文章编号:1007－6735(2016)02－0120－06 DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2016.02.004

气体再燃区冷态流场特性的数值模拟

陈宝明[1]， 李巍巍[2]， 张忠孝[1]， 毕德贵[1]， 李明强[1]
(1.上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093;2.通辽热电有限责任公司,通辽 028200)

摘要：以某气体再燃技术改造后的220 t/h锅炉为物理模型,采用标准$k-\varepsilon$双方程湍流数学模型对炉内冷态流场进行模拟计算,并用冷态试验结果对数学模型进行验证.结果表明:实测值与模拟计算值误差为5%～10%,该模型能较好地模拟实际流场工况;增加再燃喷口后,旋流区沿炉高方向拉长,提高了炉内火焰充满度;再燃喷口八点布置方式比四角布置方式的假想切圆直径大66%,且在喷口背火侧形成回流区,明显提高了再燃气流对上升气流的覆盖度;再燃量为5%时,再燃气流无法与炉内上升气流混合,最佳再燃量为15%;再燃区高度距离为3 600 mm较为合理,增大再燃区距离对流场分布影响不大.

关键词：气体再燃；冷态流场；数值模拟
中图分类号：TK 229 **文献标志码**：A

Numerical Simulation on Cold Flow Field Characteristics in Gas Reburning Zone

CHEN Baoming[1], LI Weiwei[2], ZHANG Zhongxiao[1], BI Degui[1], LI Mingqiang[1]
(1. *School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*; 2. *Tongliao Thermal Power Co., Ltd., Tongliao 028200, China*)

Abstract: The boiler which uses the gas reburning technology was taken as a physical model to simulate the cold flow field characteristics in the furnace. A standard k-ε two-equation turbulent model was introduced, and the mathematical model was verified by the cold state test results. The results show that the deviation between the cold test results and the simulation value is about 5%～10%. So, the model can well simulate the actual boiler flow field conditions. The cyclone zone will stretch along the direction of furnace height after increasing the reburning spout, which is conducive to lengthen the furnace flame fullness. The diameter of the imaginary inscribed circle of the eight layout reburning jet is 66% larger than that of the corners arrangement. Moreover, by the former layout, a recirculation zone is formed in the fire back side of the vents, and the reburning airflow improves the coverage of the updraft. When the reburning amount is 5%, the reburning airflow can't be mixed with the furnace updraft fully. The best reburning amount is 15%, and the height of the reburning zone of about 3 600 mm is a reasonable design. Increasing the distance of the reburning zone has little effect on the flow distribution.

Keywords: *gas reburning*; *cold flow field*; *numerical simulation*

收稿日期：2015－03－27
第一作者：陈宝明(1978－),男,硕士.研究方向:清洁燃烧技术.E-mail:chenbm@wisebond.net
通信作者：张忠孝(1959－),男,教授.研究方向:清洁燃烧技术.E-mail:zhzhx222@163.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气体再燃是目前电站锅炉降低 NO_x 排放的有效燃烧技术之一，其脱硝效率可达 65% 以上[1]，因其低成本、高效等优点日益受到重视，一些研究成果在国内外燃煤电站锅炉上得到了成功应用[2-4]. 再燃气体与炉内烟气的混合状况是影响气体再燃技术脱氮效率的重要因素之一[5]，再燃气体与上升烟气的化学反应速度与气流湍动引起火焰锋面上的火焰传递有关[6]. 冷态试验和数值模拟是研究炉内再燃流动混合特性的重要方法，通过分析再燃气体速度、再燃喷口位置及布置方式等因素对流场特性的影响是优化气体再燃技术的主要途径. 刘汉周等[7]首次采用不等温射流试验方法，得出了再燃截面上的速度和天然气浓度分布，分析了流量、喷口布置方式、喷口在炉膛上的安装高度之间的最佳配置方式. 冯琰磊[8]将一、二次风喷口简化为单个喷口，用无量纲组分方差的平方根评价了炉内的混合状况. 朱明等[6]通过搭建试验台，分析了再燃气流速度等对气体再燃喷口射流特性及与上升烟气混合情况的影响，得出了最佳的喷射速度和喷射角度. 王伟平等[9]通过冷态模拟计算分析气体再燃流场特性，分析了不同影响因素下（喷口数目、再燃风速等）再燃气流对上升烟气的覆盖度.

