

## 新型活性焦脱硫吸附塔内气流均布特性数值模拟研究

雷 鸣, 李 阳, 范庆伟, 丹慧杰  
(西安热工研究院有限公司 陕西 西安 710032)

**摘 要:** 采用 Fluent 流体模拟软件, 对新型活性焦脱硫吸附塔塔内气流分布特性进行数值模拟研究, 研究表明: 烟气进入吸附塔, 气流速度迅速下降, 在床层阻力的作用下, 气流均匀穿过活性焦层; 床层阻力对气流分布有很大影响, 阻力越大, 塔内气流越均匀; 另外, 可以通过改变入口结构或增加扰流装置来改变塔内气流局部不均匀现象。

**关 键 词:** 活性焦; 烟气脱硫; 气流分布; 数值模拟

中图分类号: TK227.6 文献标识码: A

## 引 言

活性焦烟气脱硫是一种工业化的干法烟气脱硫技术, 脱硫效率超过 96%, 节水 90% 以上, 而且可以实现粉尘、Hg、二噁英等多种污染物的联合脱除以及硫的资源化利用, 不会产生“石膏雨”问题, 也不会产生湿烟气的烟羽视觉污染<sup>[1-2]</sup>。该技术特别适用于我国内蒙、宁夏、新疆等富煤缺水地区的新建电厂以及大型坑口电站, 城市周边环保要求较高的热电厂, 炼钢厂以及垃圾焚烧厂<sup>[3-7]</sup>。

吸附塔是活性焦烟气脱硫系统的关键设备, 各研究单位针对活性焦脱硫技术的开发也均以开发新型脱硫吸附塔为目标。塔内气流的流动特性对脱硫效果有很大影响, 料层各个区域均匀连续的接触原烟气是保证脱硫效率的前提<sup>[8-9]</sup>。因此, 本研究以自主开发新型吸附塔为目标, 采用 Fluent 流体模拟软件, 对吸附塔内的流动及气流分布特性进行了数值模拟研究, 考察脱硫塔内气流的分布情况, 结合模拟结果评估吸附塔结构的合理性。

## 1 数值模拟模型的建立

## 1.1 新型活性焦吸附塔模型

研究对象为一种圆环形分段式错流烟气净化吸附塔, 塔体结构如图 1 所示, 吸附塔采用错流形式,

整体为圆柱形, 分为上下两段。整个塔体由三层圆环构成, 最外侧圆环被分为上下两段, 上半段为净烟气集气室, 下半段为原烟气布气室, 中间层为活性焦层, 最内侧圆环形空腔为中间烟气集气室。烟气与活性焦之间均采用百叶窗布气栅格分隔。活性焦由上部进料口给入, 经锥形布料斗实现均匀给料, 依靠重力自上而下流动, 经卸料斗流出吸附塔。烟气由下侧入口烟道进入, 充满原烟气布气室, 经布气栅格, 先与床层下半部的半饱和活性焦接触, 使其快速达到饱和, 然后进入中间烟气集气室, 经集气栅格与上部新鲜活性焦接触, 进入净烟气进气室收集后, 经出口烟道进入烟囱。

