

# 管式湿式电除尘器气流分布的组织与优化

高朋<sup>1</sup>, 党小庆<sup>1,\*</sup>, 赵少雄<sup>2</sup>, 李瑞雪<sup>1</sup>, 高光前<sup>1</sup>

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

2. 北京利德衡环保工程有限公司, 北京 102308

**摘要** 管式湿式电除尘器可看作由多个线管式电除尘器并联组成,若各电除尘器之间处理烟气流量偏差过大,将导致湿式电除尘器总的除尘效率下降。采用CFD数值模拟技术,对某热力公司116 MW锅炉配套管式湿式电除尘器的内部气流分布进行研究分析,并对气流分布进行组织与优化。在电场进口断面气流速度分布满足相对均方根指标要求的基础上,将各单管处理烟气流量偏差控制在一定范围之内,以保障湿式电除尘器达到规定的排放要求。现场测试结果表明,出口粉尘浓度满足项目技术规范规定的排放要求,数值模拟结果可指导管式湿式电除尘器设计。

**关键词** 管式湿式电除尘器;流量偏差;除尘效率;气流分布;数值模拟

中图分类号 X513 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)07-4223-06 DOI:10.12030/j.cjee.201605020

## Organization and optimization for gas flow distribution of tubular W-ESP

GAO Peng<sup>1</sup>, DANG Xiaoqing<sup>1,\*</sup>, ZHAO Shaoxiong<sup>2</sup>, LI Ruixue<sup>1</sup>, GAO Guangqian<sup>1</sup>

1. School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China

2. Beijing Lideheng Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Beijing 102308, China

**Abstract** Tubular W-ESP is composed of multiple wire-pipe electrostatic precipitators connected in parallel. The efficiency will decrease if the gas flow deviation becomes too large. CFD numerical simulation technology was used to analyze, organize, and optimize the internal air flow distribution of the 116 MW unit supporting the W-ESP of a heating power company. Upon meeting the requirements of the gas flow distribution of the electrostatic precipitator, the gas flow deviation of the single tube was controlled within a certain range in order to ensure that W-ESP could meet the requirements of emission standards. The test results showed that outlet dust concentration fulfilled these emission requirements. Furthermore, the numerical simulation method provided a reference for tubular W-ESP design.

**Key words** tubular W-ESP; flow deviation; dust removal efficiency; gas flow distribution; numerical simulation

锅炉烟气脱硫塔后湿式电除尘器可以有效收集烟气中的细微颗粒,满足烟气含尘浓度 $\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的超低排放要求。按电除尘器技术规范<sup>[1]</sup>要求:电场区气流分布均匀性 $\sigma \leq 0.25$ ;并联各封头(室)之间的流量偏差不超过 $\pm 5\%$ 。管式湿式电除尘器为并联布置的正六边形多管电除尘器。因此,在考核电场进口断面气流速度分布均匀性同时,还需要控制进入各单管之间烟气流量偏差。

本文以某热力公司116 MW锅炉配套管式湿式电除尘器为研究对象,采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对除尘系统的内部气流分布进行了数值模拟实验。结果表明,电除尘器各电场分区进口断面气流速度分布的相对均方根均小于0.25,但进入各单管烟气流量偏差过大,最大偏差为30%,不符合电除尘器技术规范要求。因此,需要通过数值模拟实验,采取改变气流分布板开孔率、添加导流板<sup>[2-4]</sup>的方法,进一步优化湿式电除尘器内部气流流动状态,减小各单管之间的烟气流量偏差,以保障湿式电除尘器出口烟气含尘浓度达到项目技术规范要求。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA065001-5);陕西省科技统筹项目(2012KTZ03-01-02-04)

收稿日期:2016-05-04;录用日期:2016-06-12

第一作者:高朋(1990—),男,硕士研究生,研究方向:大气污染控制工程技术和设备。E-mail:1831621456@qq.com

\*通信作者,E-mail:dangxq@163.com

## 1 数值模拟

116 MW 锅炉烟气净化系统如图 1 所示,数值模拟实验范围从脱硫塔除雾器出口断面到湿式电除尘器与烟囱烟道接口,包括脱硫塔除雾器出口以上塔体、脱硫塔出口管道和湿式电除尘器出口烟道。

### 1.1 建立几何模型及网格划分

管式湿式电除尘器中含 6 个电场分区,并联布置的单管数量为 462 个。管式湿式电除尘器的几何模型如图 2 和 3 所示。

### 1.2 网格划分

根据管式湿式电除尘器各部分结构模型的复杂程度不同,对除尘器进行分块划分网格:管式收尘极及进口管道模型比较规则,采用结构化网格对其进行划分,可提高计算精度,减少体网格数量;对除雾器及与其相邻的体,模型较复杂,采用混合网格对其进行划分。在满足网格质量要求的前提下,尽量减少网格的数量,以适应现有计算机的计算条件。图 4 体网格数量为 3 706 896,面网格数量为 8 192 341,网格节点数为 1 130 149。经网格质量检查,网格质量满足计算要求。