本文在一台 220 t/h 锅炉上进行冷态试验，采用 Fluent 软件对全尺寸锅炉炉内流场特性进行三维冷态模拟，分析了不同再燃喷口布置方式、气流速度、停留时间等因素对流场特性的影响，为实际锅炉运行时提高再燃脱氮效率提供了理论依据.

1　物理模型

模拟锅炉型号为 HG－220/9.8－YM10，单炉膛，倒 U 型布置，室内布置固态排渣，钢球磨、中储式热风送粉，四角切圆燃烧方式，炉膛部分采用正方形布置，宽度和深度均为7 570 mm，高为26 890 mm. 改造后，每只燃烧器由 7 组喷口组成，燃烧器布置如图 1(a)所示. 假想切圆直径为 700 mm，顺时针旋转. 每一风室风量均配有单独风门挡板控制. 主燃区的长度约为 2 700 mm，主燃区上部 450 mm 处布置再燃燃烧器.

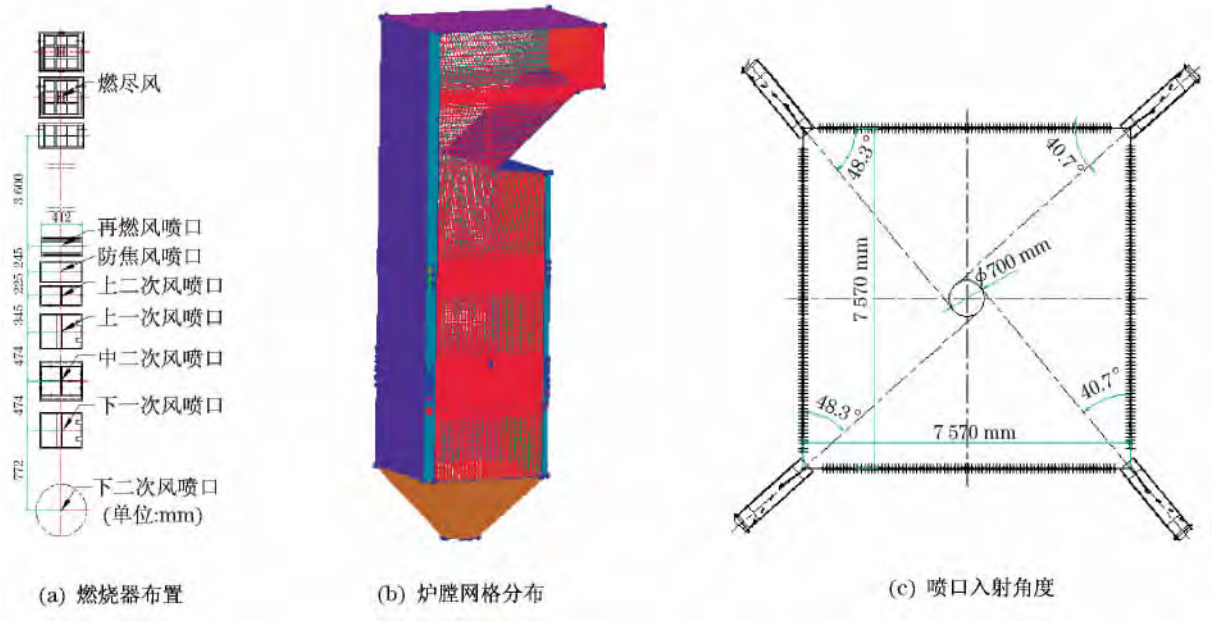
物理模型为全尺寸炉膛，其网格划分如图 1(b)所示，喷口入射角度如图 1(c)所示.

依据冷态模化原理，对各喷口设计风速进行冷态模化计算，各喷口当量直径如表 1 所示.

表 1　冷态模拟喷口水力当量直径

Tab. 1　Hydraulic equivalent diameters of nozzles in cold modeling calculations　　m

喷口名称	当量直径	喷口名称	当量直径
下二次风	0.50	四角再燃风	0.04
下一次风	0.36	下层燃尽风	0.36
中二次风	0.32	中层燃尽风	0.36
上一次风	0.36	上层燃尽风	0.36
上二次风	0.27	侧墙再燃风	0.06



(a) 燃烧器布置　　(b) 炉膛网格分布　　(c) 喷口入射角度

图 1　某 220 t/h 煤粉炉燃烧器布置及物理模型

Fig. 1　Burners arrangement and the physical model of a 220 t/h pulverized coal furnace

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 数值模拟

2.1 网格划分及方法

计算区域选取冷灰斗到水平烟道段入口，以炉膛实际尺寸建立物理模型，模型分为3个部分：冷灰斗区、燃烧区及炉膛上部区. 为便于计算，对模型进行以下合理简化：喷口伸出部分不考虑；屏式过热器不考虑. 采用ICEM软件划分网格，为保证计算精度，对主燃烧器去网格进行了加密处理，网格间距为30 mm，主燃烧器区截面网格如图1(c)所示. 整个计算区域的网格大约1 501 006个.