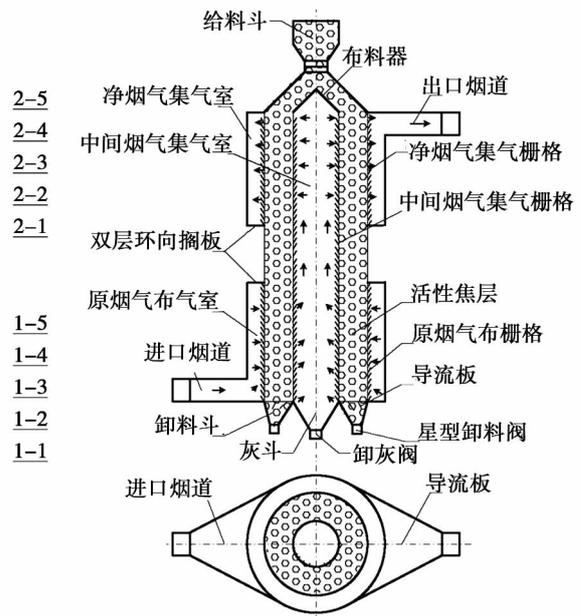


图 1 吸附塔结构图

Fig. 1 Drawing showing the structure of an adsorption tower

为研究不同高度的气流流动情况, 本例在上下

收稿日期: 2014-01-21; 修订日期: 2014-03-12

作者简介: 雷 鸣(1977-), 男, 河南安阳人, 西安热工研究院有限公司高级工程师。

两段吸附塔中分别等距选取 5 个截面,记为 1-1...1-5 和 2-1...2-5,其中截面 1-1 和截面 2-5 分别位于进出口烟道的中心线上。

在模型构建软件 Gambit(模型构建软件)中建立脱硫塔全尺寸模型,模型结构如图 2 所示。模型共生成结构化网格 931 568 个,经网格独立性检验,计算结果与网格数无关。模型在直角坐标系下生成,坐标原点与吸收塔底部圆形截面圆心重合,原烟气沿 x 方向流入进口截面,在原烟气通道进口位置开始转弯沿圆周方向扩散流动;通过底层活性焦层后沿 y 轴方向向塔顶流动,在塔上部再次通过活性焦层,并最终沿 x 方向流出吸收塔。

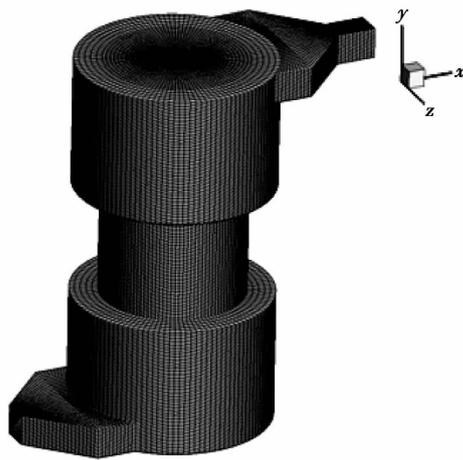


图 2 脱硫塔模型结构及网格

Fig.2 Structure of a model for a desulfurization tower and its grid

### 1.2 多孔介质模型

采用新华牌商业活性焦 ZL100,圆柱形,直径约为 9 mm,生产过程中自然断裂,长度 5-25 mm 不等。根据实验分析,该活性焦堆积空隙率为 0.35。在数值模拟过程中对活性焦颗粒群进行了简化处理,选择多孔介质模型来模拟活性焦颗粒群。在数值模拟过程中假设活性焦任一通流界面上空隙率相等,且不考虑反应过程对气流流动的影响。

### 1.3 气相流动模型

气流在活性焦吸附塔内的流动过程由两部分组成:一种是不通过活性焦层的湍流流动;另一种是通过活性焦层层流流动。其中,层流流动与湍流流动在数值模拟中的区别在于是否求解表示湍流的控制方程。因此,可用通用控制方程的形式表示。本例采用两方程模型中的标准化  $k-\varepsilon$  模型来模拟气体流动过程。

按照  $k-\varepsilon$  湍流模型的假设,可将脱硫塔内的湍流流动视为瞬时稳态流。模型中涉及的控制方程为:连续性方程、动量方程、湍流动能  $k$  方程及附加的耗散率  $\varepsilon$  方程。在直角坐标系下,气相流动控制方程的通用形式为:

$$(\rho U \Psi) - \text{div}(\Gamma_{\Psi} \text{grad} \Psi) = S_{\Psi} + S_a$$

式中: $\rho$ —流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $U$ —流体速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\Gamma_{\Psi}$ —广义扩散系数;  $\Psi$ —控制方程通用符号;  $S_{\Psi}$ —气相产生的源项;  $S_a$ —附加源项。

表 1 所示为标准化  $k-\varepsilon$  模型中控制方程中各模型参数在直角坐标系下的具体表达式及经验常数的数值。层流流动时,不求解  $k$  方程和  $\varepsilon$  方程即可。

