燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2017，23(4)：365-371
DOI 10.11715/rskxjs.R201608014

水蒸气对煤粉 MILD 燃烧特性影响的数值模拟

祝鑫阳，张立麒，毛志慧，段艳松，郑楚光
（华中科技大学煤燃烧国家重点实验室，武汉 430074）

摘　要：基于 IFRF 炉子结构，在一次风喷口与二次风喷口之间增加一个水蒸气喷口，通过数值模拟方法研究了水蒸气流速对煤粉 MILD 燃烧的影响．结果表明，随着水蒸气流速的增加，一次风与二次风混合点提前，炉内烟气湍流混合作用增强，火焰尺寸增大，温度分布更为均匀．水蒸气流速的增加促进了碳的氧化反应并抑制了气化反应，但峰值温度和总的 NO 排放量分别下降了 57 K 和 23×10^{-6}，前者是由于烟气的稀释作用大于氧化放热作用，而后者则是由于气化作用生成的还原性物质抑制了 NO 的生成．

关键词：水蒸气；流速；MILD 燃烧；气化反应；NO 排放
中图分类号：TK16　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740(2017)04-0365-07

Numerical Simulation of Effects of Water Vapor Effects on Pulverized Coal MILD Combustion Characteristics

Zhu Xinyang，Zhang Liqi，Mao Zhihui，Duan Yansong，Zheng Chuguang
(State Key Laboratory of Coal Combustion，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China)

Abstract：Based on the pilot-scale furnace of IFRF，two steam are symmetrically added nozzles between the primary air nozzle and the secondary air nozzle，and the effects of water vapor velocity on the characteristics of pulverized coal MILD combustion are investigated by numerical simulation. The study shows that with the increase of water vapor velocity，the mixed point of primary air and secondary air meets in advance，the turbulent mixing of flue gas is enhanced，the flame size increases and the temperature distribution becomes more uniform. It is worth noting that the increase of water vapor velocity promotes the carbon oxidation reaction and suppresses the carbon gasification reaction，but the peak temperature and the total NO_x emissions are reduced by 57 K and 23×10^{-6}，respectively. The former is due to the fact that the effect of flue gas dilution is greater than the effect of exothermic oxidation，while the latter is due to the fact that the reducing substance produced by the gasification reaction suppresses NO formation.

Keywords：water vapor；velocity；MILD combustion；gasification reaction；NO emission

MILD(moderate or intense low oxygen dilution)燃烧是一种极具发展前景的新型燃烧技术[1-2]．该技术的实现一般需要将空气预热到较高的温度，因此也常被称为“高温空气燃烧”[3]．MILD 燃烧是一种容积燃烧，相比于传统燃烧，前者燃料的热解受到抑制，火焰变厚、火焰前锋面消失[4]，且具有反应速率低、热流分布均匀、峰值温度低等特点[5]，可同时实现较低的 NO 排放和较高的燃烧效率[6]．近年来，随着

收稿日期：2016-09-18.
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2016YFE0102500).
作者简介：祝鑫阳（1992—　　），男，硕士研究生，1165257091@qq.com.
通讯作者：张立麒，男，博士，副教授，lqzhang@mail.hust.edu.cn.

对 MILD 燃烧研究的不断深入，其应用也逐渐从气体燃料发展到固体燃料.

IFRF（国际火焰研究基金会）最早将 MILD 燃烧概念应用到煤粉燃烧[7-8]. Mei 等[9]在 IFRF 实验的基础上，运用数值模拟的方法研究了反应物流速对煤粉 MILD 燃烧的影响，发现增加一次风流速导致峰值温度下降了 180 K，NO 的排放下降了 200×10^{-6}. Suda 等[10]在 250 kW 中试炉上进行了煤粉的 MILD 燃烧实验研究，发现当将空气温度分别预热到 623 K 和 1 073 K 时，随着预热温度的增加，点火延迟显著减少，且火焰温度峰值基本保持不变，NO 的排放量则从 $1\,000\times10^{-6}$ 降为 400×10^{-6}.