冷态试验过程气流简化为等温、稳态、不可压缩流动，故数学模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型. 国内外许多学者在探索角置切向燃烧炉膛内煤粉气流的流动、燃烧、传热过程的数值模拟研究中，气相流动模拟大多采用 $k-\varepsilon$ 湍流双方程模型[10]，计算结果与试验结果基本符合，可以定性或定量地反映炉膛内气流流动过程的基本特征. 壁面处采用壁面函数法进行处理，采用SIMPLE－C方法进行迭代求解，该算法主要用于不可压缩流场的数值模拟计算.

2.2 边界条件

工质采用理想状态下的空气，其密度为1.293 kg/m^3，动力粘度为1.506×10^{-5} Pa·s. 冷态模拟计算的边界条件有3个：a. 燃烧器入口处各喷口截面设为速度入口，入射角度和设计一致，水力直径如表1所示；b. 固体壁面处采取无速度滑移，无质量渗透的边界条件；c. 炉膛出口处采取压力出口边界条件，出口压力为－30 Pa. 边界条件及计算工况如表2和表3所示.

表2 冷态模化边界参数

Tab.2 Boundary parameters in cold modeling calculations

名称	运行设计值	模化试验值
一次风速度/(m·s^{-1})	23.5	16
一次风温/℃	60	10
二次风速/(m·s^{-1})	43.49	23
二次风温/℃	340	10
四角再燃风速/(m·s^{-1})	100	51
侧墙再燃风速/(m·s^{-1})	80	42
燃尽风速/(m·s^{-1})	24	17
炉内气流速度/(m·s^{-1})	5.9	0.606
炉膛负压/Pa	－30	－30

表3 冷态模拟计算工况

Tab.3 Working conditions in cold modeling calculations m·s^{-1}

工况	一次风速	二次风速	四角再燃风速	侧墙再燃风速	燃尽风速
1	16	23	0	0	17/17/17
2	16	23	50	0	17/17/17
3	16	23	50	42	17/17/17
4	16	23	37.5	31.5	17/17/17
5	16	23	25	21	17/17/17
6	16	23	12.5	10.5	17/17/17
7	16	23	50	42	17/0/0
8	16	23	50	42	0/17/0
9	16	23	50	42	0/0/17

3 结果分析

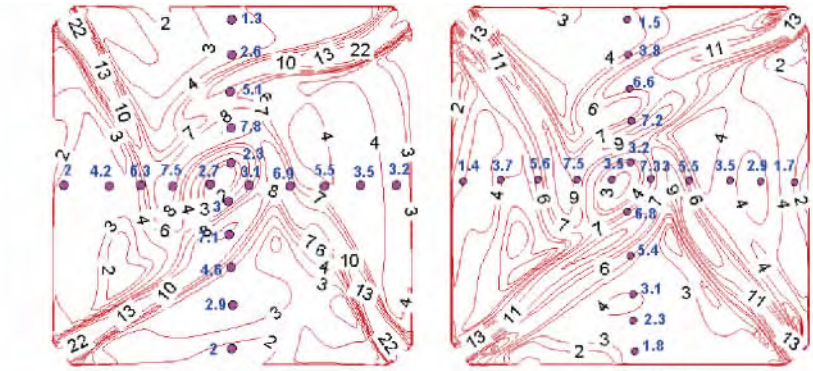
3.1 炉内空气动力场特性及模型验证

冷态试验依据冷态模化原理，试验工况与模拟工况1一致. 冷态空气动力场的测试方法有多种，如：火花法、飘带法、纸屑法、测速管测定法[11]、不等温射流冷态试验法等[9]. 本文根据现场情况选用飘带法进行测量，测量仪器选用热线风速仪，采用十字网格法分别测试各喷口截面流场分布. 通过试验结果和模拟结果对比分析，对数学模型进行验证，结果如图2所示.