表 1 标准化  $k-\varepsilon$  数学模型控制方程

Tab.1 Equation controlling the standardized  $k-\varepsilon$  mathematical model

方程	$\Psi$	$\Gamma_{\Psi}$	$S_{\Psi}$
连续性方程	1	0	0
动量方程(x 方向)	$u$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x})$
动量方程(y 方向)	$v$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y})$
动量方程(z 方向)	$w$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z})$
湍动方程	$k$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma}$	$G_k + \rho \varepsilon$
耗散率方程	$\varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon)$
能量方程	$T$	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	S 根据是否存在内热源或其它热效应确定

表中  $\mu_{\text{eff}}、G_k$  通过下式求得:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09$$

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}$$

### 1.4 烟气条件及模拟工况

针对活性焦脱硫试验系统进行了模拟研究, 烟气总量为 10 000 m<sup>3</sup>/h(标态), 烟气特性参数如表 2 所示。

表 2 烟气特性参数表

Tab. 2 List of parameters governing the characteristics of flue gases

项目	数值	备注	
气体成分 (体积百分比)	H <sub>2</sub> O / %	10	湿基
	O <sub>2</sub> / %	10	干基
	N <sub>2</sub> / %	79.86	干基
	CO <sub>2</sub> / %	10	干基
	SO <sub>2</sub> / %	0.14	干基
温度 / °C	120		
密度 / kg · m <sup>-3</sup>	0.901 3		
物性参数	运动粘度 / m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	2.64 × 10 <sup>-5</sup>	
	导热系数 / W · (m · k) <sup>-1</sup>	0.0343	
	湍流强度 / %	2	

根据新型活性焦干法脱硫系统床层压降试验结果可知, 气流在通过新鲜活性焦床层时, 压降在 400 Pa 左右(两段吸附塔), 经一段时间运行后, 焦粒可能破碎变形, 使得床层阻力增加。为此, 模拟中, 床层阻力选取 400 Pa 和 1 500 Pa 两个工况进行模拟, 两组工况分别代表新鲜活性焦和长期稳定运行两种状态, 简称工况一和工况二。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 工况一速度场模拟结果分析

为了研究吸附塔上下气流分布情况, 分别对吸附塔上下两段 5 个截面  $x$  方向的分速度进行分析, 结果如图 3 和图 4 所示。

根据图 3 和图 4 模拟结果可知, 在原烟气布气室和净烟气集气室内,  $x$  方向气流存在上下分布不均的现象, 在活性焦层和中间烟气集气室内,  $x$  方向气流上下分布较为均匀, 仅在吸附塔入口处的 1-1

截面上出现局部气流过大的现象。在活性焦层内部, 越靠近吸附塔中心, 速度越大, 烟气在流经活性焦层的界面上存在着速度突变。对比图 3 和图 4, 吸附塔上段气流分布均匀性优于下段。分析认为, 烟气进入吸附塔, 快速向原烟气布气室内扩散, 经过活性焦层, 进入净烟气集气室, 然后向出口汇集, 因此, 在原烟气布气室和净烟气集气室, 气流上下分布不均匀, 尤其在靠近进口的一侧, 不均匀现象尤为严重。烟气进入吸附塔, 气流速度迅速降低, 由于焦层阻力, 在活性焦层界面上, 烟气快速达到均匀。进入活性焦层后, 烟气经过活性焦的空隙穿过焦层, 由于通流面积减小, 导致气流速度在活性焦界面上发生突变。在每个截面上, 塔内气流呈现明显的中心对称, 这说明烟气在活性焦层内均匀分布。由于该工况模拟新鲜活性焦, 焦层阻力相对较小, 致使吸附塔入口处出现局部气流过大的现象。