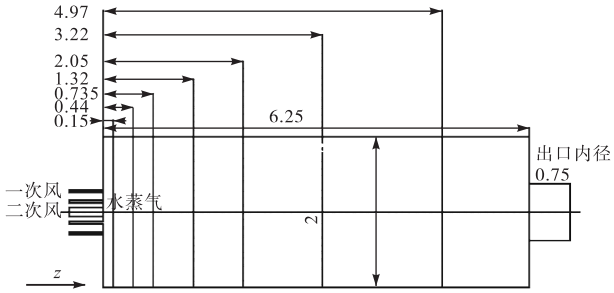
此外，已有不少学者开展了水蒸气对煤粉燃烧影响的研究. Yi 等[11]发现在富氧气氛下水蒸气会增加煤粉的着火延迟. 张振等[12]发现 O_2/H_2O 气氛下在燃烧后期水蒸气在一定程度上有利于焦炭微孔的形成，从而将影响到焦炭的反应性. Mao 等[13]模拟了水蒸气（体积分数 0 ~ 50%）对煤粉燃烧的影响，发现增加水蒸气的含量促进了焦炭的气化反应且抑制了焦炭的氧化反应，延长了其燃尽时间，从而使炉内的温度场分布更加均匀. 由于水蒸气的高比热容、强辐射能力且能与焦炭发生气化反应等特点，加入水蒸气能降低煤粉反应速率和炉内温度，而这恰好符合煤粉 MILD 燃烧的特点. 黄伟等[14]在煤粉直流燃烧器一次风附近设计高速蒸气喷射管以产生一个强回流区，强化一次风粉的加热与着火，并有效降低了炉内温度和 NO_x 的排放，Tu 等[15]运用模拟方法研究了不同水蒸气体积分数（0 ~ 70%）对煤粉富氧 MILD 燃烧的影响，发现水蒸气有助于挥发分析出提前以及 H_2 的形成，从而促进 NO 的还原，降低 NO 的排放.

水蒸气的加入有望促进煤粉 MILD 燃烧的实现. 目前有关水蒸气影响的研究报道较少，且实际燃烧器设计中水蒸气往往会以单独的蒸汽喷口射入炉膛[16-17]，考虑到一次风、二次风流速均对煤粉 MILD 燃烧有着很大的影响[9]，不同流速的水蒸气会在炉内形成不同的流场，从而也将影响整个炉膛内煤粉的燃烧. 因此，本文将从水蒸气流速的角度来研究其对煤粉 MILD 燃烧过程中流场、温度分布、焦炭反应性以及 NO 排放的影响，从而为含有水蒸气射流的直流燃烧器的设计和应用提供理论参考.

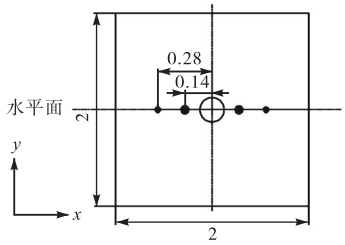
1　模拟对象与方法

1.1　几何结构及实验条件

Weber[7]设计的 IFRF 实验炉几何结构和尺寸如图 1 所示（不包含两个水蒸气喷口结构）. 炉子长为 6.25 m，横截面为 2 m × 2 m. 实验中煤粉经一次风由外侧两平行的一次风喷口输送进入炉膛. 二次风通过位于中心的二次风喷口进入炉内. 一次风喷口和二次风喷口内径分别为 0.125 m 和 0.027 3 m. 实验数据的测点分布在如图 1 中 7 个不同位置的截面处（自下而上依次为截面 1 ~ 截面 7），实验中所用煤粉的性质可参考文献[7].



（a）正视图



（b）侧视图

图 1　实验炉几何结构和尺寸示意（单位：m）

1.2　模拟方法

根据炉子结构的对称性，对 1/4 实验炉进行了建模和模拟. 运用 Gambit2.4.6 中结构化网格对炉子进行网格化分，网格总数约为 90 000，模拟计算采用 CFD 软件 Fluent13.0 进行.

为了更好地描述实验中 Guasare 煤的粒径分布，采用平均粒径为 42 μm 的 Rosin-Rammler 分布函数来描述煤粉的粒径分布，并在 10 ~ 300 μm 尺寸范围内划分为 20 个粒径等级. 湍流模型采用标准的 k-ε 模型，辐射换热采用 DO 模型，气体混合物的吸收系数为 1.5 m^{-1}，散射系数为 0.2 m^{-1}. 化学湍流的相互作用采用 EDC 模型. 煤粉的脱挥发分模型采用单速率模型. 当煤中的挥发分析出后，煤粉颗粒中的焦炭会与周围的气体发生反应，故燃烧模型采用多表面反应模型，其包含了焦炭多表面反应和容积多步燃烧反应. 具体参数设置如表 1 所示（其中 A 为指前因子，E_a 为活化能）.

