

折线型三通道除雾器内部流场的数值模拟 与除雾效率分析

洪文鹏, 邓广强, 雷鉴琦

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 采用 CFD(计算流体动力学)软件对折线型三通道除雾器的流场进行数值模拟。根据除雾器内部流场的流动特性对气相采用基于雷诺时均方程的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟,对液相采用基于 Euler-Lagrange 方法的 DPM(固液离散相)模型模拟。研究表明:除雾器的除雾效率受自身板型、气流速度、液滴直径因素影响;随两板间距的增大,除雾效率降低;随液滴直径和气流速度的增大,除雾效率均增大;折线型三通道除雾器效率一般要高于两通道除雾器的除雾效率,当气流速度小于 2 m/s 或大于 5 m/s 时,两种除雾器效率相差不是很明显,当气流速度大于 2 m/s 且小于 5 m/s 时,折线型三通道除雾器则具有明显优势。

关键词: 数值模拟;两相流;除雾器;除雾效率

中图分类号: TK05 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.01.009

引言

除雾器是脱硫系统中的关键设备,其性能优劣直接决定了脱硫系统能否连续可靠的运行。衡量除雾器性能优劣有两个重要指标:除雾效率和进出口压降。除雾效率值是单位时间内除去的液滴质量与进入除雾器的液滴总质量的比值,除雾效率的大小表示除雾器除去水量的多少,影响除雾效率的因素主要有叶片结构、板间距、颗粒直径和气流速度等^[1-2]。

折线型除雾器设计研究在最近几年才开始应用 CFD 方法。文献[3]等考虑了气体湍流流动对液滴运动的作用情况下,选择标准化的 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了除雾器通道内的流场,全面分析了各因素对除雾效率的影响,并提出了采用低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型进行湍流模拟比标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算结果更接近实验值。文献[4]对脱硫吸收塔除雾器的性能进行了数值模拟和实验研究,指出影响流场的主要参

数是叶片的迎风面几何结构。文献[5]使用 ANSYS 软件对折线型除雾器的影响因素进行了理论分析。文献[6]利用 ANSYS 软件模拟了折流板除雾器内的流场,分析了除雾器通道内的速度场。文献[7]通过模拟计算了折流板除雾器的除雾效率,使用标准化 $k-\varepsilon$ 模型,分析了除雾器气流速度、布置方式对除雾器的影响。文献[8]对除雾器的性能进行了实验研究,得出了影响除雾效率、临界流速、压力损失的主要因素。文献[9]对湿法烟气脱硫系统装置的经济和安全运行进行了详细的研究。

本研究针对除雾器板间烟气流动特征,对除雾器单通道内气、液流动分别建立了 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DPM 模型,根据折线型除雾器结构特点,采用 FLUENT 软件完成了数值模拟,分析了板间距、液滴直径和气流速度因素对除雾效率的影响,比较了相同工况条件下两种板型的除雾效率。

1 折线型除雾器的结构及工作原理

折线型除雾器的工作原理:当含有液滴的气流以一定速度流经除雾器时,由于气体惯性较小,很容易改变方向流过除雾器区域,但是夹杂在气流中的液滴由于惯性较大,会保持原来的运动状态,很难改变原有运动方向,从而与除雾器叶片发生碰撞被暂时捕集。附着于叶片表面上的小液滴由于扩散及重力沉降作用会越来越多聚合形成相对较大的液滴,当聚合的液滴大到重力超过气体对其产生的上升力时,液滴就从折流板表面上被分离下来^[10]。折线型三通道除雾器叶片有 3 个转折处使气流速度方向发生 3 次转变,从而使液滴在惯性力作用下碰撞到板片的机会增多,在第 1 个转角处未被除去的液滴将有机会在随后的转弯处经过相同的作用而被捕集。