图2为中二次风和上一次风截面速度分布图，圆点表示炉内实测位置，蓝色数据为实测值. 从图中可以看出，主燃区的中二次风和上一次风喷口截面气流充满度好，并在炉膛中心旋流形成切圆，沿喷口轴线方向射流速度均匀，贴近壁面风速接近2 m/s，无刷墙现象，试验和模拟计算的假想切圆直径都接近1 500 mm，约是假想切圆直径700 mm的2倍. 模拟计算切圆处中二次风、上一次风最大切向风速分别为8 m/s和9 m/s，比实测值7.8 m/s，7.5 m/s略大. 截面上各测点实测值与计算值的误差为5%～10%，该模型能较好地模拟实际锅炉的冷态空气动力场情况.

图3为沿炉膛高度方向上中心截面的速度分布等势图. 图3(a)为无再燃工况，可以看出，炉内上升气流分别在主燃区和燃尽区形成两个明显的旋流区，在该区域通过气流卷吸作用使风粉充分混合燃烧，同时也容易使炉内火焰集中. 图3(b)为再燃工况，在再燃气流的扰动下，炉内整个旋流流场分布均匀，旋流中心最大风速为9 m/s，有利于拉长炉内火焰充满度，保证炉内温度场均匀分布，更利于降低NO_x.

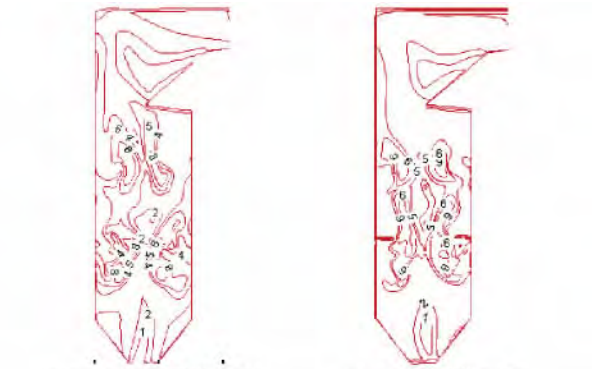
?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 中二次风　　(b) 上一次风

图 2　工况 1 中二次风、上一次风截面冷态试验与模拟速度分布对比

Fig. 2　Comparison between the results of experiments and simulations on the velocity distributions on up-primary air section and mid-secondary air section in the 1st working condition



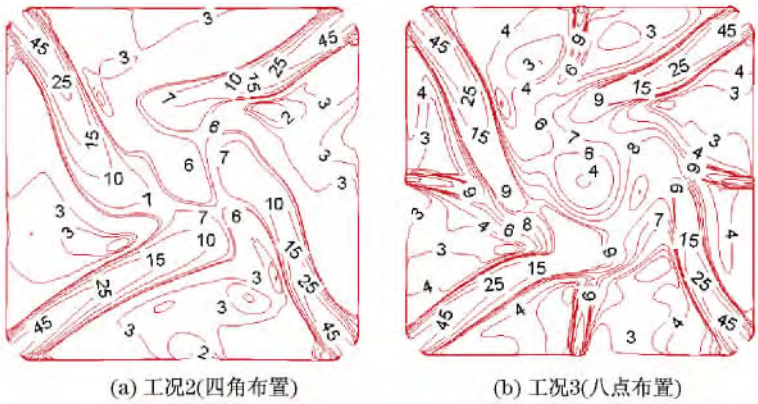
(a) 工况1(无再燃工况)　　(b) 工况3(再燃工况)

图 3　沿炉膛高度方向中心截面模拟计算速度分布

Fig. 3　Simulated velocity distributions on the center section along the vertical direction of the furnace