为提高计算的准确性，采用 SIMPLE 算法求解压力-速度的耦合，压力采用 PRESTO！算法，动量、

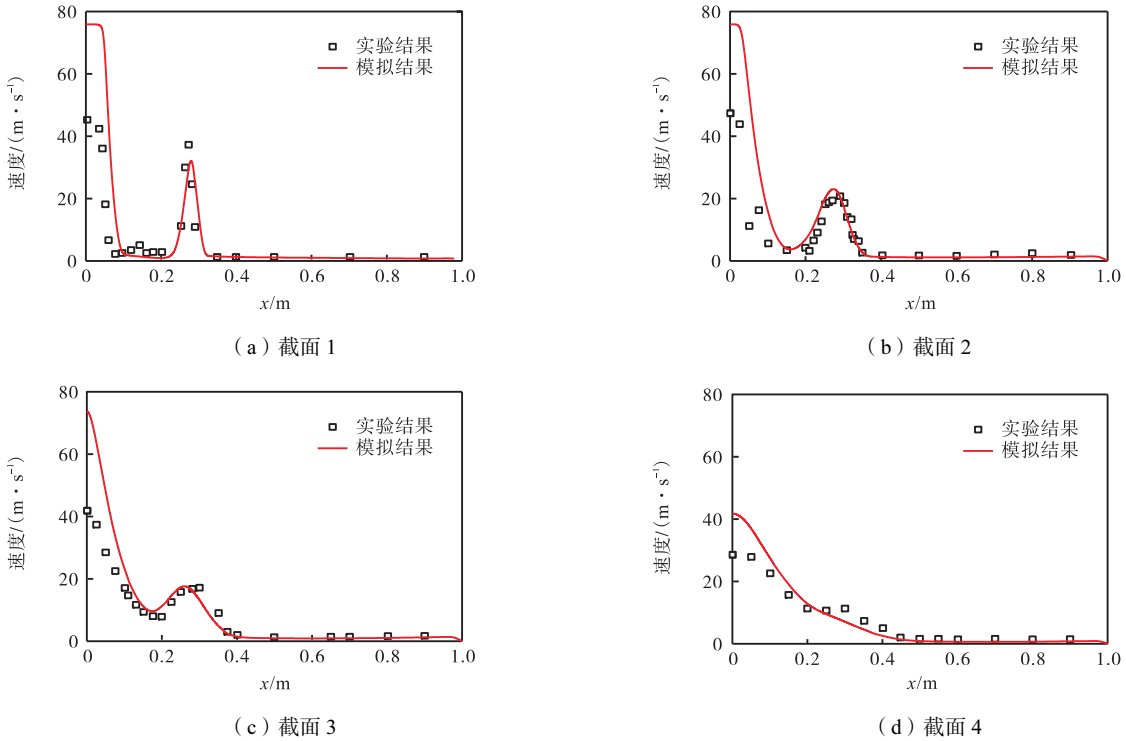
湍流动能、湍流耗散率、组分输运和能量均采用二阶迎风格式. NO 的形成途径包括燃料型 NO 和热力型 NO. 考虑到湍流及温度波动的影响，采用 β-PDF 函数，NO 形成模型的具体细节可以参考文献[18].

表 1　煤粉的燃烧机理

反应机理	反应方程式	A	E_a/(kJ · mol^{-1})
碳表面反应	$C(s) + 0.5O_2 \rightarrow CO$	5×10^{-3}	7.4×10^{7}
	$C(s) + CO_2 \rightarrow 2\,CO$	6.35×10^{-3}	1.62×10^{8}
	$C(s) + H_2O \rightarrow CO + H_2$	1.92×10^{-3}	1.47×10^{8}
容积燃烧反应	挥发分 $+ 1.471O_2 \rightarrow 1.38\,CO + 2.069\,H_2O + 0.041\,N_2$	2.119×10^{11}	2.027×10^{8}
	$CO + 0.5\,O_2 \rightarrow CO_2$	2.239×10^{12}	1.7×10^{8}
	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	2.75×10^{9}	8.4×10^{7}
	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	6.81×10^{10}	1.14×10^{8}
	$H_2 + 0.5\,O_2 \rightarrow H_2O$	3.9×10^{17}	1.7×10^{8}