### 1.3 边界条件设置<sup>[5-9]</sup>

进口边界条件、出口边界条件分别采用速度进口边界条件和压力出口边界条件;导流板、极板采用固体壁面无滑移边界条件;气流分布板简化为多孔介质边界。

### 1.4 评判标准

各电场分区进口断面烟气速度分布均匀性评判标准: $\sigma \leq 0.25$ , $\sigma$  计算公式如下:

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

式中: $\sigma$  为气流分布相对均方根, $v_i$  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。

进入电除尘器各单管烟气流量偏差评判标准:在本工程案例中管式湿式电除尘器处理烟气流量为  $359\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,烟气含尘浓度  $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,湿式电除尘器总的收尘面积为  $3\,360 \text{ m}^2$ ,净化后要求出口烟气含尘浓度小于  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,除尘效率为 84%,有效驱进速度为  $0.054 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。假设并联两台相同规格的电除尘器,则每台电除尘器的收尘面积为  $1\,680 \text{ m}^2$ 。当处理烟气流量偏差为 15% 时,单台电除尘器的处理烟气量分别为  $206\,425$  和  $152\,575 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。计算出除尘效率分别为 80% 和 88%,出口烟气含尘浓

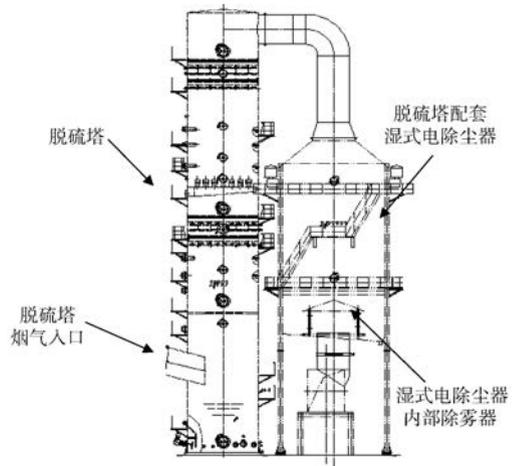


图 1 锅炉烟气净化系统图

Fig. 1 Purification system diagram of boiler flue gas

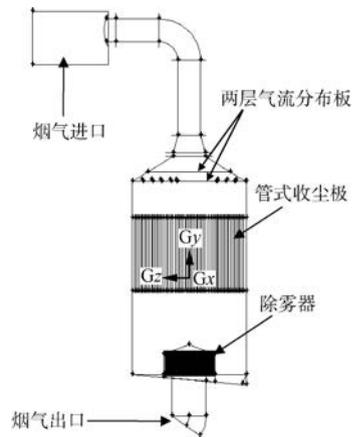


图 2 数值模拟几何模型图

Fig. 2 Geometric model diagram of numerical simulation

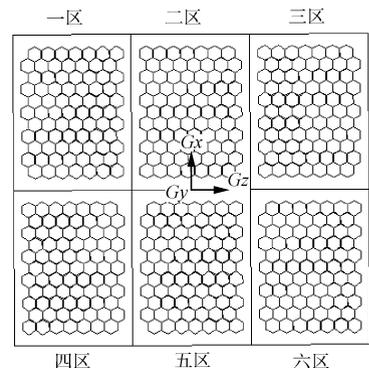


图 3 管式收尘极单元数值模拟模型图

Fig. 3 Numerical simulation model diagram of tubular dust collecting plates units

度分别为 6 和 3.6 mg · m<sup>-3</sup>。并联后的总的出口烟气含尘浓度为 4.98 mg · m<sup>-3</sup>, 满足项目技术规范要求。因此, 本项目将各单管之间烟气流量偏差控制在 ± 15% 以内, 以此来保证出口烟气含尘浓度小于 5 mg · m<sup>-3</sup>。