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-11-08

基金项目: 烟气脱硫系统“石膏雨”防治关键技术研究

作者简介: 洪文鹏(1970-),男,吉林吉林人,东北电力大学教授。

这种多折向结构有效地提高了除雾器的除雾效率, 其分离效率受自身结构、气流速度、液滴直径等多种因素影响。

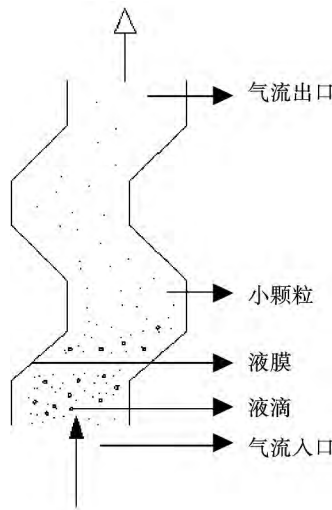


图 1 除雾器工作原理

Fig. 1 The working principle of the demister

2 计算方法

2.1 流场数学模型

在湿法烟气脱硫塔内, 除雾器各个工作区域具有对称性和空间重复性, 因此建立模型时选择两个叶片间的工作区域为模拟对象。含液滴气流在除雾叶片间弯曲通道中的流动是三维、非定常、可压缩黏性流体的流动过程, 为了提高计算速度, 在误差允许范围内对模型做如下简化:

(1) 忽略流道的空间拉伸, 简化流场为两叶片间的二维平面流动;

(2) 由于进入除雾器弯曲通道内的气流速度较小, 故将气体视为不可压缩气体;

(3) 考虑在理想状况下, 气体流动各参数与时间无关, 故将流动视为定常流动;

(4) 由于液滴粒径较小, 液滴被当作直径不变的球体来处理, 计算中不考虑液滴之间的碰撞、聚合等现象, 并忽略蒸发、摩擦、撕裂及热效应的影响;

(5) 液滴碰到壁面后即认为被捕集, 到达除雾器出口时, 即认为液滴逃逸, 不考虑二次夹带作用的影响;

(6) 不考虑气液两相之间的任何能量交换。

综合考虑以上简化条件, 对连续相采用 RNG k

$-\epsilon$ 湍流模型, 并将改进的 SIMPLE 算法用到速度场和压力场的耦合计算中。离散格式压力为标准格式, 动量、湍动能、湍流耗散率均为二阶迎风格式。对离散相采用基于欧拉-拉格朗日方法的 DPM 模型进行计算。

2.2 气相方程

连续性方程:

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

N-S 方程:

$$\text{div}(\rho u \vec{V}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \left[-\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u'v')}{\partial y} \right] + S_u$$

$$\text{div}(\rho v \vec{V}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \left[-\frac{\partial(\rho u'v')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} \right] + S_v$$

其它变量的输运方程:

$$\text{div}(\rho \vec{V} \varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + \left[-\frac{\partial(\rho u' \varphi')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v' \varphi')}{\partial y} \right] + S$$

式中所涉及变量说明参见文献 [11]。

2.3 液相方程

在笛卡尔坐标系下, 颗粒作用力平衡方程为:

$$\frac{du_p}{d\tau} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + f_x$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re}{24}$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 一颗粒的单位质量曳力, N;

$\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 一颗粒在运动中受到的重力和浮力, N;

f_x 一热泳力、布朗力、Saffman 升力等其它作用力, N。

本研究模拟时仅考虑 Saffman 升力, 其它力的影响忽略不计。

2.4 网格划分

网格划分使用 GAMBIT 软件。计算区域考虑边界层的影响, 近壁面网格选择四边形结构性网格, 边界层第一层所占比例 20%, 增长因子 1.2, 一共 5 层。其余部分选择三角形平铺网格, 即网格元素为 Tri(三角形), 生成方式为 Pave(平铺成非结构网格)。网格尺寸为 1。其中近壁面第一层网格厚度为:

$$y_w = 6 \left(\frac{V_r}{v} \right)^{-\frac{7}{8}} \left(\frac{L_r}{2} \right)^{\frac{1}{8}} y^+$$

式中: V_r —进口平均速度, m/s; L_r —进口宽度, mm。首层边界层网格厚度随板间距变化情况如表 1 所示。

表 1 第一层边界层网格厚度随板间距变化情况(mm)
Tab. 1 The changes of the first boundary mesh thickness varying with the plate spacing(mm)