1.3　模型验证

为验证本文数值模拟方法的准确性，将模拟结果与文献[7]中的实验数据进行了对比，所用煤粉的性质及一、二次风的入射条件均可参考文献[7]. 图 2 给出了 4 个不同截面实验和模拟速度的对比. 对比结果显示，整体上模拟数据和实验值的吻合度较高，仅中心线速度高于实验值. Schaffel 等[18]的结果也显示，截面 1 和截面 2 处的中心速度比实验值高出 20 m/s，Vascellari 等[19]的结果则高出 30 m/s. 有学者认为这是由于少量煤粉颗粒被二次风卷吸到中央喷嘴附近的下游区域，导致了实验中激光多普勒风速计在该地区的测量信号较差，从而造成测量不准确.



（a）截面 1　（b）截面 2　（c）截面 3　（d）截面 4

图 2　4个不同位置实验和模拟速度的对比

图 3 给出了 4 个不同位置截面实验和模拟温度的对比. 相对于 Vascellari 等[19]模拟的峰值温度超过了 2 000 K，本文模拟计算的峰值温度为 1 951 K，显然更加接近于实验值，且该模型预测和实验测量值之间整体吻合较好. 仅在截面 1 和截面 2 的一次风喷口处，模拟数据与实验值存在一定差异. Vascellari 等[19]和 Schaffel 等[18]在此处的模拟结果也都与实验值有一定差别，并解释为与模拟时出现的着火延迟有关. 前者将着火延迟归因于脱挥发分模型，并发现模拟中截面 1 的 CO 浓度几乎为 0，这充分说明模拟的确是存在着火延迟.

