

# 1 025 t/h四角切圆煤粉炉内空气过量系数对NO生成的影响

张俊霞, 郭雷雷, 宁少帅, 雷 彻  
(榆林学院能源工程学院, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 文章采用计算流体力学软件Fluent数值模拟了1 025 t/h四角切圆煤粉炉内的湍流扩散燃烧, 分析了空气过量系数对炉内烟气速度、烟气温度和氮氧化物组分的影响。结果表明: 空气过量系数会对炉内流场的空气动力学特性和温度场分布均匀性产生显著影响。煤粉炉膛最佳空气过量系数为1.07, 此时炉内温度场、速度场和浓度场的分布可使燃烧中间产物HCN和NH<sub>3</sub>较好的将燃料型NO还原为N<sub>2</sub>, 来充分发挥空气分级燃烧降低NO排放的功效。

**关键词:** 燃烧学; 数值模拟; 四角切圆煤粉炉; 空气过量系数

中图分类号: X701.7

文献标志码: A

DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2017.02.015

## Impact of Air Excess Coefficients on NO Generation in 1 025 t/h Tangentially-fired Boilers

Zhang Junxia, Guo Leilei, Ning Shaoshuai, Lei Che

(School of Energy Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China)

**Abstract:** In this paper, Fluent software was applied to simulate a turbulent diffusion flame in a 1 025 t/h tangentially-fired boiler. Combustion characteristics were analyzed at various air excess coefficients, including gas velocity, gas temperature and nitrogen oxide composition. The results showed that the air excess coefficients significantly affected the air dynamic characteristics of the flow field and the distribution uniformity of the temperature field in the furnace. The optimum air excess coefficient was 1.07, at which there were fit temperature, velocity and concentration fields in the boiler which was helpful for the intermediate products HCN and NH<sub>3</sub> to reduce NO into N<sub>2</sub> during the generation of NO, indicating that the efficiency of NO emission reduction was achieved by means of air-staged combustion at air excess coefficients of 1.07.

**Keywords:** Combustion; Numerical Simulation; Tangentially-fired Boiler; Air Excess Coefficient

CLC number: X701.7

燃烧在冶金和电力领域有着广泛应用, 近年来新颖的燃烧技术<sup>[1-3]</sup>不断涌现, 特别是如何实现高效、低污染地燃烧是众多学者研究的重点<sup>[4-7]</sup>。鉴于四角切圆煤粉炉具有炉内烟温分布均匀和空气动力学特性良好的优点, 该种炉型较多应用于电站锅炉和供暖锅炉。四角切圆煤粉炉内的燃烧过程属于复杂湍流流动和燃烧化学反应相互耦合的过程, 再加之实际运行中炉内速度场、温度场和浓度场的测量存在耗时长和工作量大的缺点, 使得现有针对该种炉型内部燃烧过程的研究多采用实验观测和数值模拟相结合的方法。

在燃烧过程中, 空气过量系数对炉膛内部温度分布会有重要影响。在丙烷/氧气预混燃烧实验中, 火焰脉动会增大流场的湍流脉动<sup>[4]</sup>。在MILD燃烧中, 当一次风与二次风平行或背离入射时, 提高一次风风速会使炉内峰值温度下降。然而, 当一次风朝向二次风入射时, 提高一次风速会使炉内温度峰值先下降后升高<sup>[5]</sup>。在旋流燃烧中, 二次风配风存在最佳直流风速, 可产生较大回流区, 延长煤粉颗粒在炉内的停留时间, 有利于形成强还原气氛, 使NO降到最低<sup>[6]</sup>。李德波等<sup>[7]</sup>数值分析了不同风速下220 t/h四角切圆煤粉

收稿日期: 2016-11-09

基金项目: 陕西省科技厅工业攻关项目(2015GY099)基金资助

作者简介: 张俊霞(1974-), 女, 博士、副教授。研究方向: 燃烧数值模拟。

炉内的燃烧特性,发现随着燃烧器喷口处射流速度的提高,炉膛内形成的切圆半径并没改变,圆心仍在炉膛中心。随空气过量系数增大,炉膛内和炉膛出口处平均温度均下降,空气总量增加会降低烟气温度的。