板间距	第一层边界层厚度
25	0.024 68
30	0.025 25
32	0.025 48
35	0.025 74
40	0.026 18
45	0.026 56

2.5 计算条件

(1) 连续相

介质: 空气, 密度为 1.225 kg/m^3 , 动力黏度为 $1.789 4 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;

进口条件: 气流速度为 $u_y = 1、2、3、4、5$ 和 6 m/s , $\mu_x = 0$, 进口截面气流均匀分布;

出口条件: 出口表压力为 0 Pa ;

壁面条件: 静止、无滑移和绝热。

(2) 离散相

介质: 水, 密度为 998 kg/m^3 , 气流含水量为 0.05 kg/m^3 ;

进口条件: 液滴速度与空气速度相同, 喷射类型为 surface(表面), 液滴在进口截面均匀分布;

液滴直径: 6 种液滴直径分别为 $10、20、30、40、50$ 和 $60 \mu\text{m}$;

壁面条件: 选择 trap(捕集) 类型, 不计反弹和二次夹带。

(3) 其它设置

板间距分别为: $25、30、32、35$ 和 45 mm ;

精度选 10^{-6} 。

3 结果与分析

3.1 液滴运动轨迹

当板间距为 32 mm , 气流速度为 3 m/s , 被追踪液滴直径为 $30 \mu\text{m}$ 时, 采用 FLUENT 软件对除雾器进行模拟得出的液滴运动轨迹如图 2 所示, 左侧数值为停留时间(s)。

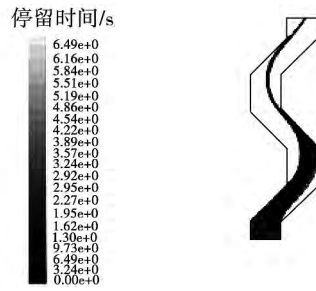


图 2 液滴轨迹

Fig. 2 The droplet track

从图 2 中可以看出, 当一定速度的气流夹杂着液滴从下方入口进入除雾器通道时, 由于气流的惯性撞击作用, 液滴会与除雾器叶片相撞而被捕集, 当被捕集的液滴不断聚集形成较大液滴且大于自身产生的重力时, 液滴就从叶片表面分离下来。三通道除雾器的多折向结构增加了液滴被捕集的机会, 未被除去的液滴会在下一个转弯处经过相同的作用而被捕集, 从而提高了除雾效率。

3.2 各参数对除雾效率的影响

3.2.1 叶片间距

当液滴直径为 $20 \mu\text{m}$ 时, 在除雾器不同入口气流速度情况下, 板间距变化对除雾效率的影响如图 3 所示。

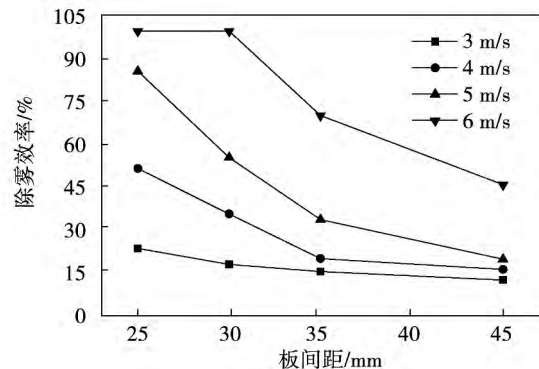


图 3 板间距对除雾效率的影响

Fig. 3 Effect of distance between plates on demist efficiency

从图 3 中可以看出, 当速度一定时, 除雾效率随板间距增大而降低, 这主要由于板间距增大后, 流场区域也随之变大, 气流在除雾器内部通道中的运行阻力会随之减小, 从而使气流的速度方向变化趋于平缓, 液滴对气流的跟随性变好, 降低了叶片对液滴