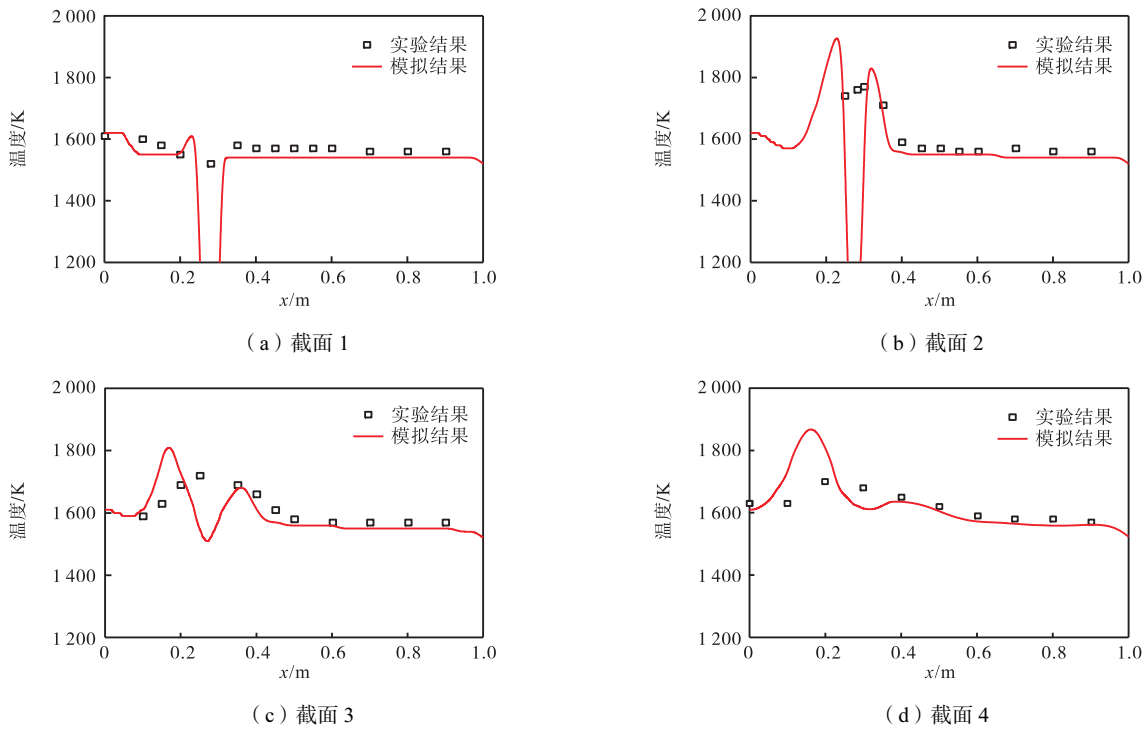


图 3　4个不同位置实验和模拟温度的对比

1.4　模拟工况

考虑到本文主要是研究水蒸气流速对煤粉 MILD 的影响，因此在 IFRF 炉子的一次风喷口和二次风喷口之间对称地布置两个水蒸气喷口. 具体几何结构如图 1 所示，水蒸气通过水蒸气喷口射入炉内，一次风携带煤粉通过一次风喷口进入炉膛，二次风通过二次风喷口进入炉膛. 一次风、二次风以及水蒸气的入射工况如表 2 所示，为消除水蒸气质量流量对模拟结果的影响，将其质量流量设定为固定值 144 kg/h. 从表中可以看出：一次风和二次风均为 O_2/N_2 气氛，且 O_2 和 N_2 的体积分数分别为 0.3 和 0.7. 如果将一次风、二次风和水蒸气三者的混合气体看作是氧化剂，O_2、N_2、H_2O 的体积分数就分别为 0.21、0.49、0.30.

模拟过程中，煤粉的性质、煤粉的质量流量以及化学当量比均与 IFRF 的实验条件一致，并在保证水蒸气质量流量不变的情况下，通过将水蒸气管径由 60 mm 逐渐减少至 20 mm 使水蒸气的流速从 14 m/s 增加到 123 m/s，具体条件如表 3 所示.

表 2　一次风、二次风以及水蒸气的入射工况

入射工况	$\varphi(O_2)$	$\varphi(N_2)$	$\varphi(H_2O)$	质量流量/(kg · h^{-1})	速度/(m · s^{-1})	初始温度/K
一次风	0.3	0.7	0	92	19	313
二次风	0.3	0.7	0	450	46	1 623
水蒸气	0	0	1	144		423

表 3　不同内径水蒸气喷口的工况

工况编号	水蒸气喷口管径 D_{wat}/mm	水蒸气流速 V_{wat}/(m · s^{-1})
1	20	123
2	25	79
3	30	55
4	40	31
5	60	14

2　结果与讨论

2.1　流场和内部循环率

水蒸气入射流速的不同将会导致炉内的流动状况有所差异，为了描述水蒸气流速对炉内流场的影响，图 4 给出了工况 1 ~ 5 的 x-z 平面的速度分布云图. 从图中可以看出，随着水蒸气流速增加，一、二次风的混合点提前.

一、二次风的混合点提前将会对整个炉内煤粉的燃烧产生影响. 一方面，一次风和二次风早的混合反应，削弱了各自在炉内的稀释作用，不利于在炉内形成容积燃烧；但另一面，水蒸气流速的提高将增强内部烟气的卷吸作用，有利于炉内各组分的相互掺混并易于形成容积燃烧. Wünning 等[20]用烟气内部循环率 K_v 来定量分析烟气内部循环对 MILD 燃烧的影

响，K_v 值越大越有利于 MILD 燃烧，并将其定义为

$$K_v = \frac{m_e}{m_a + m_f + m_{wat}} = \frac{m_{up} - m_a - m_f - m_{wat}}{m_a + m_f + m_{wat}}$$

式中：m_e 表示被卷吸烟气的质量流量；m_a 表示空气的质量流量；m_f 表示燃料的质量流量；m_{wat} 表示水蒸气的质量流量；m_{up} 表示具有向上分速度的燃烧产物的质量流量.

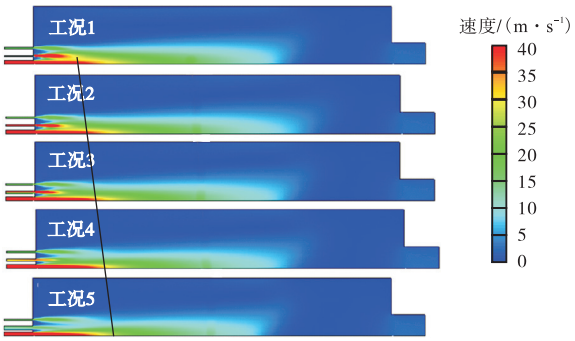


图 4　工况 1～5 的 *x*-*z* 平面的速度分布云图

图 5 给出了工况 1～5 在截面 1～6 处的 K_v 值. 从图中可以看出：K_v 随着 V_{wat} 的增加而近似于线性增长，说明随着 V_{wat} 的提高，内部烟气循环作用增强，烟气对炉内各组分的稀释程度加大. 且当 V_{wat} 不变时，随着轴向距离 z 的增加，K_v 也会逐渐增加. 说明在 $z<3.22$ m 时，烟气的内部卷吸起作用，沿着轴向距离逐渐增强.