3.2　再燃喷口布置方式对流场特性的影响

图 4(a)和图 4(b)分别表示再燃喷口采用四角布置和八点布置方式. 从图中可以看出，两种布置方式下的火焰沿喷口射流刚性较强，再燃气流沿射流轴线方向上衰弱，在近截面中心形成明显的旋流区，即假想切圆，且切圆偏离较小，和实际运行工况吻合较好. 工况 3 中的假想切圆直径约为 2 500 mm，比工况 2 中的切圆直径(约为 1 500 mm)大 66%，工况 2、工况 3 在假想切圆处的最大切向速度分别为 7 m/s和 9 m/s. 工况 3 中炉膛气流充满度和再燃气流混合程度明显增强，旋流区中心气流刚性较大. 这是因为采用八点喷射时，四角喷口射流受到侧墙喷口横向射流的扰动和冲击，气流偏斜较早，在气流刚性较强时与侧墙喷口射流混合，在卷吸作用下形成强烈的旋流；仅采用四角喷射时，火焰刚性较强，再燃气流在接近炉膛中心处衰弱形成旋流，并与上升烟气混合. 故采用八点喷射不仅使再燃气流对炉内上升气流的覆盖面增大，且利于强化炉内气流混合. 图 4(b)工况 3 中，在四侧炉墙增加再燃喷口后，喷口背火侧存在明显的回流区域，而向火侧与射流的交界处有明显涡团，相比图 4(a)工况 2 中靠近侧墙处再燃气流微弱. 故再燃喷口八点布置方式有效地提高了近侧墙处再燃气流与上升烟气的混合程度，更利于 NO_x 的还原.



(a) 工况2(四角布置)　　(b) 工况3(八点布置)

图 4　不同喷口布置方式下再燃喷口截面模拟计算速度分布

Fig. 4　Simulated velocity distributions on the reburning section with different arrangements of nozzles

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 再燃风量对流动特性的影响

在对某220 t/h锅炉气体再燃改造中，再燃燃料量设计为其热量占锅炉总热量的20%，再燃风速设计值如表1所示. 针对再燃风量的影响，在冷态模拟情况下，分别计算了八点喷射布置方式下再燃量为20%，15%，10%，5%的4个工况(即对应工况3，4，5，6)下的再燃喷口流场特性. 文中计算以风速大小表征风量变化，详细参数见工况表3，计算结果如图5所示.