流量偏差定义为:

$$\text{偏差} = \frac{q_i - \bar{q}}{\bar{q}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $q_i$  为质量流量, kg · s<sup>-1</sup>;  $\bar{q}$  为平均质量流量, kg · s<sup>-1</sup>。

### 1.5 计算模型<sup>[11-14]</sup>

湿式电除尘器中气流雷诺数至少为 10<sup>4</sup> 的数量级, 除尘器内气流为高速的湍流状态, 模拟湿式电除尘器时选择湍流模型, 气体粘度不可忽略。计算时假定不可压缩流体作定常流动; 整个计算过程为等温过程; 计算采用标准的  $\kappa$ - $\varepsilon$  两方程模型求解湍流问题, 壁面边界层采用壁面函数法处理, 控制方程包括连续性方程、动量方程、 $\kappa$  方程和  $\varepsilon$  方程。

连续性方程(质量守恒方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为空气密度, kg · m<sup>-3</sup>;  $u_i, u_j$  为空气速度, m · s<sup>-1</sup>;  $\mu$  为空气的粘性, Pa · s;  $P$  为压力, Pa;  $S_i$  为源项, N · m<sup>-3</sup>。

湍动能  $\kappa$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

耗散率  $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中:  $G_k$  为层流速度梯度而产生的湍流动能, J;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能, J;  $Y_M$  为可压缩湍流中的脉动扩张, kg · m<sup>-1</sup> · s<sup>-3</sup>;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  为常量;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  为 Prandtl 数;  $S_k$  为自定义源项, kg · m<sup>-1</sup> · s<sup>-3</sup>;  $S_\varepsilon$  为自定义源项, kg · m<sup>-1</sup> · s<sup>-4</sup>。

### 1.6 计算方法

求解器采用稳态的 3D 压力基求解器, 采用有限容积法离散控制方程, 数值计算采用 SIMPLE 算法, 对流项差分格式采用一阶迎风格式。

## 2 初步设计方案数值模拟分析

对原除尘系统的气流分布进行了数值模拟计算, 各电场分区进口断面速度值及其偏差如表 1 所示。相对均方根最大为 0.23, 均满足相对均方根指



图 4 数值模拟网格划分图

Fig. 4 Numerical simulation grid graph

表 1 各电场分区进口断面速度值及其偏差

Table 1 Velocity value and deviation of inlet section of each electric field

速度	最大/ (m · s <sup>-1</sup> )	最小/ (m · s <sup>-1</sup> )	平均/ (m · s <sup>-1</sup> )	相对均方根
一区	2.25	0.54	1.77	0.19
二区	2.21	0.36	1.61	0.23
三区	2.35	0.30	1.74	0.22
四区	2.26	0.70	1.77	0.19
五区	2.19	0.43	1.61	0.23
六区	2.35	0.46	1.74	0.22

标要求。但由数值模拟结果可知,进入各单管烟气流量偏差仍然偏大。烟气流量偏差超过  $\pm 15\%$  的单管有 64 个,难以保障出口烟气含尘浓度小于  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的排放标准。图 5 所示为湿式电除尘器内部流线图。由图 5 可知,当烟气经脱硫塔出口管道进入湿式电除尘器喇叭口,然后再进入除尘器本体时,由于烟气的流通面积变大,速度减小,压力减小,所以气流向四周扩散。

电场进口断面气流速度分布如图 6 所示,电场进口断面四周烟气流速偏大,中间区域流速偏小,存在高低速区,从而导致高速区域单管的烟气流量偏大,低速区域单管的烟气流量偏小。另外,由于脱硫塔出口烟道弯管的反射作用,导致电场进口断面左侧的高速区域要比右侧的高速区域大。

### 3 数值模拟优化结果

#### 3.1 优化方案

针对本工程案例中湿式电除尘器各单管之间处理烟气流量偏差大的问题,考虑到下层气流分布板以下吊挂阴极线、施工的难易程度等几方面的因素,对比多种方案及其对应的数值模拟实验结果,提出如下的优化方案:1)如图 7 所示,在下层气流分布板迎风面的左侧布置 5 块导流板,右侧布置 3 块导流板,导流板与水平方向夹角均为  $45^\circ$ ,板宽为 160 mm。2)调整下层气流分布板开孔率,开孔率的布置如图 8 所示。布置导流板的目的是要将左右两侧高速区域的气流向中间区域引导;将下层气流分布板前后部分开孔率调小,中间部分开孔率调大,目的就是要增加前后两个区域的烟气流动阻力,使更多的气流流向中间区域。总之,这 2 种优化方案综合运用的目的是将扩散到除尘器四周的气流向中间区域集中。