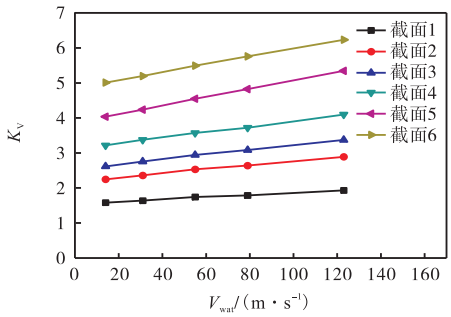


图 5　工况 1～5 在截面 1～6 处的 K_v 值

2.2　温度分布

为描述水蒸气流速对炉内温度场的影响，图 6 给出了工况 1～5 的 *x*-*z* 平面的温度分布云图，可以看出，炉内存在两个高温区，分别称为一次高温区和二次高温区（主燃区）. 一次高温区位于一次风喷口附近，二次高温区位于一次风和二次风之间，且后者的面积明显大于前者. 这主要是由于一次风中的氧气量远不足以燃尽所携带的煤粉，因此在一次风与二次风之间，未燃尽的煤粉将会与二次风掺混并继续发生反应. 从图中还可以看出，增加水蒸气的速度，主燃区的温度峰值前移，说明煤粉着火提前，这与此时一、二次风混合点提前的趋势是保持一致的. 在二次高温区（主燃区），不同水蒸气流速下的火焰形状相类似，但火焰尺寸随着流速的增加而逐渐增大，这是由于强烈的烟气循环将煤粉稀释到更大的区域燃烧所造成的.

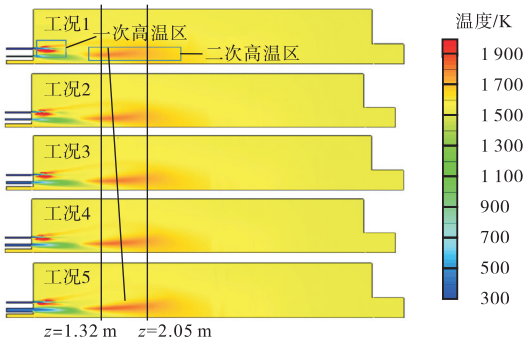
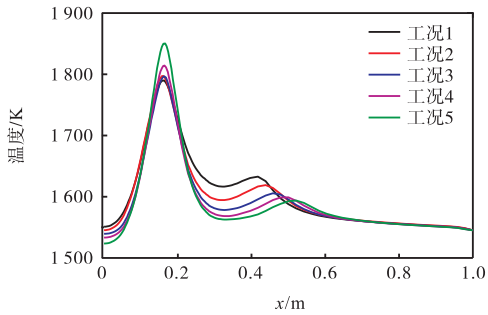
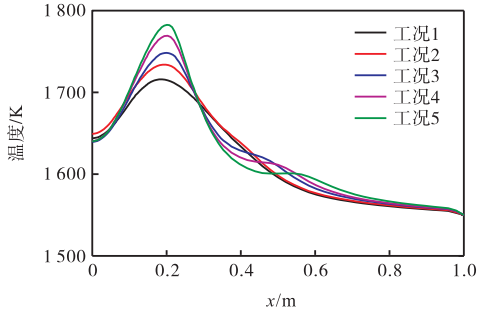


图 6　工况 1～5 的 *x*-*z* 平面的温度分布云图

为了进一步了解上述各工况的温度分布，在 *x*-*z* 平面上分别截取处于主燃区位置 $z = 1.32$ m（图 7(a)）和 $z = 2.05$ m（图 7(b)）的径向温度分布并进行了比较. 从图 7(a) 可以看出：温度出现了明显的波峰和波谷，且随着水蒸气流速的增加，峰值温度下降，谷值温度上升，说明此时径向温度变化的幅度较小；从图 7(b) 可以看出：随着水蒸气流速的增加，峰值温度大幅下降. 总之，水蒸气流速的增加会使峰值温度降低且使炉内温度分布更均匀.