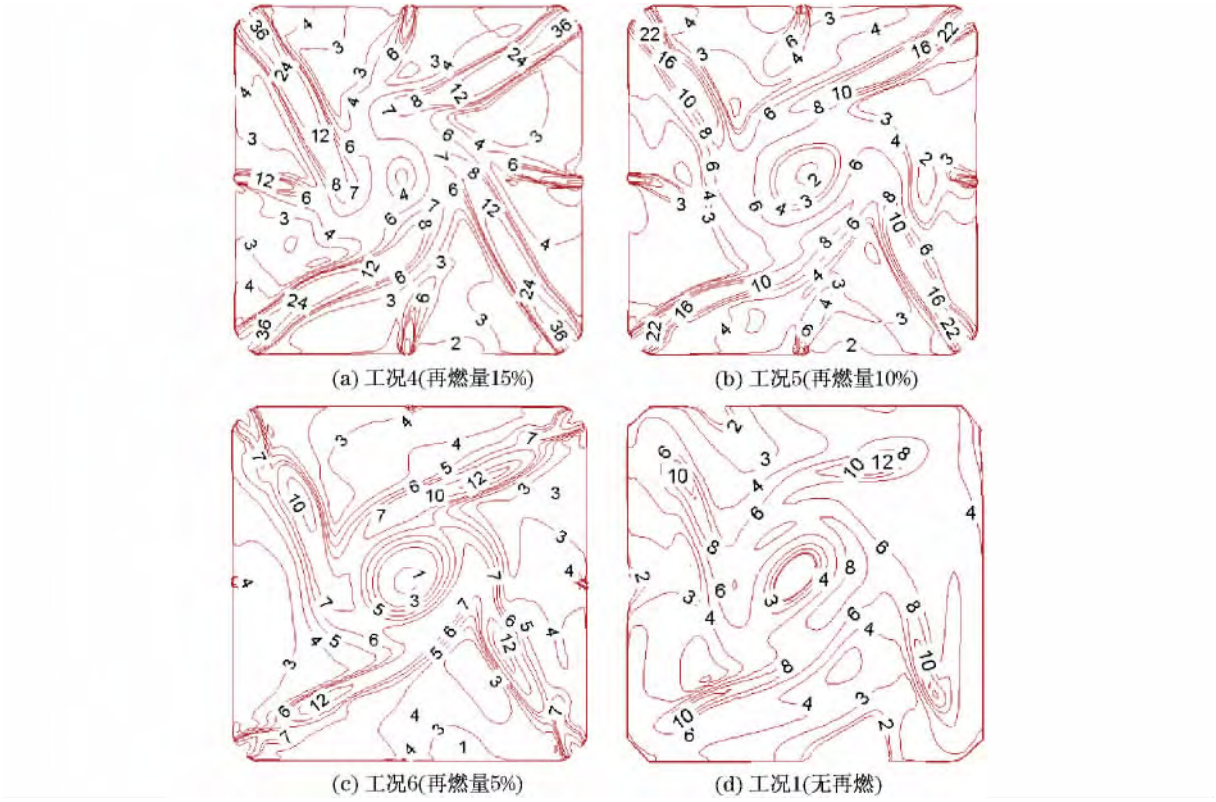


图5 不同再燃风量下再燃喷口截面模拟计算速度分布等势图

Fig. 5 Simulated velocity distributions on the reburning section with different amounts of reburning fuel

再燃量设计工况为20%时在图4(b)表示，不再赘述. 比较图4(b)及图5的速度分布图可以看出，随着再燃量的减少，再燃气流炉内充满度及旋流强度逐渐下降. 如图4(b)与图5(a)所示，再燃量为20%和15%时，各喷口气流刚性较强，四角再燃气流和侧墙再燃气流相互对冲扰动、卷吸形成旋流，假想切圆直径接近，约为2 500mm，切圆处最大切向速度分别为9 m/s和8 m/s，工况4中旋流区中心气流刚性略弱. 图5(b)和图5(c)中，再燃量为10%和5%时，侧墙再燃气流刚性弱，出喷口迅速衰减，无法到达炉膛中心与四角再燃气流形成旋流，四角气流刚性相对于工况4和工况5也明显减小. 图5(b)中假想切圆直径约为2 000 mm，切圆处切向速度为6 m/s，气流充满度和旋流强度的减弱直接影响气体再燃还原NO_x的效果. 图5(c)中，再燃量为5%时，四角喷口射流无法到达炉膛中心，与图5(d)对比可知，在每个喷口出口处受下层二次风的影响出现高速旋流区，说明该工况下再燃气流不能覆盖炉内上升气流，并受炉内旋转气流影响较大. 热态试验也证明了当再燃量为5%时，再燃气体对NO_x的还原没有效果[12]，和该冷态模拟结果一致.

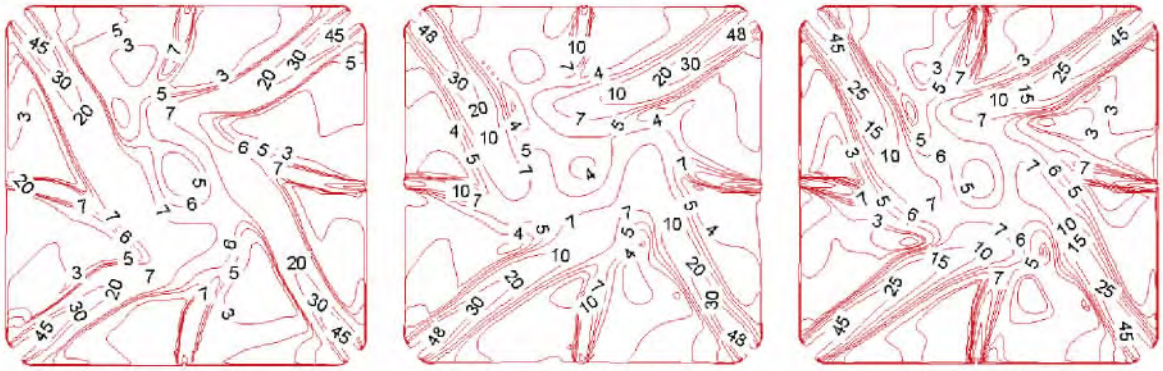
3.4 再燃区高度对流场特性的影响

再燃区高度指再燃喷口中线到燃尽风喷口中线的距离，决定再燃区停留时间的大小. 工程改造中，根据煤质资料和现场布置，再燃喷口的再燃区停留时间设计值为0.67 s(即再燃喷口到下层燃尽风喷口中线距离L_1为3 600 mm)，再燃喷口到中层燃尽风、上层燃尽风喷口中线的距离分别为L_2=4 360 mm和L_3=4 690 mm，冷态模拟分别计算不同再燃区高度下再燃流场特性，结果如图6所示.