的捕捉几率, 导致更多的液滴随气体离开除雾器, 从而使除雾效率降低。另外, 板间距还关系到叶片数量的问题。相同范围内, 板间距越小, 叶片数量越多, 成本加大且清洗更加困难。

3.2.2 气流速度

当板间距为 32 mm 时, 不同液滴直径下进口气流速度与除雾效率的关系如图 4 所示。

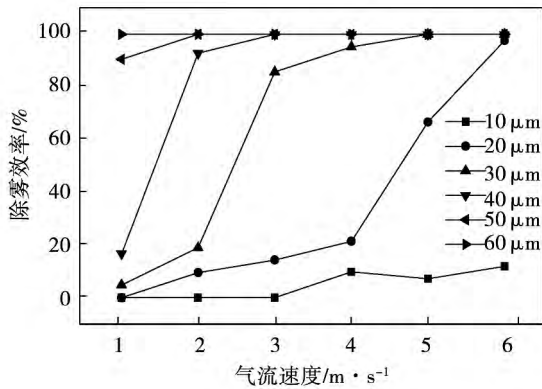


图 4 气流速度对除雾效率的影响

Fig. 4 Effect of gas velocity on demist efficiency

由图 4 可知, 随着气流速度增加, 除雾效率增大, 这是由于离心力大小与速度的平方成正比, 即气流速度增加使得离心力随之增大, 进而产生更大的惯性力, 而液滴的密度较气体大, 因此液滴的离心惯性作用力大, 从而导致液滴迅速撞击板面, 增强了除雾效果。对于 10 μm 以及更小的颗粒, 无论气流速度多大, 其除雾效率也不高。这是由于当速度增大到一定程度, 气流湍流程度增加, 液滴所受的 Saffman 升力作用更为显著, Saffman 升力是一种作用于微观粒子的横向剪切力, 小液滴受到它的作用运动轨迹不稳定, 不容易被捕集。

3.2.3 液滴直径

当除雾器间距为 32 mm 的时, 除雾器效率随液滴直径的变化如图 5 所示。

从图 5 中看出, 除雾效率与液滴直径成正比关系, 即液滴直径增加, 除雾效率增大。这首先因为, 液滴的惯性力随着直径的增大而增大, 质量越大, 惯性力越大; 其次, 液滴的速度松弛时间(松弛时间与液滴直径的平方成正比^[12])会变大, 因而更容易保持原有的运动状态, 当气流速度改变方向时, 液滴会更容易从气流流线中分离出来, 这样保持原有方向

的液滴便会碰撞到除雾器叶片壁面而被捕集下来。当液滴直径小于 20 μm, 气流速度小于 5 m/s 时, 除雾器的除雾效率很低, 主要原因是, 直径较小液滴更容易受气流脉动速度的影响, 随气流冲出通道, 再加上小颗粒本身由于受 Saffman 升力运动不稳定, 不容易被除去, 除雾效率变低。这说明折线型三通道除雾器对细小粒子的捕集效果不佳, 比较适用于相对粗大的粒子的分离。

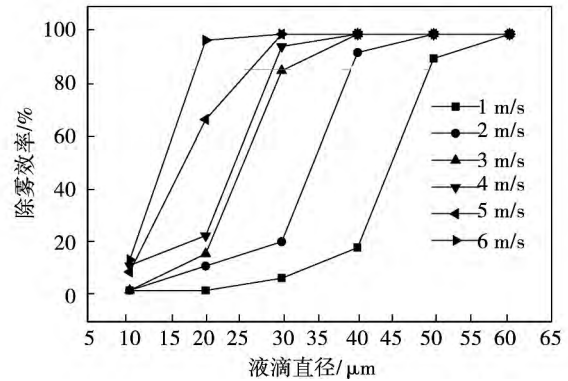


图 5 液滴直径对除雾效率的影响

Fig. 5 Effect of droplet diameter on demist efficiency

3.2.4 除雾器板型

当板间距为 32 mm, 液滴直径为 30 μm 时, 不同流速下板型与除雾效率的关系如图 6 所示。其中折线型两通道和流线型两通道的除雾效率值取自于文献 [13]。从图 6 中可以看出, 在气流速度低于 2 m/s 或高于 5 m/s 时, 不同板型的除雾效果虽有差别, 但相差不大; 当气流速度处于 2 - 5 m/s 之间时, 折线型三通道除雾器的除雾效率明显高于其它板型的除雾器。