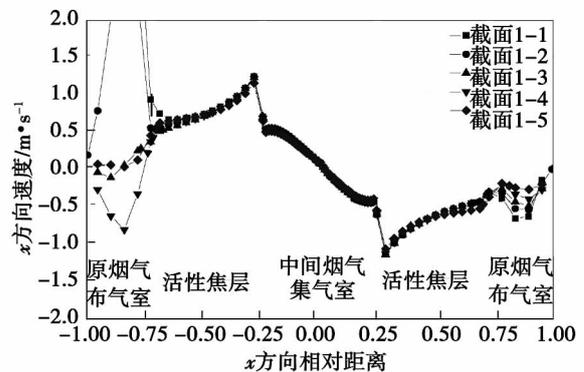


图 3 吸附塔下段  $x$  方向速度场 (400 Pa)

Fig. 3 Velocity field (400 Pa) in the lower section of the tower in the  $x$  direction

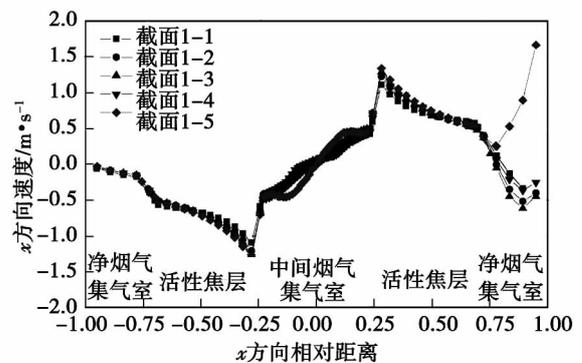


图 4 吸附塔上段  $x$  方向速度场 (400 Pa)

Fig. 4 Velocity field (400 Pa) in the upper section of the tower in the  $x$  direction

为了获得塔内圆周方向气流分布情况,在分析了沿吸附塔进出口  $x$  方向气流分布特性的基础上,又分析了与  $x$  方向垂直的  $z$  方向的气流分速度,通过对比分析  $x$  方向和  $z$  方向的速度场研究整个塔内的气流分布特性,分析结果如图 5 和图 6 所示。 $z$  方向速度场与  $x$  方向速度场分布特性相同,在活性焦层,上下分布比较均匀。对比图 3 和图 4  $x$  方向与  $z$  方向烟气流速相当,即烟气流速相当,这说明烟气沿圆周方向分布均匀。

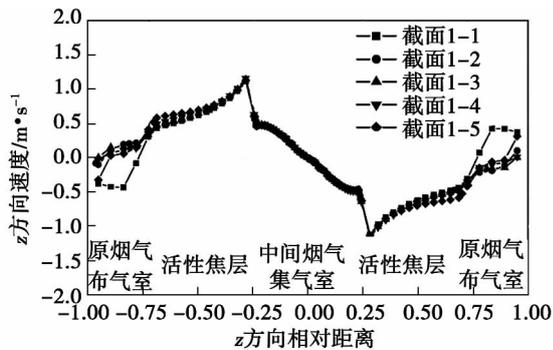


图 5 吸附塔下段  $z$  方向速度场(400 Pa)  
Fig. 5 Velocity field(400 Pa) in the lower section of the tower in the  $z$  direction

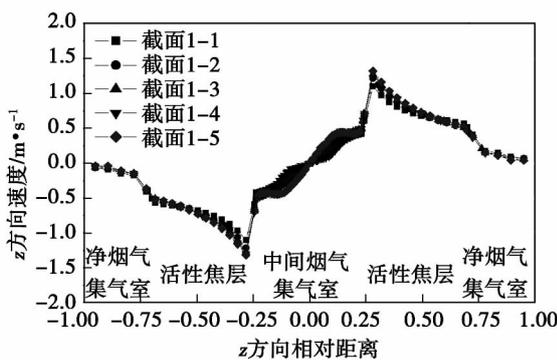


图 6 吸附塔上段  $z$  方向速度场(400 Pa)  
Fig. 6 Velocity field (400 Pa) in the upper section of the tower in the  $z$  direction

