

电袋复合除尘器气流分布的数值模拟和优化

刘栋栋* 叶兴联 李立锋 苏寅彪

福建龙净环保股份有限公司 龙岩 364000

摘要 采用 CFD 数值模拟方法对某电业公司 150 MW 机组配套电袋复合除尘器流场进行了分析研究,通过比较模拟结果,确定了电袋复合除尘器流场的优化设计方案。结果表明:在进口烟道弯头内设置导流板,调整进口烟箱内孔板上的导流叶片及第 3 层孔板开孔率,电袋结合处设置孔板,可以使电场进口断面速度相对标准偏差、滤袋迎风面气流速度、滤袋单元流量分配偏差及每个袋区各滤袋流量的相对标准偏差均达到设计要求,为电袋复合除尘器的设计提供参考依据。

关键词 电袋复合除尘器;数值模拟;流场优化

中图分类号 X701.2 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)05-2897-06 DOI 10.12030/j.cjee.201601193

Numerical simulation and optimization of gas flow distribution on electrostatic-fabric integrated precipitator

LIU Dongdong* ,YE Xinglian ,LI Lifeng ,SU Yinbiao

Fujian Longking Co. Ltd. ,Longyan 364000 ,China

Abstract Flow field in the electrostatic-fabric integrated precipitator (EFIP) of a 150 MW unit was investigated by numerical simulation, and the optimized design was obtained. A comparison of the numerical simulation results reveals that installing guide plates in the inlet pipe, adjusting the guide vanes of the perforated plates and the porosity of the third perforated plate in the inlet nozzle, and adding a perforated plate in the conjunction of the electric and bags zone have a significant positive effect on the flow field. After optimizing, the flow distribution in the inlet of the electric field, the gas velocity at the windward side of the filtering bags, the gas flow deviation of the six bag units, and the relative root mean square value of each bag's flow in per bag unit satisfy the design requirements for flow field. This study can provide a reference for designing the electrostatic-fabric integrated precipitator.

Key words electrostatic-fabric integrated precipitator; numerical simulation; optimization

电袋复合除尘器有效的结合了电除尘器与滤袋除尘器的优点,对煤种及煤质变化较大的机组适用性更强,除尘效率更高且设备寿命更长,近年来得到了广泛的应用。流场分布是影响电袋复合除尘器总体除尘效率、运行阻力及滤袋使用寿命的关键因素之一。聂孝峰等^[1]采用数值模拟方法对 300 MW 机组电袋复合除尘器的流场进行了研究,改善了原设备内部的流场分布,且工业应用实验结果与数值模拟结果基本一致。王民玉等^[2]采用物模实验的方法对电袋复合除尘器内电场区域的速度分布进行了测试研究。郑奎照^[3]采用数值模拟和物模实验相结合的方法对新密 1 000 MW 机组电袋复合除尘器气流分布进行了研究。本文采用 Fluent 软件对某电业公司 150 MW 机组配套电袋复合除尘器内流场进行了优化设计,为其现场设计提供参考依据。

1 CFD 模型及网格划分

某电业公司 150 MW 机组配备 2 台对称布置的双室电袋复合除尘器,单室内设置 3 个电场和 6 个滤

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA065004)

收稿日期:2016-01-25;录用日期:2016-03-24

第一作者:刘栋栋(1985—),女,硕士,工程师,研究方向:大气污染防治技术。E-mail: liudd1985@163.com

* 通信作者

袋单元,处理烟量为 $868\ 759\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,烟气温度 $140\ ^\circ\text{C}$,本体阻力约为 $687\ \text{Pa}$ 。按照 1:1 的比例建立模型,电袋复合除尘器模型如图 1(a) 所示。滤袋单元具体分区如图 1(b) 所示。考虑到服务器的计算能力与计算时间,将滤袋直径放大 1 倍(假设简化后的滤袋压力损失与原设计滤袋保持一致)。

