

甲烷再燃烧对突扩燃烧器中煤粉燃烧和 NO 生成影响的数值研究*

张宇¹ 魏小林¹ 周力行² 盛宏至¹

¹ (中国科学院力学研究所, 北京 10080)

Tel: (86-10)-62545533-3052; E-mail: yuzhang@imech.ac.cn

² (清华大学力学系, 北京 100084)

摘要 再燃烧是降低煤粉燃烧器中 NO 生成的有效手段。本文用纯双流体模型, 包括 k-e-kp 两相湍流模型, EBU-Arrhenius 燃烧模型, 六热流辐射模型, NO 生成湍流反应的 AUSM 模型, 氮释放的简化 Solomon 模型等对燃烧器进口不同布风位置加入等量甲烷的再燃烧工况进行了数值模拟, 讨论了再燃烧对于 NO 生成和排放的影响。本文部分模拟结果和实验数据进行了对比分析, 验证了模拟结果的合理性。同时使用化学平衡软件对所讨论的工况进行了分析。

关键词 煤粉燃烧; NO 生成; 再燃烧

1. 引言

如何降低煤粉燃烧中 NO 的生成与排放, 是人们关注的焦点。一种有效降低 NO 生成的方法是形成贫氧燃烧。常用的形成贫氧燃烧的方法是采用再燃烧、分级燃烧和烟气再循环等方法。也可以通过改变燃烧器进口的结构, 形成局部的贫氧燃烧, 比如加入煤粉浓缩器, 改变旋流数等等[1,2]。文献[3, 4]在设置旋流燃烧器的燃烧炉的侧壁上加入天然气形成再燃烧。测量结果表明, 可使 NO 排放降低 70% 以上。但是在实际的煤粉炉内, 由于布风的复杂性, 如果能在已有的进风通道内混入甲烷, 应该是一种更为方便的做法。文献[5]对旋流煤粉燃烧器进行了一次风混入甲烷的数值模拟, 证明该方法对于降低 NO 的生成是有效的, 但是缺乏更为详细的机理分析以及多工况对比分析。本文首先针对没有再燃烧的基本工况进行了数值模拟, 并与文献[6]的实验数据进行了比较, 验证了计算结果; 然后对不同的再燃烧工况进行了基于双流体模型[7]、氮释放简化 Solomon 模型[8]和 NO 生成 AUSM 模型[9]的数值模拟, 通过对比分析, 详细讨论了进口不同位置混入甲烷对 NO 生成以及最终排放的影响; 最后, 将再燃烧的 CFD 模拟结果与化学平衡分析结果进行了对比分析。

2. 旋流煤粉燃烧和 NO 生成的数值模拟

* 国家自然科学基金资助项目(No.50376068)

表 2 煤的化学分析

工业分析 (收到基)				元素分析 (收到基)				
水分	挥发分	灰	固定碳	C	H	N	S	O
1.57	30.46	6.67	62.87	78.9	4.86	1.25	0.57	7.61

携带煤粉的空气从燃烧器中心进入, 直流二次风和直流三次风分别从两个环型通道进入反应器。反应器长 2.5m, 测量点距进口的距离分别为 0.15m, 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m, 0.6m, 0.9m, 1.5m, 2.5m。

采用自行编制的双流体模型程序, 计算长度为 2m, 非均匀交错网格 (50, 30, 7), 在 P4 的微机上计算一个工况需要 5 天。

3. 数值模拟结果和讨论

图 2-图 4 给出了没有再燃烧的情况下, CO_2 , O_2 , NO 浓度的模拟结果和实验结果。从图中可以看出, 模拟规律和实验规律完全符合, 在数值上还有一定的偏差。其中, NO 浓度的预测值和实验值符合的很好, 这可能是由于使用了更为合理的 AUSM 模型来预测 NO 生成的原因。

图 5-图 9 给出了没有再燃烧的基本工况, 以及各种再燃烧工况的燃烧温度。其中工况 A 是指在一, 二, 三次风通道都混入 1% 甲烷气体的情况, 工况 B 是指仅在一次风通道混入等量甲烷的情况, 工况 C 是指仅在二次风通道混入等量甲烷的情况, 工况 D 是指仅在三次风通道混入等量甲烷的情况。从温度等值线图中可以看出, 与没有再燃烧的基本工况相比, 各种再燃烧工况的燃烧高温区都向进口方向移动, 各种工况的排烟温度相差无几。