2.2 工况一压力场模拟结果分析

图 7 为脱硫塔  $z = 0$  平面上压力等值线图(静压)。由图中结果可知,下部脱硫塔进口位置由于气流速度的快速衰减,动压逐渐减小、静压增加,形成局部的高压区域(图中黑框区域),活性焦层内气流压力梯度均匀,沿高度方向基本无压力梯度。 $x = 0$  截面上,由于没有进口区域的影响,气流的压力梯

度分布非常均匀。脱硫塔整体压力损失在 500 Pa 左右,通过活性焦层的压力损失在 400 Pa 左右,与试验结果吻合较好。

图 8 为脱硫塔进出口通道中间截面的压力分布等值线图,对应于 1-1 和 2-5 截面。由图中结果可知,在原烟气进口截面上,进口原烟气的动量造成了压力梯度的不均匀分布,迎风面活性焦层的压力高,其控制区域为迎风面  $90^\circ$  左右的区域。该区域内的局部通流烟气量较大,通流速度高,但其在深度方向的控制范围较小,约为活性焦层深度的  $1/8$  左右。净烟气出口区域的压力梯度沿圆周方向分布很均匀。

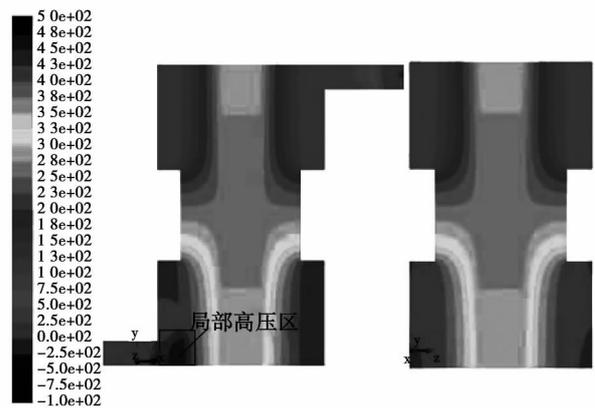


图 7 工况一脱硫塔压力分布等值线图  
( $z = 0, x = 0$  平面, Pa)

Fig. 7 Chart showing the isolines of the pressure distribution in the desulfurization tower under the operating condition No. 1 ( $z = 0, x = 0, Pa$ )

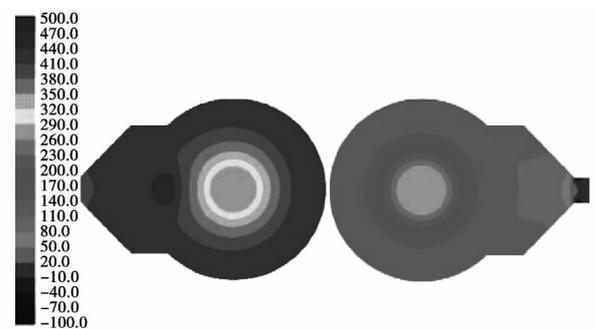


图 8 1-1 和 2-5 截面压力分布等值线图(Pa)

Fig. 8 Chart showing the isolines of the pressure distribution in the cross-section No. 1-1 and 2-5(Pa)

### 2.3 工况二速度场模拟结果

工况一模拟新鲜活性焦,床层阻力较小。在实际工程中,由于活性焦的破碎,导致床层阻力增大。根据实际工程经验推断,该吸附塔在实际运行状态下,阻力约为 1 500 Pa。为此针对床层阻力为 1 500 Pa 的工况进行了模拟。

图 9 和图 10 为工况二模拟所得吸附塔  $x$  方向分速度变化图。根据模拟结果可知,塔内气流分布与工况一相似,但是气流分布均匀性明显优于工况一,在吸附塔入口处的局部气流过大的现象基本不存在,上下烟气流流量基本相同。分析认为,吸附塔床层阻力增加,有利于塔内气流的均匀分布。