文章采用Fluent软件数值模拟1 025 t/h四角切圆煤粉炉内的湍流扩散火焰,分析空气过量系数对炉内燃烧参数和NO生成的影响。

## 1 1 025t/h四角切圆燃煤锅炉燃烧数值模拟

### 1.1 锅炉几何参数及模拟方案

锅炉炉膛纵截面示意,见图1。

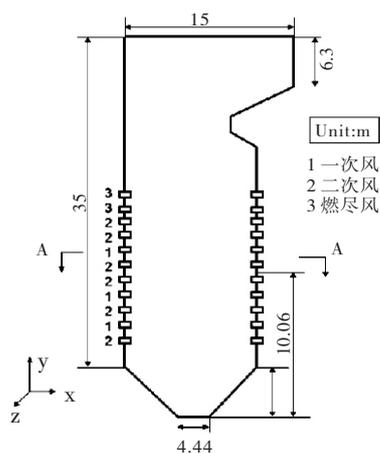


图1 锅炉炉膛纵截面

锅炉高度为35 m,宽度为11.05 m,长度为10.54 m,炉膛出口高度为6.3 m。锅炉燃烧器煤粉喷口自下而上分两组布置,第一组燃烧器从下往上分别为二次风、一次风、二次风、一次风、二次风,共五层燃烧器;第二组燃烧器从下部10.06 m处开始布置,往上依次为二次风、一次风、二次风、二次风、三次风、三次风,共六层燃烧器。一次风和三次风喷口的高:宽=0.49:0.48 m,二次风喷口的高:宽=0.27:0.48 m。一次风中煤粉的体积比为80%,二次风和三次风为空气。此外,安装在顶部的2个三次风烧嘴,被用作燃尽风。一二次风占到约70%的总风,燃尽风占到约30%的总风。

### 1.2 数值模拟方案

文章采用大型流体力学软件Fluent对1 025 t/h四角切圆煤粉炉进行数值模拟,燃烧器射流速度参数,见表1。

表1 燃烧器射流速度参数

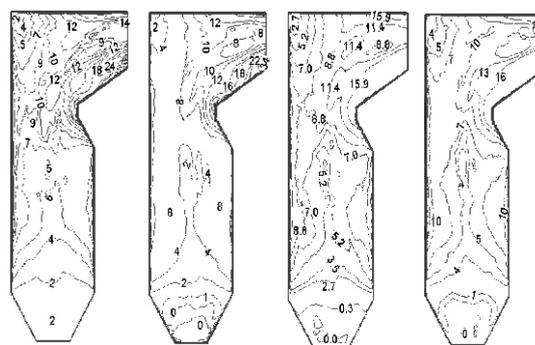
空气过量系数 $\alpha$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	一次风	二次风	三次风
1.07	19.2	31.2	36.6
1.17	21	34.1	40
1.25	22.4	36.4	42.7
1.36	24.3	39.6	46.4

模拟中使用了神木煤,该种煤的挥发分为22.7%,固定炭为64.4%,水分为1.5%,灰分为11.4%。首先采用Gambit前处理软件对图1的煤粉锅炉进行网格划分,网格类型采用T-Grid,Spacing项选择Interval size,并填入0.25。模拟过程流场求解计算采用速度-压力耦合的SIMPLE算法,求解器选择基于压力的分离求解器。湍流流动采用Realizable k-湍流双方程模型,辐射传热采用P1辐射模型,煤粉粒子的输运采用离散相模型,气相湍流扩散采用EDC模型,煤粉燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型。11层烧嘴分别给定速度入口的边界条件,炉膛出口被设置为压力出口的边界条件,炉膛底部设置为绝热壁面。一次风和三次风温设定为350 K,二次风温设定为570 K。