（a）截面 4



（b）截面 5

图 7　工况 1～5 的径向温度分布

2.3　焦炭反应性

图 8 给出 3 个碳表面反应对应的碳消耗率. 从图中可以看出，当水蒸气流速从 14 m/s 提高到 123 m/s 时，$C + O_2 \rightarrow CO$ 反应比例上升了 11.92%，$C + CO_2 \rightarrow CO$ 反应比例下降了4.1%，$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ 反应比例则下降了 7.82%. 说明增加水蒸气流速促进了碳的氧化放热的同时也抑制了碳的气化吸热. 但从图中可知，此时的峰值温度却下降了 57 K，这是由于提高水蒸气流速虽然一方面促进了碳的氧化放热，但另一方面也增强了烟气的内部湍流混合，有利于降低峰值温度及形成均匀的温度分布；而此时烟气内部循环作用占主导地位，相比于碳的氧化放热，稀释混合对峰值温度的影响更大.

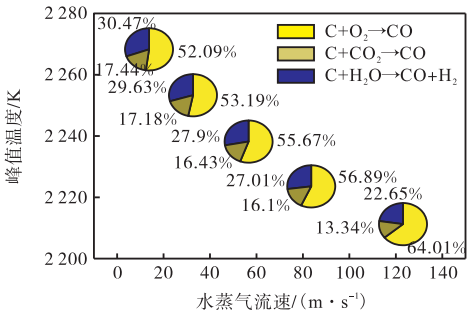


图 8　3个碳表面反应对应的碳消耗率

2.4　NO排放特性

图 9 给出了工况 1～5 在炉膛尾部 NO 的排放量. 在模拟计算炉膛尾部 NO 的生成量时，本文考虑了燃料型 NO 和热力型 NO. 从图中可以看出，随着水蒸气流速的增加，燃料型 NO 的排放由 140×10^{-6} 增加至 167×10^{-6}，热力型 NO 排放由 87×10^{-6} 下降至 37×10^{-6}，且最终的 NO 排放由 227×10^{-6} 下降至 204×10^{-6}. 这是由于：一方面，水蒸气流速的增加降低了火焰的峰值温度，从而大幅抑制了热力型 NO 的生成；另一方面，增加水蒸气流速促进了碳的氧化反应、抑制了碳的气化反应，并降低 $C + CO_2 \rightarrow CO$ 和 $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ 两个反应的比例，从而减少了还原性气体 H_2 和 CO 的生成，从而使燃料型 NO 的生成量增加. 但由于此时热力型 NO 的抑制作用占主导地位，故最终的 NO 排放量仍是减少的.

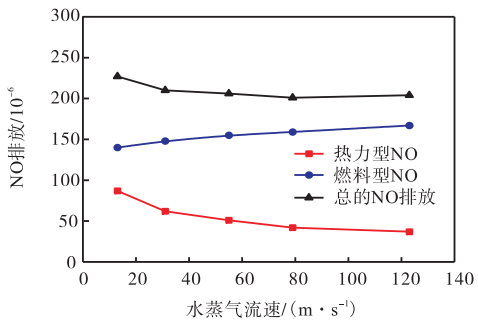


图 9　工况 1～5在炉膛尾部 NO的排放量

3　结　论

(1) 随着水蒸气流速的增加，一次风与二次风混合点提前，烟气内部循环率近似呈线性增加，烟气的卷吸作用增强. 此时主燃区温度峰值前移，煤粉着火提前，火焰尺寸增大且炉内温度分布更均匀.

(2) 当将水蒸气流速从 14 m/s 提高到 123 m/s 时，碳的氧化反应比例大幅上升了 11.92%，气化反应比例则相应地减少，但由于此时烟气内部循环的稀释作用起主要作用，故其峰值温度呈下降趋势，且降幅为 57 K.

(3) 燃料型 NO 随水蒸气流速增大而增加，而热力型 NO 则相反，但由于此时热力型 NO 的抑制作用更明显，因此，总的 NO 排放量随水蒸气流速增大而减少. 结果表明，当水蒸气流速从 14 m/s 增加到 123 m/s 时，最终的 NO 排放由 227×10^{-6} 下降至 204×10^{-6}.

参考文献：

[1] Cavaliere A, De Joannon M. Mild combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(4): 329-366.

[2] De Joannon M, Langella G, Beretta F, et al. Mild combustion, process features and technological constrains[J]. *Combustion Science and Technology*, 2000, 153(1): 33-50.

[3] Kiga T, Yoshikawa K, Sakai M, et al. Characteristics of pulverized coal combustion in high-temperature preheated air[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(4): 601-605.