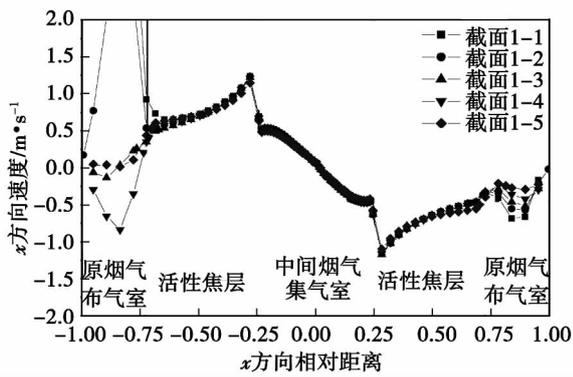


图 9 吸附塔下段  $x$  方向速度场(1 500 Pa)  
Fig. 9 Velocity field (1 500 Pa) in the lower section of the tower in the  $x$  direction

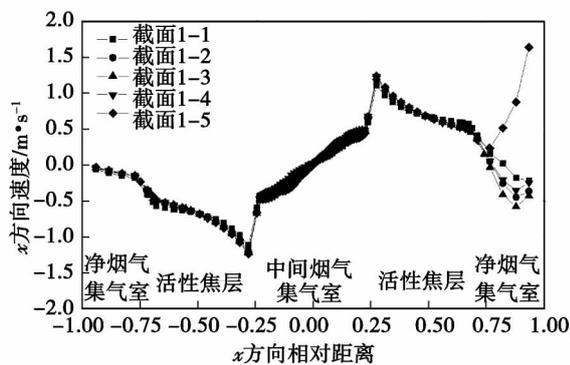


图 10 吸附塔上段  $x$  方向速度场(1 500 Pa)  
Fig. 10 Velocity field (1 500 Pa) in the upper section of the tower in the  $x$  direction

图 11 和图 12 为吸附塔  $z$  向速度场分布,同样,在活性焦层上下气流分布均匀,气流速度与  $x$  方向相当,即气流量与  $x$  向相当,这说明吸附塔沿圆周方

向气流分布均匀。

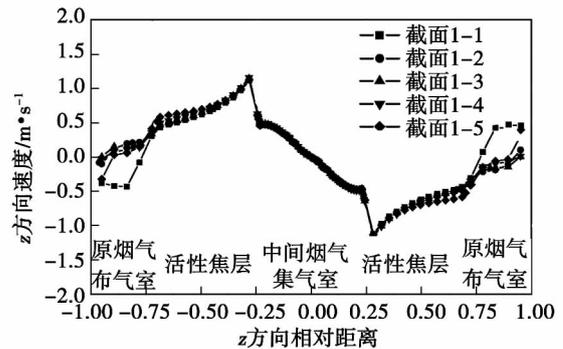


图 11 吸附塔下段  $z$  方向速度场(1 500 Pa)  
Fig. 11 Velocity field (1 500 Pa) in the lower section of the tower in the  $z$  direction

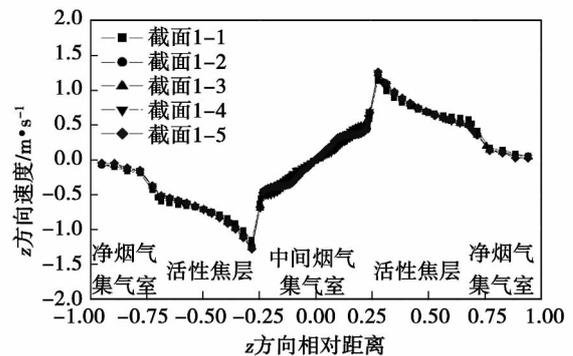


图 12 吸附塔上段  $z$  方向速度场(1 500 Pa)  
Fig. 12 Velocity field (1 500 Pa) in the upper section of the tower in the  $z$  direction

### 2.4 工况二压力场模拟结果分析

图 13 为  $z = 0$  截面上压力等值线图,对比图 7 结果可知,由于床层压力的增加,进口原烟气动量的影响被弱化,压力场分布更加均匀,压力损失沿活性焦床层深度方向的分布更加均匀。图 14 为脱硫塔进出口中心截面上的压力分布图,活性焦床层在原烟气迎风面上局部的高压控制区消失,气流分布更加均匀。