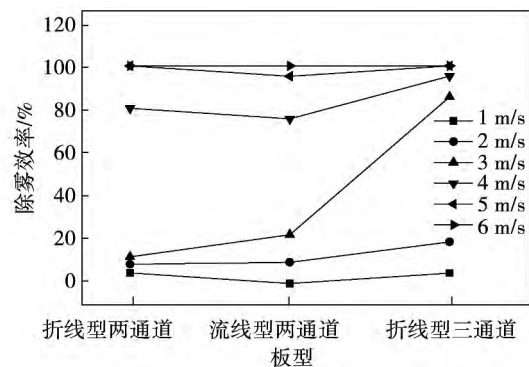


图 6 板型对除雾效率的影响

Fig. 6 Effect of plate cut on demist efficiency

4 结 论

(1) 除雾器的除雾效率受自身板型、气流速度、液滴直径因素影响: 随两板间距增大, 除雾效率降低; 随液滴直径和气流速度的增大, 除雾效率均增大。

(2) 折线型三通道除雾器效率一般要高于两通道除雾器的除雾效率, 当气流速度很小 ($< 2 \text{ m/s}$) 或很大 ($> 5 \text{ m/s}$) 时, 两种除雾器效率相差不是很明显, 而气流速度适中时, 折线型三通道除雾器则具有明显优势。

参考文献:

- [1] 徐建民, 皮 威. 湿法脱硫系统中折板式除雾器压降数值模拟[J]. 化工装备技术, 2011, 32(1): 21-23.
XU Jian-min, PI Wei. The numerical simulation of the serrated plate demister pressure drop in the wet desulphurization system [J]. Chemical Equipment Technology, 2011, 32(1): 21-23.
- [2] 王政允. 湿法脱硫系统除雾器除雾特性的实验研究与数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 71-76.
WANG Zheng-yun. Experimental research and numerical simulation for the demisting characteristic of FGD mist eliminator [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009: 71-76.
- [3] Wang W, Davies G A. CFD studies of separation of mists from gases using vane-type separators [J]. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, 1998: 980-985.
- [4] 王 霄, 闵 健, 王 昕 等. 脱硫吸收塔除雾器性能的实验研究和数值模拟[J]. 环境工程学报, 2008, 2(11): 1530-1534.
WANG Xiao, MIN Jian, WANG Xin, et al. Experimental study and numerical simulation of characteristics of demister of absorbing tower in desulfurization system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(11): 1530-1534.
- [5] 郎方年, 陈金玉, 吴建卫 等. 波纹板脱硫除雾器的除雾性能研究[J]. 机床与液压, 2003(5): 137-140.
LANG Fang-nian, CHEN Jin-yu, WU Jian-wei, et al. Corrugated plate demister for desulphurization of mist performance study [J]. Machine tool and hydraulics, 2003, (5): 137-140.
- [6] 杨 柳, 王世和, 王小明 等. 湿法烟气脱硫系统除雾器特性试验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 146-147.
YANG Liu, WANG Shi-he, WANG Xiao-ming, et al. Experimental investigation of the characteristics of a demister in a wet flue-gas desulfurization system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(2): 146-147.
- [7] 赵 毅, 华 伟, 王亚君 等. 湿式烟气脱硫塔中折线型挡板除雾器分离效率的数值模拟[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(2): 293-297.
ZHAO Yi, HUA Wei, WANG Ya-jun, et al. Numerical simulation of separation efficiency of demisters with serrated baffles in wet flue gas desulfurization towers [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(2): 293-297.
- [8] 黄龙浩, 肖海平, 谢 乾 等. 湿法脱硫系统除雾器性能的实验研究[J]. 现代电力, 2009, 26(4): 71-75.
HUANG Long-hao, XIAO Hai-ping, XIE Qian, et al. Experimental investigation on mist eliminator performance in wet desulfurization system [J]. Modern Electric Power, 2009, 26(4): 71-75.
- [9] 宋斌辉, 汪长浩, 容玉杰, 石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置安全和经济运行对策研究[J]. 能源研究与管理, 2011(3): 15-19.
SONG Bin-hui, WANG Chang-hao, RONG Yu-jie. Study on equipment safe and economic operation countermeasures of limestone/gypsum wet flue gas desulfurization [J]. The Research and Management of Energy, 2011(3): 15-19.
- [10] 林其聪, 刘 欣, 周 翔 等. 折线型与流线型除雾器性能的数值模拟与分析[J]. 中氮肥, 2013(1): 34-35.
LIN Qi-cong, LIU Xin, ZHOU Xiang, et al. Numerical simulation on performances of droplet eliminator with serrated vane and corrugated vane [J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2013(1): 34-35.
- [11] 陶文铨. 数值传热学(第二版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer (2nd edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [12] 徐淑君, 姚 征, 朱懿渊. 波纹板除雾器两相流动的数值模拟与分析[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(3): 275-280.
XU Shu-jun, YAO Zheng, ZHU Yi-yuan. Numerical simulation on two phase flow in demister with corrugated baffle [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2007, 29(3): 275-280.
- [13] 夏寅波. 流线型两通道除雾器的流场数值模拟与研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2012.
XIA Yin-bo. Numerical simulation and research for the flow field of demister with two streamlined channels [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012.

