

1-3-2019

Design and Research on Mechanism Model of Cyclone

Zhang Yue

Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Han Pu

Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Research on Mechanism Model of Cyclone

Abstract

Abstract: The operating characteristics of the cyclone separator greatly affect the overall operating efficiency of the boiler, the gas-solid two-phase flow in the cyclone separator is complicated by the vortex flow. The mathematical model of different angles has been too complicated or one-sided to show its running mechanism. *A mechanism model of the internal parameters of a cone assembly and a counter current cyclone separator has been established. The three cutting diameter calculation methods have been compared for grade separation efficiency. The pressure drop has been combined with the pressure drop of the subdivision of the system structure, and the calculation model for different parts has been presented. The exothermic process of combustible particles has been embodied in the heat transfer model.* By means of simulation, the outputs of the model with different inputs have been analyzed, which shows that the model can reflect the operating characteristics of the cyclone separator with higher precision.

Keywords

cyclone, cylinder cone assembly, counter current, mechanism model

Recommended Citation

Zhang Yue, Han Pu. Design and Research on Mechanism Model of Cyclone[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1672-1680.

旋风分离器机理模型设计与研究

张悦, 韩璞

(华北电力大学 河北省发电过程仿真与优化控制工程技术研究中心, 河北 保定 071003)

摘要: 旋风分离器的运行特性在很大程度上影响流化床锅炉的整体运行效率, 其内部的气固两相流呈现复杂的旋涡流动。不同角度的数学模型在展现其运行机理时过于复杂或者片面。对一种筒锥组合、逆流式旋风分离器, 进行结构细分, 建立其内部参数的机理模型。对于分级分离效率比较了三种切割粒径的计算方法, 对于压降进行了结合系统结构的压降细分, 并给出不同部分的压降计算模型, 传热模型考虑了可燃颗粒的放热过程。借助于仿真, 分析了不同输入下模型的输出结果, 表明该机理模型能够体现旋风分离器的运行特性, 并且模型具备较高的精度。

关键词: 旋风分离器; 筒锥组合; 逆流式; 机理模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)05-1672-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.2018050007

Design and Research on Mechanism Model of Cyclone

Zhang Yue, Han Pu

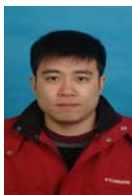
(Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The operating characteristics of the cyclone separator greatly affect the overall operating efficiency of the boiler, the gas-solid two-phase flow in the cyclone separator is complicated by the vortex flow. The mathematical model of different angles has been too complicated or one-sided to show its running mechanism. A mechanism model of the internal parameters of a cone assembly and a counter current cyclone separator has been established. The three cutting diameter calculation methods have been compared for grade separation efficiency. The pressure drop has been combined with the pressure drop of the subdivision of the system structure, and the calculation model for different parts has been presented. The exothermic process of combustible particles has been embodied in the heat transfer model. By means of simulation, the outputs of the model with different inputs have been analyzed, which shows that the model can reflect the operating characteristics of the cyclone separator with higher precision.

Keywords: cyclone; cylinder cone assembly; counter current; mechanism model

引言

旋风分离器广泛应用于轻工业和重工业, 用于



收稿日期: 2016-06-12 修回日期: 2016-10-10;
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金
(2015MS65);

作者简介: 张悦(1980-), 男, 河北安国, 博士, 讲师, 研究方向为复杂系统建模与控制; 韩璞
(1959-2017), 男, 河北平泉, 学士, 教授, 研究方向为现代控制理论。

收集细微的颗粒, 是气固分离领域首选的分离设备, 同时也可以用于工艺过程中的除雾, 洗涤以及液体组分分离, 近些年, 还被用于将泡沫分离成气相和液相组分。在循环流化床锅炉中, 旋风分离器处于物料循环的重要环节, 其运行工况的好坏在很大程度上影响锅炉的运行稳定性和效率, 高精度的旋风分离器模型对于模拟流化床锅炉物料循环过程具有关键性作用, 尤其体现在循环流化床机组仿

<http://www.china-simulation.com>

• 1672 •

真系统中。

旋风分离器的工作原理是依靠作用在旋转流场内颗粒上的离心力,使得密度比空气大的颗粒向外运动到旋风分离器的器壁,然后再沿器壁向下运动到排料口,逆流式旋风分离器,净化后的空气沿中心轴线由顶部升气管排出,因此在旋风分离器内存在复杂的气固两相流的旋涡流动。