## 3 结 论

根据以上数值模拟结果,得出以下结论:

- (1) 烟气进入吸附塔,由于流速迅速降低,在活性焦阻力的作用下,塔内气流分布均匀,这对保证脱

硫效率和活性焦利用率具有重要意义;

(2) 床层阻力对塔内气流分布特性影响较大,新鲜活性焦条件下,吸附塔内存在局部气流过大的现象,随着系统长期运行,塔内阻力增加,流场趋于均匀;

(3) 根据本模拟结果可知,两种工况下,吸附塔内流场分布都比较均匀,仅在吸附塔入口由于烟气流速过大可能产生局部不均匀的现象,可以考虑在入口增加扰流装置,使塔内气流更为均匀。

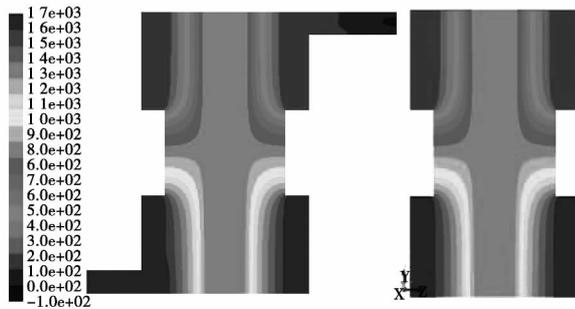


图 13 工况二脱硫塔压力分布等值线图 (z=0,x=0 平面,Pa)

Fig. 13 Chart showing the isolines of the pressure distribution in the desulfurization tower under the operating condition No. 2 (z=0,x=0,Pa)

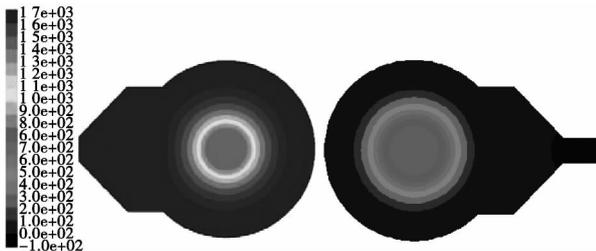


图 14 1-1 和 2-5 截面压力分布等值线图 (Pa)

Fig. 14 Chart showing the isolines of the pressure distribution in the cross-section No. 1-1 and 2-5 (Pa)

参考文献:

[1] 梁大明. 活性焦干法烟气脱硫技术[J]. 煤质技术 2008(6): 48-51.

LIANG Da-ming. Active coke dry-method flue gas desulfurization technology[J]. Coal Quality Technology. 2008 6: 48-51.

[2] Joseph A. DeBarr, Anthony A. Lizzio. Adsorption of SO<sub>2</sub> on Bituminous Coal Char and Activated Carbon Fiber[J]. Energy & Fuels, 1997, 11(2): 267-271.

[3] 翟尚鹏,刘静,杨三可,等. 活性焦烟气脱硫技术及其在我国的应用前景[J]. 化工环保. 2006 26(3): 204-208.

ZHAI Shang-peng, LIU Jing, YANG San-ke, et al. Activated coke flue gas desulfurization technology and its application prospects in China[J]. Environmental Protection in Chemical Industry, 2006, 26(3): 204-208.

[4] Yuwen Zhu, Jihui Gao, Yang Li, et al. Preparation and characterization of activated carbons for SO<sub>2</sub> adsorption from Taixi anthracite by physical activation with steam. Korean[J]. Chem. Eng. 2011, 28(12): 2344-2350.

[5] 孙静,徐铮. 活性炭材料在火电厂烟气脱硫脱硝中的应用[J]. 电力环境保护, 2008, 24(1): 5-7.

SUN Jing, XU Zheng. Applications of activated carbon materials in denitration and desulfurization of flue gases in thermal power plants[J]. Electric Power Environmental Protection, 2008, 24(1): 5-7.

[6] 张方炜. 活性焦干法烟气脱硫技术的应用现状[J]. 热力发电, 2012 41(6): 6-7.