采用结构网格和非结构网格结合的方式划分网格,为了提高模拟结果的合理性,对进出口烟箱及滤袋区域网格进行了加密,网格总数为 1 120 万,如图 2 所示。

2 数学模型及边界条件

CFD 方法即把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场,用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替,通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得场变量的近似值^[4]。其过程包括建立几何模型、划分网格、定义边界条件、确定计算模型、计算求解和后处理。数值模拟控制方程使用连续性方程、动量方程,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型、压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。

连续性方程(质量守恒方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j \right) + S_i \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; u_i, u_j 为空气速度; μ 为空气黏性; p 为压力; S_i 为源项。

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,湍动能方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

扩散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

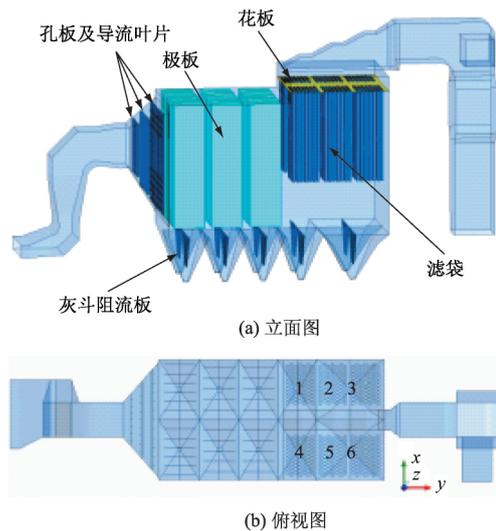
式中: G_k 为层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中的脉动扩张; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为常量, σ_k 和 σ_ε 为 Prandtl 数, S_k 和 S_ε 为自定义源项。

滤袋简化为多孔跳跃模型,其压降方程为

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} C_2 \rho v^2 \right) \Delta m \quad (5)$$

式中: α 为渗透率; C_2 为内部阻力系数; Δm 为滤袋厚度。由于平均过滤风速低,且滤袋厚度仅为 $2 \sim 3\ \text{mm}$,故忽略第 2 项内部阻力。

假设模型入口速度均匀,边界采用速度进口;出口边界采用压力出口;孔板边界采用多孔跳跃,其参数



注:滤袋采用分区布置,共有 6 个小区域,1~6 代表各个区域。

图 1 电袋复合除尘器 CFD 模型

Fig. 1 CFD model of EFIP

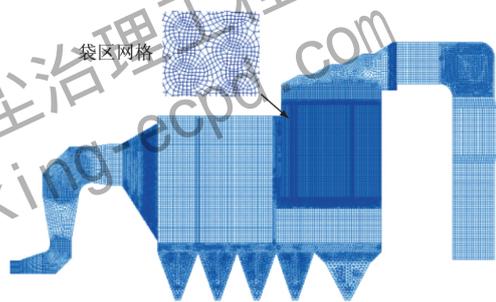


图 2 电袋复合除尘器网格

Fig. 2 Mesh of EFIP

设置根据不同的开孔率及孔径厚度比计算得到^[5-7];滤袋边界也采用多孔跳跃,其初始参数设置根据滤袋阻力(假设为 200 Pa)及简化后的滤袋表面积计算得到,再根据模拟所得的本体阻力与测试结果比较后做调整,最终设置滤袋渗透率为 $2 \times 10^{-11} \text{ m}^2$,厚度设为 3 mm。其余如导流板、极板、灰斗阻流板、滤袋底部边界等均采用壁面。

3 相关设计要求

对电袋复合除尘器电场进口断面流场均匀性的评判,采用相对标准偏差,公式如下:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i - \bar{v}}{\bar{v}} \right)^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中: σ_r 为气流分布相对均方根差; v_i 为测点风速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; \bar{v} 为平均风速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; n 为截面测点数。

本台电袋复合除尘器电场进口断面气流分布相对标准偏差要求为 $\sigma_r \leq 0.2$ 。

滤袋迎风面气流速度定义为垂直于迎风面的速度,平均速度 $\leq 0.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大速度 $\leq 1.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[8]。