针对于旋风分离器,已经有很多成熟的经验模型用于预测分离器的性能,应用比较广泛的如 Barth, Iozia & Leith, Shepherd & Lapple, Cacal & Martinez 等^[1]。然而,这些经验模型建立在研究者各自研究的旋风分离器模型基础上,因此在推广到别的旋风分离器时具有一定的局限性。几十年积累的研究结果表明,旋风分离器内的气体流态已经研究的非常清楚,其速度场分布可以借助于热线风速仪,皮托管以及激光多普勒测速仪来测量^[1]。而流场中的颗粒轨迹,其相对成熟的实验数据或者测量方法较少,电容层析成像技术是近些年发展起来的一项新的浓度测量技术^[2],已经被用于气固、气液两相流测量中,但是该研究还处于起步阶段,对于测量呈现出的信息,并没有完全利用,局部的固相流态还有待进一步完善,目前,借助于计算流体力学(CFD)来分析颗粒运动的轨迹是研究颗粒流动较为有效的手段^[3-5]。其计算精度和网格划分有密切的关系,计算网格划分足够细,其模拟结果精度也会很精确,但是带来的计算量会成倍的增加,其模拟结果很难用于火电机组仿真机等实时仿真的场合。

本文针对流化床锅炉中一类常见的筒锥组合,逆流结构的旋风分离器,深度分析其结构组成特点,利用机理建模方法,建立旋风分离器的主要参数的数学模型,模拟分离效率、压降和旋风分离器内部的换热过程,最后通过仿真,展现了外部条件变化对模型输出的影响,得到的模型完全可以用于设计火电机组仿真机中的旋风分离器模型。

1 旋风分离器结构

离心式分离器在工业现场应用较为广泛,其结

构特征主要体现在入口结构形式,分离器本体形状和气流进出方向。其中矩形入口,筒锥组合,逆流式结构的旋风分离器应用最广泛。图1是一种矩形入口旋风分离器的结构简图。图中: D 是旋风分离器本体直径; H 是旋风分离器总高; D_x 是升气管直径; a 和 b 分别是入口截面的高度和宽度; H_c 是锥体段高度; D_d 是排尘口直径; H_i 是升气管下口距离除尘口的高度; S 是升气管插入深度。

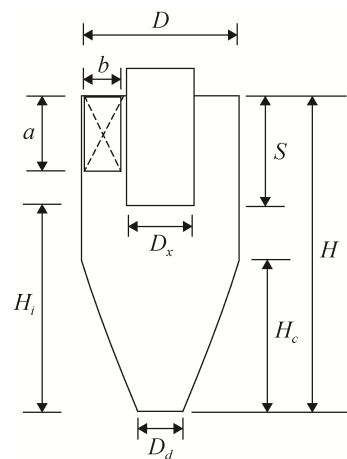


图1 矩形入口旋风分离器结构简图

Fig. 1 Structure of cyclone with rectangular entrance

图2是典型筒锥组合旋风分离器的俯视图,图中: R 是旋风分离器筒体部分的半径; R_x 是旋风分离器升气管部分的半径; $R_{in}=(R-b/2)$, v_{in} 旋风分离器入口速度; $v_{\theta CS}$ 旋风分离器升气管柱面上的切向速度; $v_{\theta w}$ 是器壁表面的切向速度。