图 10-14 给出了各种工况的甲烷浓度分布等值线图, 从中可以看出, 甲烷再燃烧的各种工况, 进口处都有比较高的甲烷浓度, 但是在距离燃烧器进口 0.8m 左右的地方, 各种工况的甲烷浓度趋于一致, 证明甲烷在主燃烧区反应完全, 达到了消耗氧气, 形成贫氧燃烧的目的。只有工况 c 的甲烷浓度在过了主燃烧区以后还比较高, 没有充分反应。

图 15 给出了各种工况截面 NO 浓度的对比图, 可以看出, 和无再燃烧的基本工况相比, 各种再燃烧工况 NO 的高浓度区都有所提前, 这和高温区提前有关, 但是除了工况 c, NO 浓度的最高值都低于无再燃烧的基本工况。在下游, 所有再燃烧工况的 NO 值趋于一致, 均低于无再燃烧基本工况的 NO 浓度。这说明进口甲烷再燃烧确实起到了降低 NO 的作用, 各种再燃烧工况的 NO 排放值有所不同, 工况 b 的最低, 工况 c 的最高, 这说明再燃烧气体的加入位置对于最终的排放有一定的影响。本文计算的工况, 燃烧在距离进口 1m 左右的地方基本结束, 到达出口时反应已经接近平衡, 所以各种再燃烧工况的 NO

本文采用纯双流体模型, 包括 $k-\epsilon-kp$ 两相湍流模型, EBU-Arrhenius 燃烧模型, 六热流辐射模型, NO 生成湍流反应的 AUSM 模型, 氮释放的简化 Solomon 模型等对于不同再燃烧工况进行了数值模拟。数学模型的内容和文献[1]的相同。

模拟的对象是本文第二作者在德国斯图加特大学 IVD 研究所做的关于煤粉燃烧器的实验[6], 其几何形状如图 1 所示。表 1 给出了燃烧器的物理参数, 表 2 给出了煤的化学分析结果。

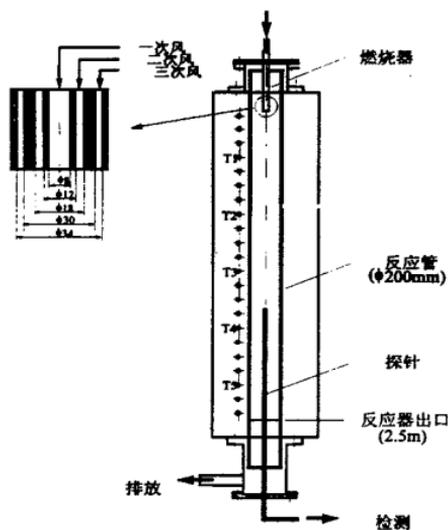


图.1 燃烧器几何形状

表 1 燃烧器物理参数

	单位	数值
煤粉流量	kg/h	1.0
过量空气系数	-	1.15
壁面温度	°C	1100
携带煤粉空气的流量	nm ³ /h	1.5
携带煤粉空气的温度	°C	200
一次风+二次风流量	nm ³ /h	8.0
一次风和二次风比例	-	1:2
一次风温度	°C	250
二次风温度	°C	350
煤粉平均粒径	μm	16,52,160,350
	%	30, 35, 25, 10

排放差异比较小。

图 16 给出了本文计算的无再燃烧工况，以及再燃烧工况的化学平衡计算结果，在这种计算中，各种再燃烧工况是无差别的。计算结果显示，加入甲烷的再燃烧工况能明显降低 NO 的生成，这和本文 CFD 模拟结果一致。数值上，NO 的平衡浓度高于 CFD 模拟结果，这一方面是由于 CFD 本身的误差，一方面是由于反应毕竟没有达到化学平衡的理想状态。