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 炉内速度场分布

Z=6 m截面上炉膛的烟气速度分布,见图2。随着空气过量系数增加,炉膛上方烟气流速增加。



(a)  $\alpha=1.07$  (b)  $\alpha=1.17$  (c)  $\alpha=1.25$  (d)  $\alpha=1.36$

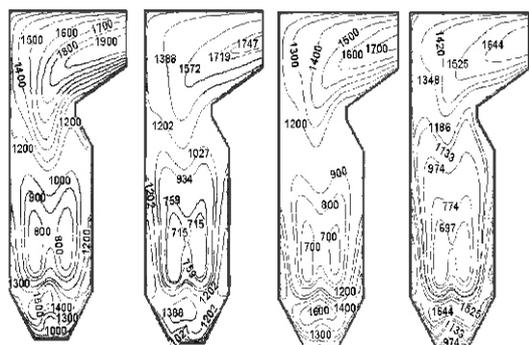
图2 Z=6 m截面上炉膛的烟气速度分布 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

由图2可见,烟气在炉膛折焰角下方燃烧器区域附近的炉膛中心速度较高,而在贴近壁面处,烟气速度相对较低,这将有利于沿着炉膛高

度方向形成富氧区和富燃区。显然，在燃烧器区域，烟气速度相对较低，有利于实现富燃料燃烧；而在炉膛上方的折焰角附近，烟气速度相对较高，有利于实现富氧贫燃燃烧。由此，实现了四角切圆煤粉炉内轴向空气分级燃烧。其次，在折焰角处，气流在此回转，形成旋转场，有利于延长煤粉在炉膛中的停留时间，使煤粉燃烧更加充分。此外，随着空气过量系数增大，炉膛出口的烟气速度增大，炉膛内部主燃区的烟气流速也增加，炉膛上方烟气速度也升高，这不利于煤粉在炉内的充分燃烧。

### 2.2 炉内温度场分布

Z=6 m处炉膛截面温度分布，见图3。



(a)a=1.07 (b)a=1.17 (c) a=1.25 (d) a=1.36

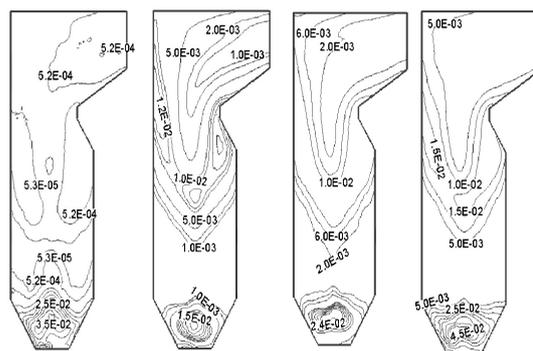
图3 Z=6 m炉膛截面的温度分布(K)

主燃区在折焰角附近；沿炉膛高度方向温度逐渐升高。当空气过量系数为1.07时，炉膛主燃区温度最高，这表明煤粉在此区域可以较好的燃烧；在炉膛出口处，未燃尽的煤粉颗粒在二次风和三次风的作用下再次燃烧，引起炉膛出口温度升高，形成较好的空气分级燃烧效果。当空气过量系数大于1.07时，由于烟气流速的升高，较多低温空气流入炉内，煤粉在主燃区的燃烧逐渐减弱，相应主燃区的温度稍有下降，部分未燃尽的煤粉在折焰角附近继续燃烧，进一步提高了炉内温度。然而随着过量空气系数的增加，炉内和炉膛出口的烟气温度稍有降低。

### 2.3 NO质量分数分布

Z=6 m处的炉膛截面NO质量分数分布，见图4。与空气过量系数大于1.07的几组图相比，空气过量系数为1.07时的炉膛内部和炉膛出口的NO质量分数均较低。这可能是因为较高的空气

过量系数将较多的煤粉吹入炉膛上方空间中，提高了主燃烧区位置处的空气量，减弱了主燃烧区的富燃料水平，促进了燃料型NO的生成。而较多煤粉集中在炉膛上方的高温区，又促进了热力型NO的生成，从而引起炉内NO总量的增加。此外，燃料型NO在煤粉炉燃烧中大约占到全部NO生成的75%~95%。因此，随着空气过量系数的增大，燃料型NO的质量分数升高，从而引起炉内NO质量分数升高。尽管空气过量系数为1.07的炉内温度和炉膛出口温度均较高，会引起热力型NO的升高。然而，由于热力型NO仅占到全部NO生成量的5%~25%的份额，从而并未引起空气过量系数为1.07时炉内NO总质量分数升高。