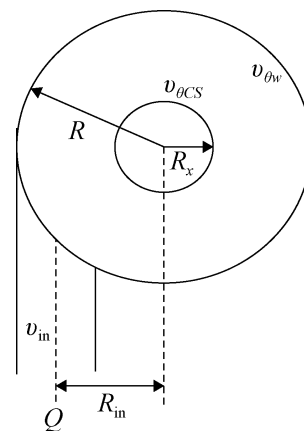


图2 典型筒锥形旋风分离器俯视图

Fig. 2 Top view of typical cone cyclone

2 旋风分离器分离效率模型

2.1 旋风分离器内的动态质量平衡方程

根据循环流化床锅炉循环回路物料动态平衡，建立如下平衡方程^[6]：

$$\frac{dW_{cs}}{dt} = W_{in} - W_{cb} - W_{pl} - W_{gl} \quad (1)$$

则第*i*级颗粒组的质量平衡方程为

$$\frac{dW_{cs,i}}{dt} = W_{in,i} - W_{cb,i} - W_{pl,i} - W_{gl,i} \quad (2)$$

$W_{in,i}$ 为第*i*级颗粒分离器进口烟气流质量流量， $W_{cb,i}$ 为第*i*级颗粒在分离器中由于燃烧损失的颗粒质量流量，可以按照下式计算：

$$W_{cb,i} = 1.2 \times 10^{-2} n_i R_{c,i} \quad (3)$$

式中： $R_{c,i}$ 为第*i*级颗粒的可燃物燃烧反应速率，可以看作是可燃物颗粒总质量，分离器内温度，以及氧气浓度的函数^[7]； n_i 为第*i*级颗粒的可燃物数量。

分离器出口排出的飞灰质量为：

$$W_{gl,i} = (1 - \eta_i)(W_{in,i} - W_{cb,i}) \quad (4)$$

进入下一级返料阀的颗粒质量为：

$$W_{pl,i} = \eta_i(W_{in,i} - W_{cb,i}) \quad (5)$$

式中： η_i 为旋风分离器分级效率，与分离器结构、入口烟气参数有密切关系。显然旋风分离器分级效率应该是旋风分离器机理模型中的最为重要的参数。

2.2 旋风分离器分级效率

许多研究结果表明^[8-10]，旋风分离器的分级效率呈现典型的S形，如图3。

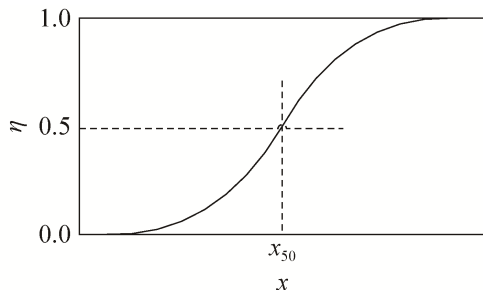


图3 典型旋风分离器分级效率曲线
Fig. 3 Classification efficiency curve of typical cyclone

可以利用切割粒径 x_{50} 来拟合这个曲线。

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (\frac{x_{50}}{x_i})^m} \quad (6)$$

诸多研究表明，进入旋风分离器的湍流气体所携带颗粒量的能力取决于颗粒的质量平均粒径 x_{med} ，切割粒径 x_{50} ，但是通过分级效率的曲线特点，显然与入口浓度 c_0 也有很多的关系，这个极限入口浓度为：

$$c_{0L} = 0.025(\frac{x_{50}}{x_{med}}) \times (10c_0)^k, \quad (7)$$

$$k = -0.11 - 0.10 \ln c_0$$

因此在设计模型时应当加入浓度对分级效率的影响：(1)当 $c_0 < c_{0L}$ 时，在旋风分离器的进口区域不会出现颗粒沉降，可以利用上式计算 η_i ；(2)当 $c_0 > c_{0L}$ 时，则发生沉降，旋风分离器的总效率分成了两段，颗粒沉降产生的效率和内旋涡旋转产生的效率。总效率计算如下

$$\eta = (1 - \frac{c_{0L}}{c_0}) + (\frac{c_{0L}}{c_0}) \sum_{i=1}^N \eta_i \times \Delta MF_i \quad (8)$$

2.3 切割粒径 x_{50} 计算

旋风分离器切割粒径 x_{50} 的计算方法主要依赖两大类模型：“平衡轨道”模型和“停留时间”模型。“平衡轨道”模型是将升气管向下延伸到旋风分离器的底部形成一个圆柱面 CS，然后对处于半径为 $R_x = 0.5D_x$ 圆柱面 CS 上的旋转颗粒建立力的平衡分析得到。“停留时间”模型考虑颗粒向器壁的移动，忽略向内流动气体速度的影响，认为颗粒在分离器内部有足够的停留时间径向运动到器壁，并在旋风分离器的底部被捕捉。