ZHANG Fang-wei. Status Quo of the applications of activated coke dry-method flue gas desulfurization technology [J]. Thermal Power Generation 2012 41(6): 6-7.

[7] 赵恩婵. 600 MW 机组活性焦烟气脱硫方案及经济分析[J]. 热力发电, 2008, 37(9): 1-9.

ZHAO En-chan. Activated coke flue gas desulfurization scheme for a 600MW unit and its economic analysis[J]. Thermal Power Generation 2008, 37(9): 1-9.

[8] 唐夕山,刘静,石坤. 活性焦脱硫吸附塔气相流场分析[J]. 华电技术, 2009, 31(12): 4-7.

ANG Xi-shan, LIU Jing, SHI Kun. Analysis of the gas-phase flow field in activated coke desulfurization absorption tower[J]. China Electric Power Technology 2009 31(12): 4-7.

[9] 魏星,翟尚鹏,刘静,等. 多台活性焦脱硫塔烟气分布的数值模拟研究[J]. 华电技术, 2011, 33(4): 59-62.

WEI Xing, ZHAI Shang-peng, LIU Jing, et al. Numerical simulation study of the distribution of flue gases in several activated coke desulfurization tower[J]. China Electric Power Technology, 2011, 33(4): 59-62.

(陈滨 编辑)

ucation Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) ,LU Xiu-rong ,LAO Guo-rui ( China Kunlun Engineering Company ,Beijing ,China ,Post Code: 100037) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(4) . -380 -384

For an organic working medium Rankine cycle power generation system with the waste heat from the aromatic hydrocarbon distillation process serving as the heat source ,established was a mathematical model ,calculated and compared were such parameters as the working pressure ,expansion ratio and system efficiency etc. of several working media including R600a ,R601 and R245fa and analyzed and verified was the influence of the flow resistance of the working media and several commonly-seen cooling modes on the working parameters and efficiency of the system. It has been found that when the evaporation temperature of the working medium falls in a range from 90 to 130 °C ,under the condition of the condensing temperature being 45 °C ,the flow resistance loss will lead to a decrease in the power generated by the system and its efficiency by about 1.5% to 9.2% and 1.7 to 9.3 % respectively. The power consumption of the circulating water cooling system will account for a maximal proportion of the power generated by the system ( i. e. power consumption ratio) ,attaining 7.6 % to 13.7 % and the power consumption ratio of the once-through water cooling system will be minimal ,being about 3.6% to 4.9% . Compared with the direct air cooling mode ,the wet type air cooling mode can enhance the power generation efficiency of the system by 40.4% to 47.7% when the ambient temperature is higher than 30 °C. **Key Words:** aromatic hydrocarbon distillation ,low temperature waste heat ,organic Rankine cycle power generation system ,resistance loss ,cooling mode

**新型活性焦脱硫吸附塔内气流均布特性数值模拟研究 = Study of the Numerical Simulation of the Uniform Distribution Characteristics of a Flue Gas Flow in a New Type Active Coke Desulfurization and Adsorption Tower** [刊 汉]LEI Ming ,LI Yang ,FAN Qing-wei ,DAN Hui-jie ( Xi'an Thermodynamics Academy Co. Ltd. ,Xi'an ,China ,Post Code: 710032) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(4) . -385 -390

By using the fluid simulation software Fluent ,a numerical simulation study was performed of the distribution characteristics of a gas flow in a new type active coke desulfurization and adsorption tower. It has been found that when the flue gases enter into the adsorption tower ,the flue gas flow speed will quickly drop under the action of the bed resistance ,the flue gas flow will uniformly pass through the active coke layer. The bed resistance will greatly influence the flue gas flow distribution. The bigger the resistance ,the more uniform the flue gas flow in the tower. Moreover ,the local non-uniform phenomena of the flue gas flow in the tower can be changed by retrofitting the inlet structure or additionally installing a flow disturbing device. **Key Words:** active coke ,flue gas desulfurization ,gas flow distribution ,numerical simulation