(丛 敏 编辑)

depth and the notably worsen the mixing and dilution uniformity. Compared with the circumstance that a swirling flow is present in the main stream ,when no swirling flows are present in the main stream ,the relative penetration depth will become smaller and the mixing and dilution uniformity will become worse ,thus the mixing and dilution effectiveness will be not good. **Key words:** RQL (rich-quench-lean) combustor ,PLIF (plane laser-induced fluorescence) testing ,laser visualization ,relative penetration depth ,mixing and dilution uniformity

折线型三通道除雾器内部流场的数值模拟与除雾效率分析 = Numerical Simulation of the Flow Field Inside a Polyline Type Three-channel Demister and Analysis of Its Demisting Efficiency [刊 ,汉] HONG Wen-peng , DENG Guang-qiang , LEI Jian-qi (College of Energy Source and Power Engineering , Northeast University of Electric Power , Jilin , China , Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 (1) . - 54 - 58

The CFD (computational fluid dynamics) software was used to conduct a numerical simulation of the flow field inside a polyline type three-channel demister. According to the flow characteristics of the flow field inside the demister ,the Reynolds time-averaged equation-based RNG $\kappa - \omega$ turbulent flow model was used for the gas phase and the Euler-Lagrange method-based DPM (discrete phase model) model was used for the liquid phase. It has been found that the demisting efficiency of a demister is influenced by the plate type of itself ,gas flow speed and liquid drop diameter. To increase the interval between any two plates will decrease the demisting efficiency. To increase the liquid drop diameter and the gas flow speed will invariably increase the demisting efficiency. The demisting efficiency of a polyline type three-channel demister is generally higher than that of a two-channel one. When the gas flow speed is less than 2 m/s or greater than 5 m/s ,the difference between the demisting efficiencies of both types of demister is not notable. When the gas flow speed is greater than 2 m/s or less than 5 m/s ,a polyline type three-channel demister enjoys a conspicuous leading edge. **Key words:** numerical simulation ,two-phase flow ,demister ,demisting efficiency

超临界锅炉螺旋水冷壁流量分配和壁温特性的研究 = Study of the Flow Rate Distribution and Wall Temperature Characteristics of the Spirally-coiled Tube Water Wall in a Supercritical Boiler [刊 ,汉] WANG Wei-shu , SHANGGUAN Shan-shan , XU Wei-hui (Energy Source Engineering Research Center , North China University of Water Conservation and Hydropower , Zhengzhou , China , Post Code: 450011) , GUO Hui-jun (Shanghai