Barth 模型利用“平衡轨道”模型理论，给出了切割粒径 x_{50} 的计算公式。

$$x_{50} = (\frac{v_{rCS} 9 \mu D_x}{\rho_p v_{\theta CS}^2})^{0.5} \quad (9)$$

$$v_{rCS} = \frac{Q}{\pi D_x H_{CS}}$$

$$v_{\theta CS} = \frac{v_{\theta w}(R/R_x)}{(1 + H_{CS} R \pi f v_{\theta w}/Q)}$$

$$v_{\theta w} = \frac{v_{in} R_{in}}{R(1 - 0.4(b/R)^{0.5})}$$

$$f = f_{air} + f_{dust} = 0.005(1 + 3c_0^{0.5})$$

式中: v_{rCS} 是柱面 CS 上平均径向速度; $v_{\theta CS}$ 是 CS 上的切向速度; $v_{\theta w}$ 是旋风分离器的器壁速度; ρ_p 是颗粒密度; μ 是烟气的粘性系数; Q 是旋风分离器的入口烟气流量; D_x 是升气管直径; H_{CS} 是 CS 柱面的高度; R 是旋风分离器筒体部分的半径; R_x 是旋风分离器升气管部分的半径; b 是入口截面的宽度; f 是器壁摩擦系数; f_{air} 是纯气流的旋风分离器摩擦系数; f_{dust} 是考虑粉料影响的摩擦系数; c_0 是旋风分离器的入口浓度。

利用“停留时间”模型, 切割粒径 x_{50} 的计算式如式(10)。

$$x_{50} = \left(\frac{9b\mu}{6.1\pi(1 - e^{-0.066v_m})v_{in}(\rho_p - \rho)} \right)^{0.5} \quad (10)$$

式中: ρ 是烟气密度。

除了典型的“平衡轨道”模型和“停留时间”模型, 还有综合两种模型特点的混合模型。近些年发展起来的“边界层分离模型”是在“平衡轨道”模型的基础上考虑了近壁处的层流流动, 只要颗粒在离心效应下进入此边界层, 就可以被捕集分离下来。切割粒径 x_{50} 的计算公式^[11]为:

$$x_{50} = 3(0.3465)^{n+1} \left(\frac{\mu D}{5(n+1)\rho_p v_i K_V K_A} \right)^{0.5} \quad (11)$$

$$K_A = \frac{\pi D^2}{4ab}$$

$$K_V = \frac{V_1 + 0.5V_2}{D^3} =$$

$$\frac{\pi}{8} \left\{ \left[1 - \left(\frac{D_x}{D} \right)^2 \right] \times \left(2 \frac{S}{D} - \frac{a}{D} \right) + \left(\frac{H - H_c}{D} - \frac{S}{D} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{S}{D} + \frac{L}{D} - \frac{H - H_c}{D} \right) \times (1 + \tilde{B} + \tilde{B}^2) - \left(\frac{D_x}{D} \right)^2 \frac{L}{D} \right\}$$

$$\tilde{B} = 1 - \frac{(1 - \frac{D_d}{D}) \left(\frac{S}{D} + \frac{L}{D} - \frac{H - H_c}{D} \right)}{\left(\frac{H}{D} - \frac{H - H_c}{D} \right)}$$

$$L = 2.3D_x \left(\frac{D_x^2}{ab} \right)^{1/3}$$

$$n = 1 - (1 - 0.668D^{0.14}) \left(\frac{t_{gas} + 273}{283} \right)^{0.3}$$

式中: ρ_p 是颗粒密度; v_i 是烟气速率; μ 是烟气的粘性系数; t_{gas} 是气固混合物的平均温度; K_A 是进

口截面比; K_V 为无因次分离空间; V_1 为分离器入口高度一半以下的环形空间体积; V_2 为分离器排气管下口以下的分离空间体积与内旋流的体积之差; L 是自然旋风长^[11-12]; B 是 L 处的锥体直径。如果 $L > H_i$, 则 $L = H_i$ 并且 $B = D_d/D$ 。

2.4 切割粒径 x_{50} 计算对比

选择某高效率旋风分离器, 其结构参数如表 1 所示^[1]。

表 1 旋风分离器结构参数
Tab. 1 Structure parameters of cyclone

序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	D	0.2 m	7	H	0.8 m
2	D_x	0.1 m	8	H_c	0.5 m
3	D_d	0.075 m	9	v_m	10 m/s
4	S	0.1 m	10	ρ_p	2 030 kg/m ³
5	a	0.1 m	11	c_0	0.002 5 kg/m ³
6	b	0.04 m			