(a)a=1.07 (b)a=1.17 (c) a=1.25 (d) a=1.36

图4 Z=6 m炉膛截面的NO质量分数分布

炉膛出口NO质量分数随空气过量系数的变化，见图5。

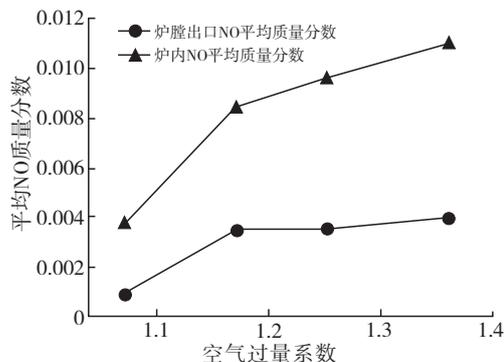


图5 炉膛出口NO质量分数随空气过量系数的变化

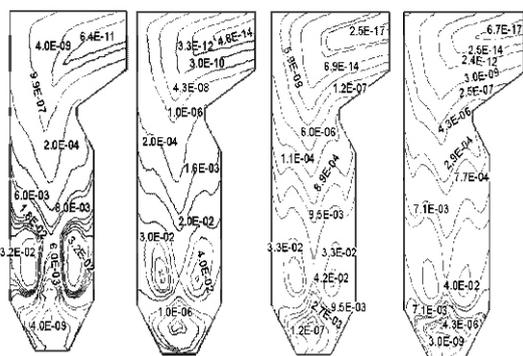
显然，在空气过量系数为1.07时，炉膛出口的NO质量分数较低。随着空气过量系数的增加，炉膛出口NO质量分数逐渐升高，相应炉膛内部平均NO质量分数也显著升高。

### 2.4 HCN和NH<sub>3</sub>质量分数分布

当煤粉燃烧时，煤中的氮首先分解为HCN、

$\text{NH}_3$ 和 $\text{CN}$ 等中间产物,随着挥发分氮释放出来,最终被氧化成 $\text{NO}$ ,焦炭氮残留在半焦中。因此,燃料型 $\text{NO}$ 主要来自挥发分氮。而焦炭的还原作用以及催化作用往往会促使焦炭氮生成的 $\text{NO}$ 被还原为 $\text{N}_2$ 。挥发分氮中最主要的氮化合物就是 $\text{HCN}$ 和 $\text{NH}_3$ 。

$Z=6\text{ m}$ 处炉膛截面 $\text{HCN}$ 质量分数分布,见图6。



(a) $a=1.07$  (b) $a=1.17$  (c) $a=1.25$  (d) $a=1.36$

图6  $Z=6\text{ m}$ 炉膛截面 $\text{HCN}$ 质量分数分布

图6可见,在4种空气过量系数下,炉内主燃烧区处 $\text{HCN}$ 的质量分数几乎一致,而炉膛上方的 $\text{HCN}$ 质量分数随空气过量系数的增加而下降。由于 $\text{HCN}$ 遇到 $\text{O}_2$ 会转化为 $\text{NO}$ ,化学方程式如下:



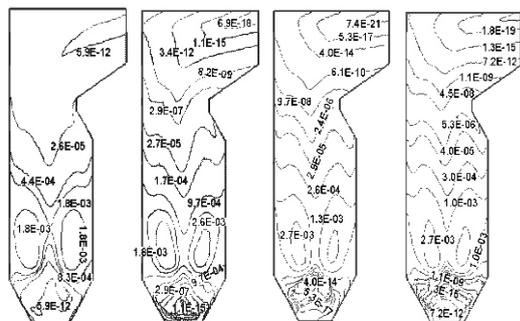
因此,在空气过量系数为1.17~1.36变化时, $\text{HCN}$ 与过量 $\text{O}_2$ 在炉膛上方发生上述反应(1)生成燃料型 $\text{NO}$ 。