通过滤袋袋口风速计算滤袋单元的处理风量,各个滤袋单元处理风量偏差 $\leq \pm 5\%$,每个袋区各滤袋流量的相对标准偏差 ≤ 0.2 ^[9]。

4 初始方案模拟结果与分析

本台电袋复合除尘器初始设计方案为:烟道内未设置导流板,进口喇叭型烟箱内沿着气流方向布置 3 层孔板,开孔率分别为 50%、40%、30%,此种方案的模拟结果见图 3~图 6。

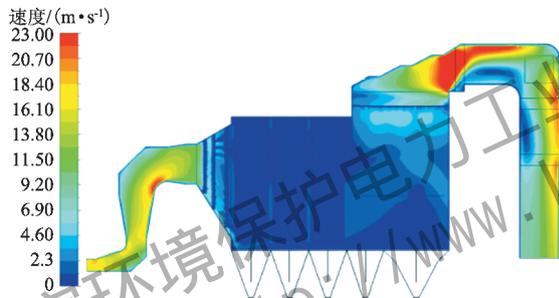


图 3 优化前速度分布图(主视图)

Fig. 3 Velocity distribution before optimization(front view)

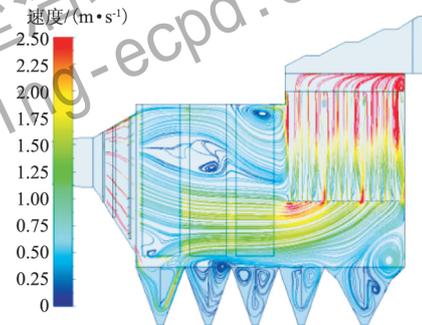


图 4 优化前流线图(主视图)

Fig. 4 Streamline before optimization(front view)

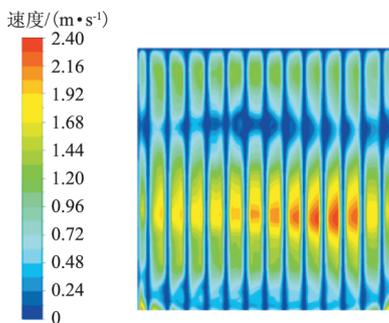


图 5 优化前第 1 电场进口断面速度分布图

Fig. 5 Velocity distribution in the first electric field before optimization

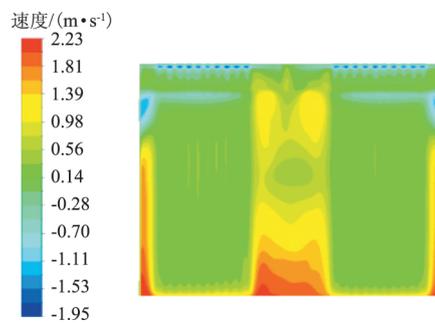


图 6 优化前滤袋迎风面速度分布图

Fig. 6 Velocity distribution at windward side of filtering bags before optimization

将滤袋单元进口划分为迎风区域和袋底进风区域,取首排滤袋前 100 mm 处断面为滤袋单元进口面,迎风面位于滤袋进口面上部,高度与滤袋的高度相同,袋底进风面则处于滤袋单元进口面的下部。

从图 3 可看出,进口烟道内流场分布不均,弯头处存在局部高速区,将加快烟道磨损;从图 4 可看出,电场内存在大范围涡流区,将引起二次扬尘及电晕封闭。

图 5 显示,电场进口断面的气流分布均匀性差,影响电除尘区除尘效率。图 6 为滤袋迎风面速度分布云图,滤袋对应处的速度较小,在 $0.3 \sim 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,在靠近侧壁处和中部走廊的速度最大,这是由于滤袋与墙体之间、左右袋区之间存在一定的间距,流动阻力较小形成烟气旁路所致。可见邻近这些区域的布袋边缘横向冲刷较为严重,最大速度达 $1.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,无法达到设计要求。

对优化前模拟结果统计如下:电场进口断面速度相对标准偏差为 0.476,滤袋迎风面平均速度为 $0.457 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,迎风区域流量为 $38.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,袋底进风区域流量为 $82.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,迎风区域流量所占比例为 32.0%,本体阻力为 682 Pa。另外,袋区流量统计结果见表 1,可见袋区流量偏差及每个袋区各滤袋流量的相对标准偏差可以达到设计要求。