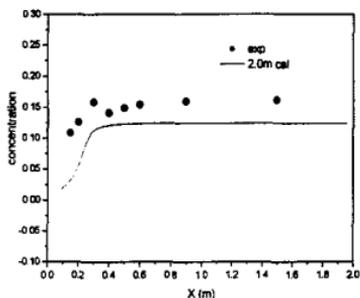


图 2 CO₂ 截面浓度实验计算对比图

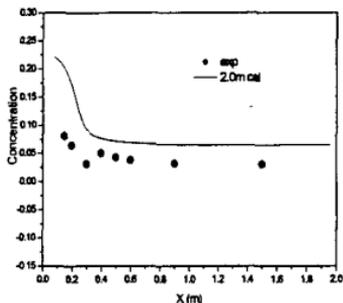


图 3 O₂ 截面浓度实验计算对比图

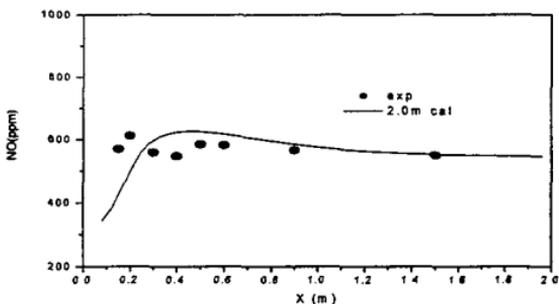


图 4 NO 截面浓度实验计算对比图

参考文献

- [1] L. X. Zhou, Y. Zhang, and J. Zhang, Simulation of swirling coal combustion using a full two-fluid model and an AUSM turbulence-chemistry model, *Fuel*, 82:pp1001-1007, 2003.
- [2] 张宇, 周力行, 张健, 煤粉浓缩器对旋流煤粉燃烧 NO 排放影响的研究, 将发表于自然科学进展, 2003
- [3] D.R.Tree, A. W.Clark, Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame, *Fuel*, 79:pp1687-1695, 2000.
- [4] W.A.Nazeer, R.E.Jackson, J.A.Peart, D.R.Tree, Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural gas reburning, *Fuel*, 78:pp689-699, 1999.
- [5] 张宇, 周力行, 张健 一次风加入甲烷对旋流煤粉燃烧 NO 生成影响的数值模拟 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集 2003, 163-167
- [6] Xiaolin Wei, Xiaohai Han, Uwe Schnell, Joerg Maier, Holger Woerner, Klaus R.G. Hein. The Effect of HCl and SO₂ on NO_x Formation in Coal Flames. *Energy and Fuels*, 17 (5): 1392-1398, 2003.
- [7] L.X. Zhou, Y.C. Guo and W.Y. Lin, Two-fluid models for simulation reacting gas-particle flows, coal combustion and NO_x Formation, *Combustion Science and Technology*, vol.150, pp161~180, 2000.
- [8] 张宇, 周力行, 张健, 煤粉燃烧 NO 生成的 Solomon 热解模型, 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集, pp151-156, 南京, 2002.
- [9] 张宇, 周力行, 张健, 用湍流反应统一二阶矩代数模型模拟旋流煤粉燃烧 NO 生成, 将发表于燃烧科学与技术, 9:209-213, 2003.

Numerical Simulation of NO Formation in Expanding Coal Combustion with Natural Gas Reburning

Y. Zhang, X.L. Wei, L.X. Zhou*, H.Z. Sheng

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Tel : (86-10)-62545533-3052; E-mail: vuzhang@imech.ac.cn

*The State Key Laboratory of Clean Coal Combustion,
Tsinghua University, Beijing 100084, China

ABSTRACT

A full two-fluid model of reacting gas-particle flows and coal combustion with an algebraic unified second-order moment (AUSM) turbulence-chemistry model for the turbulent reaction rate of NO formation are used to simulate expanding coal combustion with and without natural gas added in the inlet. The simulation results for the case without natural gas reburning are in fair agreement with the experimental results reported in the reference. The simulation results for different nature gas adding positions indicate that the natural gas reburning can form lean oxygen combustion at the combustor inlet region and the NO concentration is reduced. The same result can be obtained from chemical equilibrium analysis.

Keywords: coal combustion; reburning, NO formation;