此外,较多的 $\text{HCN}$ 还会促进 $\text{NO}$ 还原为 $\text{N}_2$ ,反应方程式如下:



因此,空气过量系数为1.07时炉膛上方有较多的 $\text{HCN}$ ,有助于将 $\text{NO}$ 还原为 $\text{N}_2$ ,降低燃料型 $\text{NO}$ 的生成。

$Z=6\text{ m}$ 处炉膛内部 $\text{NH}_3$ 的质量分数分布,见图7。



(a) $a=1.07$  (b) $a=1.17$  (c) $a=1.25$  (d) $a=1.36$

图7  $Z=6\text{ m}$ 炉膛截面的 $\text{NH}_3$ 质量分数分布

在4种空气过量系数下,炉内主燃烧区位置处的 $\text{NH}_3$ 质量分数变化很小。然而,在炉内主燃烧区上方,随着空气过量系数增大,炉内 $\text{NH}_3$ 质量分数逐渐降低。由于 $\text{NH}_3$ 有显著的脱硝作用,因此,空气过量系数为1.07时的炉内拥有的较高 $\text{NH}_3$ 将有助于 $\text{NO}$ 还原为 $\text{N}_2$ ,也是降低燃料型 $\text{NO}$ 的主要原因之一。

### 3 结论

文章数值模拟了1 025 t/h四角切圆煤粉炉的燃烧过程,计算了不同空气过量系数时的速度场、温度场和浓度场分布,分析了空气过量系数对炉内流场、温度场和浓度场分布的影响规律,结论如下。

(1) 随着空气过量系数增大,炉膛出口、炉膛上方和炉膛内部主燃区的烟气流速增加,这将不利于煤粉在炉内的充分燃烧。

(2) 随着空气过量系数的增加,炉内和炉膛出口的烟气温度稍有降低。

(3) 随着空气过量系数的增大,燃料型 $\text{NO}$ 的质量分数升高,炉内和炉膛出口的 $\text{NO}$ 平均质量分数升高。

(4) 在4种空气过量系数下,炉内主燃烧区处 $\text{HCN}$ 和 $\text{NH}_3$ 的质量分数几乎一致,而炉膛上方的 $\text{HCN}$ 和 $\text{NH}_3$ 质量分数下降。

综合速度场、温度场和浓度场的分布结果,发现空气过量系数为1.07时可降低炉内温度水平,使燃料型 $\text{NO}$ 的中间产物 $\text{HCN}$ 和 $\text{NH}_3$ 较好的还原为 $\text{N}_2$ ,充分发挥空气分级燃烧降低 $\text{NO}$ 排放的功效。

### 参考文献

- [1]赵义琴,温治.脉冲蓄热式燃烧技术在台车退火炉上的应用[J].冶金能源,2014,33(4):35-39.
- [2]何森棋,牟乃剑,宋新义,等.三元燃烧技术在烧结点火炉上的应用[J].冶金能源,2015,34(3):36-38.
- [3]曲超,李丽丽,黄显保. $\text{O}_2/\text{CO}_2$ 燃煤锅炉燃烧过程的数值模拟[J].冶金能源,2015,34(1):28-32.
- [4]龚志军,武文斐,李保卫.预混燃烧对湍流影响的实验研究[J].冶金能源,2013,32(2):21-24.
- [5]梅振锋,王飞,张健鹏,等.一次风速对高温预热空气下的煤粉MILD燃烧的影响[J].工程热物理学报,2014,35(4):782-786.
- [6]周志军,周丛丛,邵杰,等.旋流燃烧器中二次直流风速对 $\text{NO}$ 生成的影响[J].热力发电,2010,39(3):23-29.
- [7]李德波,徐齐胜,沈跃良,等.变风速下四角切圆锅炉燃烧特性的数值模拟[J].动力工程学报,2013,33(3):172-177.