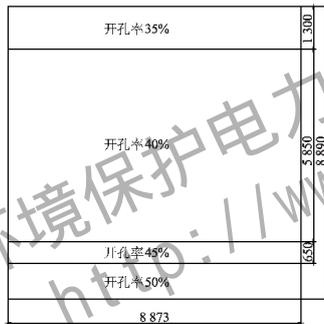
表 1 优化前统计结果

Table 1 Simulation results before optimization

滤袋单元	总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量偏差/ %	相对标准 偏差
1 区	20.247	+0.17	0.156
2 区	19.884	-1.63	0.149
3 区	20.605	+1.94	0.155
4 区	19.995	-1.08	0.159
5 区	19.865	-1.72	0.153
6 区	20.683	+2.32	0.161

5 优化方案模拟结果与分析

在进口烟道弯头处设置导流板,调整进口喇叭型烟箱内孔板上的导流叶片及第 3 层孔板开孔率,如图 7 所示,并在电袋结合处设置一层多孔板,开孔率为 50%。优化后的 CFD 模型如图 8 所示,模拟结果如图 9 ~ 图 15 所示。



注:孔板长度单位为 mm。

图 7 第 3 层孔板开孔率示意图

Fig. 7 Porosity arrangement of the third perforated plate

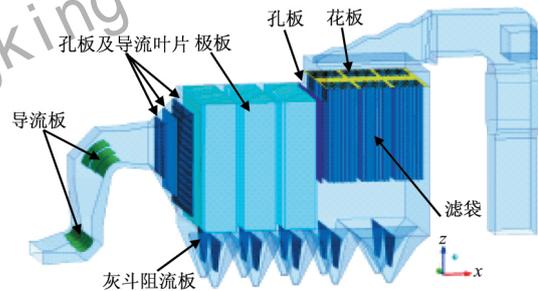


图 8 优化后电袋复合除尘器 CFD 模型图

Fig. 8 CFD model of EFIP after optimization

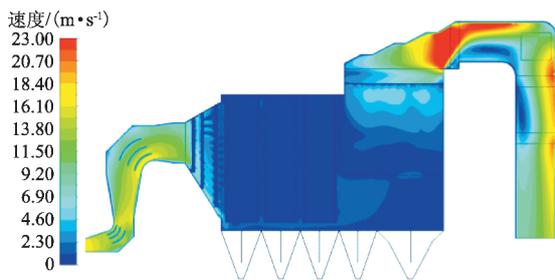


图 9 优化后速度分布图(主视图)

Fig. 9 Velocity distribution after optimization(front view)

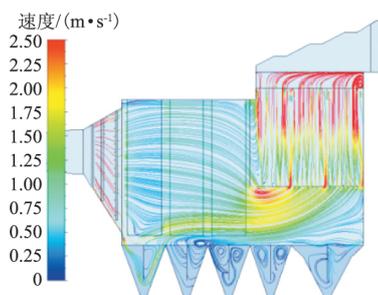


图 10 优化后流线图(主视图)

Fig. 10 Streamline after optimization(front view)