从图6可以看出，3种工况下气流速度分布均匀，在炉膛形成假想切圆直径均约为2 500 mm，切圆处切向风速在7 m/s左右，再燃气流对上升气流的覆盖面及旋流混合影响不明显，表明再燃区停留时间设计是合理的，增大再燃区距离对流场分布影响不大. Nazeer等[13]用天然气作为再燃燃料，试验

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表明，增加再燃区的停留时间对降低 NO_x 是有利的，但是当停留时间超过 0.7 s 时就变得不再重要. 张忠孝等[14]在沉降炉上试验，发现再燃区最佳停留时间为 0.6 s，与此结论基本吻合.



(a) 工况7(L_3=4 690 mm)　(b) 工况8(L_2=4 360 mm)　(c) 工况9(L_1=3 600 mm)

图 6　不同再燃区高度下再燃喷口截面模拟计算速度分布

Fig. 6　Simulated velocity distributions on the reburning section with different heights of reburning zone

4　结　论

采用三维数值模拟方法对气体再燃改造后的炉内冷态流场进行计算，用冷态试验结果对数学模型进行验证，分析了不同再燃喷口布置方式、再燃量、再燃区高度对再燃区冷态流场特性的影响，得出如下结论：

a. 炉内冷态空气动力场试验结果与模拟计算值的误差为 5%～10%，该模型能较好地模拟实际锅炉的冷态流场工况. 增加再燃喷口后，旋流区沿炉高方向拉长，流场分布均匀，利于拉长炉内火焰充满度，保证了炉内温度场分布均匀，更有效地降低了 NO_x 的排放.

b. 再燃喷口八点布置方式比四角布置方式的假想切圆直径大 66%，旋流区气流刚性明显增强，且在喷口背火侧形成回流区，明显提高了再燃气流对上升气流的覆盖度，该布置方式更利于 NO_x 的还原.

c. 随着再燃量的减少，再燃气流炉内充满度及旋流强度逐渐下降，再燃量为 20%和 15%时，对流场分布影响不明显. 再燃量为 5%时，再燃气流无法与炉内上升气流充分混合，最佳再燃量为 15%.

d. 再燃区高度距离设计为 3 600 mm 是合理的，增大再燃区距离对流场分布影响不大.

参考文献：

[1] Smoot L D, Hill S C, Xu H. NO_x control through reburning[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(5): 385－408.

[2] Su S, Xiang J, Sun L S, et al. Application of gaseous fuel reburning for controlling nitricoxide emissions in boilers[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(3): 396－402.

[3] Franco A, Diaz A R. Future challenges for "clean coal technologies": joining efficiency increase and pollutant emission control[J]. Energy, 2009, 34(3): 348－354.

[4] 苏胜，宁星，李亮国，等. 再燃条件下生物燃料及其焦还原 NO 特性研究[J]. 太阳能学报，2013，34(3)：388－394.

[5] 史俊瑞，徐有宁，王阳，等. 燃煤锅炉气体再燃混合特性的三维数值模拟[J]. 锅炉技术，2011，42(1)：39－42.

[6] 朱明，张忠孝，周托. 气体再燃低 NO_x 燃烧器的喷口射流特性[J]. 燃烧科学与技术，2008，14(3)：281－287.

[7] 刘汉周，邹和根，郭涛，等. 四角切圆煤粉炉天然气再燃烧技术的试验研究[J]. 热力发电，2006，35(1)：37－40.

[8] 冯琰磊. 气体再燃降低煤粉锅炉 NO_x 排放的研究[D]. 上海：上海交通大学，2004.

[9] 王伟平，张忠孝，滕叶，等. 部分气化煤制气多点喷射再燃脱硝的冷态流场研究[J]. 洁净煤技术，2013，18(1)：97－100.

[10] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论与数值模拟[M]. 北京：科学出版社，1994.

[11] 林宗虎. 锅炉测试[M]. 北京：中国计量出版社，1996.

[12] 陈宝明，张忠孝，毕德贵，等. 天然气再燃降低 NO_x 排放的热态工业试验研究[J]. 热能动力工程，2015，30(1)：113－117.

[13] Nazeer W A, Jackson R E, Peart J A, et al. Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural-gas reburning[J]. Fuel, 1999, 78(6): 689－699.

[14] 张忠孝，姚向东，乌晓江，等. 气体再燃低 NO_x 排放试验研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25(9)：99－102.

（编辑：董　伟）

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net