[4] 刘　洋，邹　春，蔡　磊，等. 常温空气 MILD 燃烧过程中 CO 形成特性[J]. 燃烧科学与技术，2016，22(3)：218-223.
Liu Yang, Zou Chun, Cai Lei, et al. CO formation mechanism in methane MILD combustion without preheated air[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(3): 218-223(in Chinese).

[5] 李鹏飞，米建春，Dally B B，等. MILD 燃烧的最新进展和发展趋势[J]. 中国科学：技术科学，2011，41(2)：135-149.
Li Pengfei, Mi Jianchun, Dally B B, et al. The latest developments and trends of MILD combustion [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2011, 41(2);

135-149（in Chinese）.

［6］ Tsuji H，Gupta A K，Hasegawa T，et al. *High Temperature Air Combustion*：*From Energy Conservation to Pollution Reduction*［M］. Florida：CRC Press，2002.

［7］ Weber R. Combustion of natural gas，oil and coal with air preheated to temperatures in excess of 1 000 ℃［C］//17 th *International Symposium on Combustion Processes*. Poznan University of Technology，Poznan，Poland，2001：24-27.

［8］ Weber R，Smart J P，Kamp W V. On the（MILD）combustion of gaseous，liquid，and solid fuels in high temperature preheated air［J］. *Proceedings of the Combustion Institute*，2005，30（2）：2623-2629.

［9］ Mei Z，Li P，Wang F，et al. Influences of reactant injection velocities on moderate or intense low-oxygen dilution coal combustion［J］. *Energy & Fuels*，2013，28（1）：369-384.

［10］ Suda T，Takafuji M，Hirata T，et al. A study of combustion behavior of pulverized coal in high-temperature air［J］. *Proceedings of the Combustion Institute*，2002，29（1）：503-509.

［11］ Yi B，Zhang L，Huang F，et al. Effect of H_2O on the combustion characteristics of pulverized coal in O_2 /CO_2 atmosphere［J］. *Applied Energy*，2014，132（11）：349-357.

［12］ 张 振，王 涛，冯 太，等. 水蒸气及氧气复合气氛对活性半焦孔隙结构演化的影响［J］. 燃烧科学与技术，2015，21（4）：318-323.
Zhang Zhen，Wang Tao，Feng Tai，et al. Influence of steam and oxygen on porestructure evolution of active semi-char［J］. *Journal of Combustion Science and Technology*，2015，21（4）：318-323（in Chinese）.

［13］ Mao Z，Zhang L，Zhu X，et al. Modeling of an oxy-coal flame under a steam-rich atmosphere［J］. *Applied Energy*，2016，161：112-123.

［14］ 黄 伟，熊蔚立. 大速差射流型双通道自稳式煤粉燃烧器的高效低 NO_x 燃烧特性分析［J］. 锅炉制造，2001（1）：12-16.
Huang Wei，Xiong Weili. Analyses on high efficiency low NO_x property of high velocity two-pass spontaneous stabilized jet PC burner［J］. *Boiler Manufacturing*，2001（1）：12-16（in Chinese）.

［15］ Tu Y，Liu H，Su K，et al. Numerical study of H_2O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion［J］. *Fuel Processing Technology*，2015，138：252-262.

［16］ 操时英，邹 春，宋 昱，等. 一种过热蒸汽煤粉燃烧装置：中国，CN103047672A［P］. 2013.
Cao Shiying，Zou Chun，Song Yu. A Kind of Super-Heated Steam Pulverized Coal Combustion Device：China，CN103047672A［P］. 2013（in Chinese）.

［17］ 张立麒，祝鑫阳，毛志慧，等. 一种煤粉低 NO_x 富氧燃烧装置：中国，CN104896501A［P］. 2015.
Zhang Liqi，Zhu Xinyang，Mao Zhihui，et al. A Kind of Pulverized Coal Low NO_x Oxy-Fuel Combustion Device：China，CN104896501A［P］. 2015（in Chinese）.

［18］ Schaffel N，Mancini M，Szle A，et al. Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal［J］. *Combustion and Flame*，2009，156（9）：1771-1784.

［19］ Vascellari M，Cau G. Influence of turbulence-chemical interaction on CFD pulverized coal MILD combustion modeling［J］. *Fuel*，2011，101：90-101.

［20］ Wünning J A，Wünning J G. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation［J］. *Progress in Energy and Combustion Science*，1997，23（1）：81-94.