从图 9 可看出,进口烟道流场有了明显改善,弯头处的最大速度明显降低;从图 10 可看出,电场内的

涡流基本消除, 气流可以较均匀的经过电场; 从图 11 可看出, 电场进口断面的均匀性有了明显改善, 可以达到设计要求。

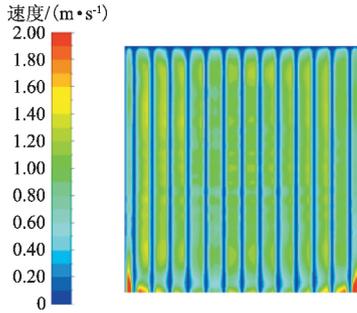


图 11 优化后第电场进口断面速度分布图

Fig. 11 Velocity distribution in the first electric field after optimization

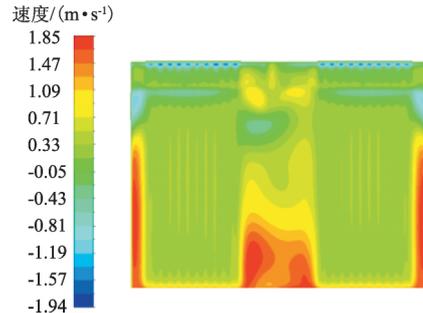
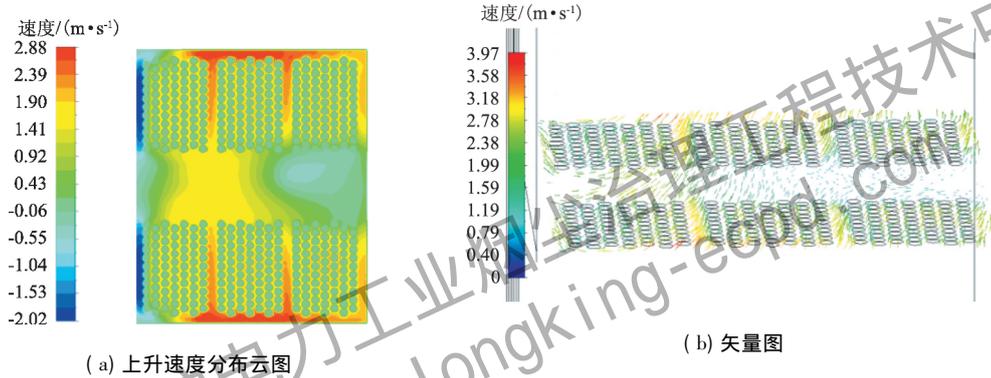


图 12 优化后滤袋迎风面速度分布图

Fig. 12 Velocity distribution at the windward side of the filtering bags after optimization



(a) 上升速度分布云图

(b) 矢量图

图 13 优化后袋底速度分布图

Fig. 13 Velocity distribution at bottom of bags after optimization

电袋结合处增加孔板, 是为了在电场区域速度分布较均匀的情况下, 减少气流直接对滤袋的横向冲刷, 迫使末电场上部的部分气流导向滤袋下部再进入滤袋单元。

从图 12 可看出, 在电袋结合处增设孔板后, 迎风面速度减小, 特别是靠近侧壁处和中部走廊的滤袋边缘的冲刷速度明显减小, 最大值由原来的 $1.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $0.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 虽可达设计要求, 为延长滤袋寿命, 还需采用耐磨滤料或对滤料采用涂覆、压光处理^[10]。图 13 为优化后袋底速度分布图, 可看出最大速度主要集中在滤袋与侧壁的走道处以及相邻的滤袋单元走道处, 故邻近这些区域的滤袋也要做好防磨措施。

对优化后模拟结果统计如下: 电场进口断面速度相对标准偏差为 0.193, 滤袋迎风面平均速度为 $0.401 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 迎风区域流量为 $33.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 袋底进风区域流量为 $86.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 迎风区域流量所占比例为 28.0%, 本体阻力为 675 Pa。

另外, 从图 14 可看出, 滤袋表面最大速度区^[11]集中在各个滤袋单元的四周边缘且靠近滤袋袋口处, 最大速度为 $5.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 由于简化模型时滤袋直径是原设计直径的 2 倍, 滤袋条数为原有数量的 1/4, 过滤面积为原有设计的 1/2, 则实际滤袋表面的最大速度约为 $2.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 15 为滤袋袋口的速度分布云图, 可看出各个滤袋单

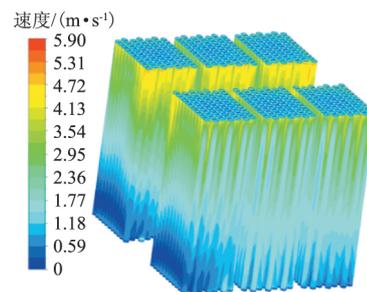


图 14 优化后滤袋表面速度分布云图

Fig. 14 Velocity distribution at surface of bags

元之间的流量分配较均匀。袋区流量统计结果见表 2,可看出袋区流量分配依然小于 $\pm 5\%$,但较优化前略微变差。这是由于电袋结合处增设孔板,使得靠近孔板的滤袋单元流量有所降低,远离孔板的滤袋单元流量增加所致。另外,每个袋区各滤袋流量的相对标准偏差基本不变,均小于 0.2,依然达到设计要求。

