NO的转化率;而当量比高于1.6时,含硫组分对NO脱除则起抑制作用。但总的来说,热解气中的H₂S和SO₂对NO还原的影响不超过5%,且H₂S对NO脱除的影响大于SO₂在于H₂S在生成SO₂的过程中消耗了大量的O₂和H、O、OH等自由基。

参考文献

- [1] Smoot L D, Hill S C, Xu H. NO control through reburning[J]. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1998, 24(5): 385-408.
- [2] 刘忠, 阎维平, 高正阳, 等. 煤种对超细煤粉再燃还原 NO 效率的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(12): 273-276.
Liu Zhong, Yan Weiping, Gao Zhengyan, et al. Effect of coal type on NO reduction by micro-pulverized coal reburning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(12): 273-276(in Chinese).
- [3] 李戈, 师东波, 池作和, 等. 煤粉再燃还原 NO 的实验研究[J]. *电站系统工程*, 2004, 20(1): 44-46.
Li Ge, Shi Dongbo, Chi Zuohe, et al. Experimental research on NO_x reduction in furnace with coal reburning[J]. *Power System Engineering*, 2004, 20(1): 44-46(in Chinese).
- [4] 刘忠, 阎维平, 赵莉, 等. 超细煤焦的细度对再燃还原 NO 的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(8): 22-25.
Liu Zhong, Yan Weiping, Zhao Li, et al. Influence of the micro-pulverized coal char fineness on NO reduction by reburning [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(8): 22-25(in Chinese).
- [5] Dagaut P, Lecomte F. Experiments and kinetic modeling study of NO-reburning by gases from biomass pyrolysis in a JSR[J]. *Energy and Fuels*, 2003, 17(3): 608-613.
- [6] 段佳, 罗永浩, 晏乃强, 等. 生物质气化再燃特性实验研究[J]. *燃料化学学报*, 2007, 35(2): 245-248.
Duan Jia, Luo Yonghao, Yan Naiqiang, et al. Experimental study on characteristics of biomass gasification reburning[J]. *Journal of Fuel Chemistry And Technology*, 2007, 35(2): 245-248(in Chinese).
- [7] Burch T E, Chen W Y, Lester T W, et al. Interaction of fuel nitrogen with nitric oxide reburning with coal[J]. *Combustion and Flame*, 1994, 98(3): 391-401.
- [8] 张彦文, 蔡宁生, 李振山. 加入CH₄促进SNCR过程的计算与机理分析[J]. *热力发电*, 2005, 34(12): 9-12.
Zhang Yanwen, Cai Lingsheng, Li Zhenshan. Calculation and mechanism analysis of SNCR process promoted by adding CH₄[J]. *Thermal Power Generation*, 2005, 34(12): 9-12(in Chinese).
- [9] Kee R J, Rupley F M, Miller J A, et al. *Chemically reacting flow*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- [10] Dagaut P, Lecomte F. Experiments and kinetic modeling study of the reduction of NO by hydrocarbons and interactions with SO₂ in a JSR[J]. *Fuel*, 2003, 82(9): 1033-1040.
- [11] Chaiklangmuang S, Jones J M, Pourkashanian M, et al. Conversion of volatile-nitrogen and char-nitrogen to NO during combustion [J]. *Fuel*, 2002, 81(18): 2363-2369.
- [12] 范志林, 张军, 林晓芬, 等. 生物质气再燃还原NO_x的数值研究[J]. *能源研究与利用*, 2007, (1): 7-10.
Fan Zhilin, Zhang Jun, Lin Xiaofen, et al. Numerical study of NO_x reduction by biomass gas reburning[J]. *Study and Utilization of Energy Source*, 2007, (1): 7-10(in Chinese).
- [13] Dagaut P, Luche J, Cathonnet M. Reduction of NO by propane in a JSR at 1 atm: experimental and kinetic model[J]. *Fuel*, 2001, 80(7): 979-986.
- [14] Dutton K. Functional-group, depolymerization, vaporization, cross-linking mode[EB/OL]. *Advanced Fuel Research Inc.*, 2007. <http://www.afrinc.com/products/fgdvc>.
- [15] 刘忠, 赵莉, 胡满银, 等. 超细煤粉颗粒的升温速率及其对再燃还原 NO 的影响[J]. *华北电力大学学报*, 2005, 32(3): 95-98.
Liu Zhong, Zhao Li, Hu Manyin, et al. Simulation of temperature history during pulverized coal reburning[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2005, 32(3): 95-98(in Chinese).
- [16] Alzeta M U, Glarborg P, Johansen K D. Low temperature interactions between hydrocarbons and nitric oxide, an experimental study [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 109(1-2): 25-36.
- [17] Duan J, Luo Y H, Yan N Q, et al. Effect of biomass gasification tar on NO reduction by biogas reburning[J]. *Energy and Fuels*, 2007, 21(3): 1511-1516.
- [18] Molero L J. *Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels*[D]. London: University of London, 1998.

收稿日期: 2007-10-01.

作者简介:

李小丽(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事煤粉及生物质再燃方面的研究, greice_8547@163.com;

孙锐(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 从事浓淡煤粉燃烧技术及燃烧过程的数值模拟研究;

张晓辉(1979—), 男, 博士, 讲师, 洁净煤燃烧技术、炉内深度分级燃烧烟气污染控制技术、煤粉燃烧特性及燃烧数值模拟研究;

吴少华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 从事煤的清洁燃烧方面的研究。

(责任编辑 王庆霞)