#### 3.2 优化后数值模拟结果及阻力特性

优化后各电场分区进口断面速度值及其偏差如表 2 所示。相对均方根最大为 0.19。湿式电除尘器内部流线图如图 9 所示:烟气进入除尘器本体时,分布均匀性有了很大改善,扩散到除尘器四周的气流在很大程度上向内部集中。电场进口断面气流速度分布如图 10 所示,电场进口断面气流分布比初步设计方案更加均匀。数值模拟结果表明:烟气流量偏差超过  $\pm 15\%$  的单管只有 2 个(死角地方),优化后的结果可满足项目技术规范要求。现场测试结果表明,管式湿式电除尘器出口烟气含尘浓度小于  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,验证了数值模拟方法的可靠性,说明数值模拟结果可指导管式湿式电除尘器设计。

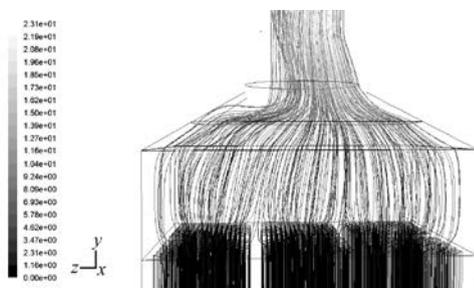


图 5 湿式电除尘器内部流线图

Fig. 5 Internal gas flow streamline of W-ESP

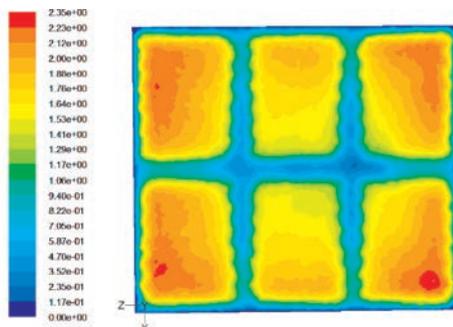


图 6 电场进口断面气流速度分布云图

Fig. 6 Gas velocity on import section of electric field

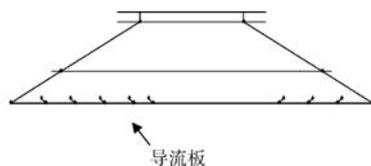


图 7 导流板布置示意图

Fig. 7 Guide plate layout diagram

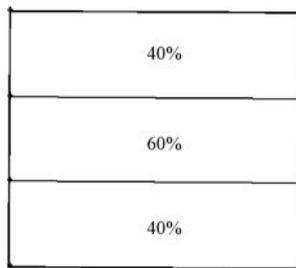


图 8 下层气流分布板开孔率布置

Fig. 8 Opening rate arrangement of lower gas flow distribution plate

表 2 优化后各电场分区进口断面速度值及其偏差

Table 2 Velocity value and deviation of inlet section of electric field after optimization

速度	最大/(m · s <sup>-1</sup> )	最小/(m · s <sup>-1</sup> )	平均/(m · s <sup>-1</sup> )	相对均方根
一区	2.13	0.61	1.75	0.17
二区	2.01	0.54	1.65	0.19
三区	2.10	0.52	1.71	0.18
四区	2.12	0.81	1.77	0.16
五区	2.00	0.58	1.65	0.19
六区	2.08	0.74	1.71	0.18