6 结论

采用数值模拟方法对某电业公司 150 MW 机组配套电袋复合除尘器进行了优化设计,结论如下:

1) 优化前,进口烟道内流场较差,弯头处最大速度较大,将加快烟道磨损;电场进口断面速度分布均匀性差,无法达到设计要求;迎风面平均速度 $0.457 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大速度达到 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,无法满足设计要求。袋区流量分配偏差最大为 2.32%,每个袋区各滤袋流量的相对标准偏差均小于 0.2,达到设计要求。

2) 优化措施为在进口烟道中设置导流板,调整进口喇叭型烟箱中孔板上的导流叶片及第三层孔板开孔率,并在电袋结合处增设孔板。

3) 优化后,进口烟道流场有了明显改善,弯头处最大速度明显减小,减轻了管道磨损;电场进口断面速度分布均匀性有了明显改善,可以达到设计要求;迎风面平均风速 $0.401 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大速度为 $0.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高速区主要集中在靠近侧壁处和中部走廊的滤袋边缘,需要采用耐磨滤料或对滤料采用涂覆、压光处理。袋区流量分配最大偏差为 2.57%,每个袋区各滤袋流量的相对标准偏差均小于 0.2,依然达到设计要求。

4) 本优化方案可为现场设计提供参考依据。

参考文献

- [1] 聂孝峰,李东阳,刘源,等. 电袋复合除尘器气流分布数值模拟优化试验研究[J]. 热力发电,2010,39(7): 27-30
- [2] 王民玉,葛云峰,葛庆伟,等. 电袋复合除尘器气流分布的研究与应用[J]. 电力科技与环保,2014,30(1): 23-26
- [3] 郑奎照. 新密 1000MW 机组电袋复合除尘器气流分布实验研究[J]. 化学工程与装备,2013(12): 48-55
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2004
- [5] GUO Baoyu, YE Xinglian, LIU Dongdong, et al. Application of multi-scale approach in the gas flow simulation through electrostatic precipitators[C]//Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Melbourne, Australia: CSIRO, 2012
- [6] HOU Q F, GUO B Y, LI L F, et al. Numerical simulation of gas flow in an electrostatic precipitator[C]//Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia: CSIRO, 2009
- [7] GUO B Y, HOU Q F, YU A B, et al. Numerical modelling of the gas flow through perforated plates[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(3): 403-408
- [8] 杨小海. 电改电袋复合除尘器的设计与模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2013
- [9] 黄炜. 超净电袋除尘技术的研究与应用[J]. 中国环保产业, 2015(6): 27-32
- [10] 王勇. 电袋复合除尘器气流分布技术及评判标准研究[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(6): 18-20
- [11] 杨凯元. $2 \times 600 \text{ MW}$ 机组电袋复合式除尘器流场优化模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2014

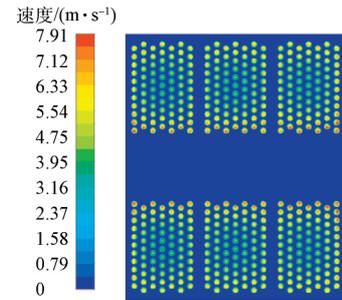


图 15 滤袋袋口处速度分布图

Fig. 15 Velocity distribution at outlet of bags

表 2 优化后统计结果

Table 2 Simulation results after optimization

滤袋单元	总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量偏差/ %	相对标准偏差
1 区	20.180	-0.17	0.155
2 区	19.899	-1.55	0.145
3 区	20.655	+2.19	0.155
4 区	19.940	-1.36	0.156
5 区	19.874	-1.68	0.150
6 区	20.733	+2.57	0.162