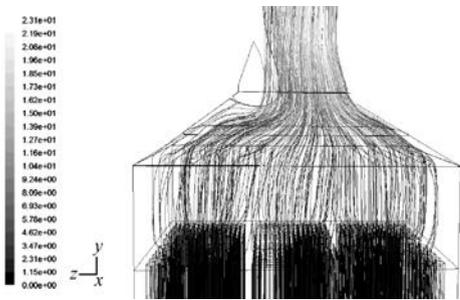


图 9 优化后湿式电除尘器内部流线图

Fig.9 Internal gas flow streamline in optimized W-ESP

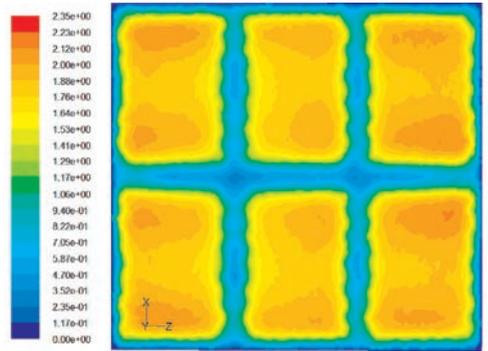


图 10 优化后电场进口断面气流速度分布云图

Fig.10 Gas velocity on import section of electric field in optimized W-ESP

优化前后烟气流量偏差情况对比如表 3 所示。

烟气流经湿式静电除尘器的阻力特性是影响湿式电除尘器工业应用的一个主要因素。本文对优化前后 116 MW 锅炉配套管式湿式电除尘器的烟气阻力进行了研究,湿式电除尘器断面指示图如图 11 所示。通过数值模拟实验计算出各段的压力损失见表 4。结果表明,优化前后管式湿式电除尘器的烟气阻力变化不大。

表 3 优化前后烟气流量偏差情况对比

Table 3 Comparison of gas flow deviation before and after optimization

项目	优化前参数	优化后参数
最大流量偏差/%	+30.00	+15.43
最小流量偏差/%	-24.82	-15.29
流量偏差超过 ±5% 单管数量/个	176	150
流量偏差超过 ±15% 单管数量/个	64	2

表 4 湿式电除尘器各段压力损失

Table 4 Pressure loss of each subsection /Pa

	A-B	B-C	C-D	总损失
优化前	181	164	77	422
优化后	172	182	78	432
偏差/%	2.55	5.20	0.65	1.17

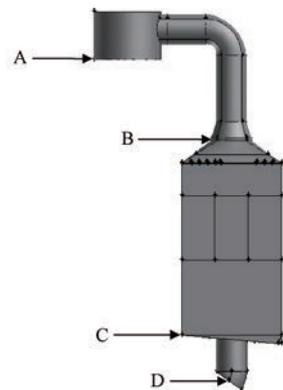


图 11 湿式电除尘器断面指示图

Fig.11 Section indicator diagram of W-ESP

## 4 结论

1)通过对管式湿式电除尘器内部流场进行数值模拟仿真计算,提出了在气流分布板迎风面添加导流板和改变气流分布板开孔率综合运用的优化方案,使得优化后的湿式电除尘器内部气流分布得到显著改善,实现各单管之间的烟气流量偏差不超过 ±15% ,

保障出口烟气含尘浓度小于  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 实现烟气深度净化。

2) 数值计算结果能直观地反映出管式湿式电除尘器内部气流流动规律, 为导流板的布置和气流分布板开孔率的调整提供参考依据。

3) 在湿式电除尘器狭小空间内要将进入各单管烟气流量偏差控制在  $\pm 5\%$  以内难度较大, 将流量偏差控制在  $\pm 15\%$  以内即可满足排放要求。

## 参考文献

- [1] JB/T 7671-2007, 电除尘器 气流分布模拟试验方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 2007
- [2] 彭华宁. 一体式湿式电除尘器流场的数值模拟与优化设计[J]. 电力科技与环保, 2016, 32(1): 30-32
- [3] 闫东杰, 党小庆, 黄学敏, 等. 电除尘器气流分布试验研究和数值计算[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 383-386
- [4] 李立锋, 叶兴联, 杨丁. 湿式电除尘器系统流场数值模拟分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4960-4964
- [5] GUO B Y, HOU Q F. Numerical modelling of the gas flow through perforated plates[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(3): 403-408
- [6] 焦丹, 谢安国. 气流分布对电除尘器影响的数值模拟[J]. 冶金能源, 2011, 30(3): 58-61
- [7] SWAMINATHAN M R, MAHALAKSHMI N V. Numerical modelling of flow through perforated plates applied to electrostatic precipitator[J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(20): 2426-2432
- [8] 李立锋, 黄三明, 叶兴联, 等. LNE-CFD 数值模拟技术的研究与应用[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(4): 24-27
- [9] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005
- [10] WHITE H J, 王成汉译. 工业电收尘[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984
- [11] 熊莉芳, 林源, 李世武.  $\kappa\text{-}\varepsilon$  湍流模型及其在 Fluent 软件中的应用[J]. 热能工程, 2007, 36(4): 13-15
- [12] AHSAN M. Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using  $k\text{-}\varepsilon$  turbulence model with enhanced wall treatment[J]. Beni-suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2014, 3(4): 1-9
- [13] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [14] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999