分别按照上述的三种模型计算切割粒径 x_{50} , 并按照式(6)计算分级效率, 对比曲线如图 4。

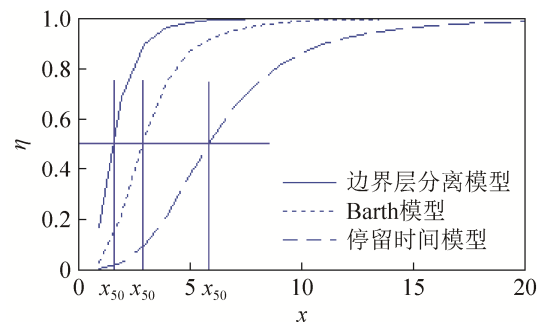


图 4 旋风分离器多种模型分级效率对比曲线
Fig. 4 Comparison curve of classification efficiency of cyclone

对应切割粒径 x_{50} 的数值如表 2。

表 2 切割粒径 x_{50} 数值对比

切割粒径	边界层分离模型/ μm	Barth模型/ μm	停留时间模型/ μm
x_{50} 值	1.595 8	2.923 3	5.891 2

三种计算方法, “边界层分离模型”和采用“平衡轨道”理论的“Barth 模型”, 其计算结果较为接

近,“停留时间模型”计算结果和另外两种方法得到结果偏差较远,对比三种方法的计算过程,“边界层分离模型”在计算过程中加入了入口烟气温度的影响,因此在后面的模型仿真中采用“边界层分离模型”来计算旋风分离器的分级分离效率。

3 旋风分离器压降计算

旋转运动的存在使得旋风分离器的压降问题变的复杂,一般将旋风分离器的压降划分成三个部分:进口压降 Δp_{acc} ,旋风分离器本体压降 Δp_{body} 和升气管压降 Δp_x 。

$$\Delta p = \Delta p_{acc} + \Delta p_{body} + \Delta p_x \quad (12)$$

进口压降 Δp_{acc} 相比较后面两种压降,数值较小,可以忽略不计,并且进口压降可以通过优化旋风分离器入口结构设计来进一步减小^[13]。某些旋风分离器,气固两相混合物需要从外部的低速区加速运动后,再进入旋风分离器的本体,这样可以在低速区 v_1 和高速区 v_2 之间建立能量平衡方程式,则入口加速压力损失为:

$$\Delta p_{acc} = (1 + c_0) \frac{\rho(v_2^2 - v_1^2)}{2} \quad (13)$$

旋风分离器本体压降 Δp_{body} 主要是由于本体摩擦表面上旋转速度损失的结果,可以表示为:

$$\Delta p_{body} = \frac{f A_R \rho (v_{\theta w} v_{\theta CS})^{1.5}}{2 \times 0.9 Q} \quad (14)$$

式中: f 是器壁摩擦系数; A_R 是有摩擦阻力存在的旋风分离器内部总面积,它包括顶板 A_{roof} 、筒体 A_{barrel} 和锥体的内表面 A_{cone} 以及升气管的外表面 A_{vt} 。

$$A_R = A_{roof} + A_{barrel} + A_{cone} + A_{vt} = \pi[(R^2 - R_x^2) + 2R(H - H_c) + (R + R_d)\sqrt{H_c^2 + (R - R_d)^2} + 2R_x S] \quad (15)$$

升气管的压降计算,主要是计算升气管中的静压损失,而不是摩擦损失。多采用“涡核流动模型”,假设的前提条件是升气管中的流动是由无黏性,轴对称,均匀轴向速度的外部环流与轴向速度可以忽略的内部涡核构成。因此 Δp_x 的计算要体现轴向速

度和切向速度两个速度分量对静压的影响。

$$\Delta p_x = \frac{\rho v_x^2}{2} \left[2 + \frac{v_{\theta CS}^2}{v_x^2} + 3 \left(\frac{v_{\theta CS}}{v_x} \right)^4 \right]$$

$$v_x = \frac{v_m ab}{\pi R_x^2} \quad (16)$$

式中: v_x 是升气管平均轴向速度; $v_{\theta CS}$ 是升气管半径处的切向速度,同样描述了柱面CS上的切向速度。

4 旋风分离器传热模型

借助于前面对循环物料在旋风分离器中动态质量平衡分析,虽然烟气在旋风分离器中停留时间较短,并且该处的氧含量不高,烟气中的组分在旋风分离器中的燃烧和放热过程可以忽略^[14]。但是实际运行结果表明,旋风分离器部分的烟气温度的有变化的,显然烟气中的组分在旋风分离器中的燃烧和放热过程也不应该完全忽略,分离器中的气固混合物的能量守恒方程为:

$$\frac{d(V_{gas} \rho_{gas} C_p t_{gas})}{dt} = Q_{in} + Q_{burn} - Q_{out} - Q$$

$$Q = \alpha_1 H (t_{gas} - t_w)$$

$$Q_{burn} = \sum W_{cb,i} \times H_i \quad (17)$$

式中: Q_{in} 是烟气带入分离器的热量; Q_{burn} 是烟气中可燃组分燃烧释放的热量; Q_{out} 是烟气带出分离器的热量; Q 是分离器的吸热量; V_{gas} 是分离器中的烟气体积; $\rho_{gas} = 352.989 / (t_{gas} + 273)$ 是烟气平均密度,可以近似计算; C_p 是烟气的比容; t_{gas} 是出口烟气温度; α_1 是烟气对分离器壁的放热系数; H 是分离器换热面积; t_w 分离器壁温; H_i 是第 i 级颗粒单位发热量, $W_{cb,i}$ 为第 i 级颗粒在分离器中由于燃烧损失的颗粒质量流量,可以按照(3)式计算。第 i 级颗粒的可燃物燃烧反应速率 $R_{c,i}$,其计算公式为:

$$R_{c,i} = \frac{6 M_{c,i} k_{c,i} C_{o_2} B_i}{d_{c,i} \rho_{c,i}}$$

式中: B_i 是未燃烧的可燃物颗粒量; $M_{c,i}$ 是可燃物摩尔质量; $k_{c,i}$ 是可燃物燃烧速率常数; d_c 是可燃物颗粒平均粒径; C_{o_2} 是氧气浓度; $\rho_{c,i}$ 可燃物颗粒密度。

分离器壁包括耐火材料的换热模型:

$$\frac{d(M_m C_{pm} t_w)}{dt} = Q - Q_1$$

$$Q_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_s}{\lambda_s}} H(t_w - t_0) \quad (18)$$

式中: $M_m C_{pm} t_w$ 是耐火材料和管壁的总蓄热量; λ_s 、 δ_s 是耐火材料的导热系数和耐火泥厚度; t_0 分离器外部温度。

5 模型仿真

利用前面的机理分析, 建立旋风分离器的机理模型, 设计针对于该机理模型的模块化实时仿真算法如图 5。

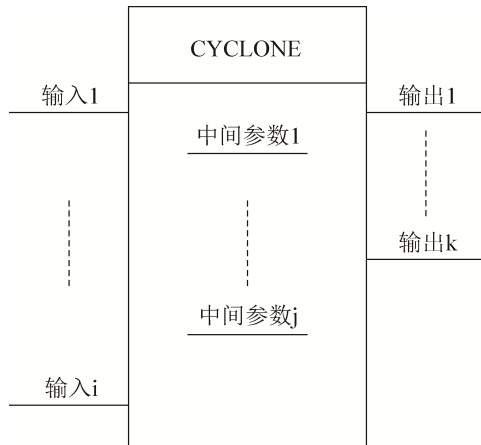


图5 旋风分离器模块化算法
Fig. 5 Modular algorithm of cyclone

设计输入参数、中间可调整参数以及输出结果参数如表 3。

选定旋风分离器的结构参数如表 4。

反映旋风分离器重要特征的分离效率, 其影响因素主要包括进口风速, 烟气温度, 中心管长度和直径^[15], 旋风分离器筒体直径^[11,16-18]。分别做这些因素变化对分离效率的影响见图 6, 并总结了影响因素变化对分离效率的影响见表 5。

设定进入旋风分离器的烟气固相组分主要包括碳颗粒, 石灰石颗粒, 飞灰颗粒和底灰颗粒四种。为了验证颗粒粒径对分离效率的影响, 设定四种组分的空气动力粒径大小不同, 介于 57 μm ~215 μm ,

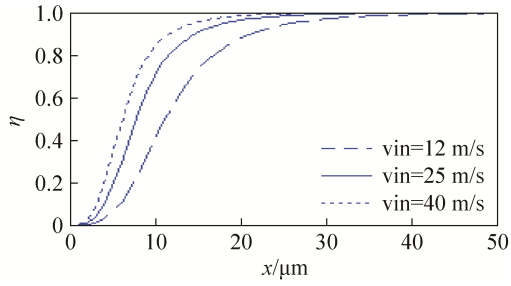
入口烟气质量流量 75 t/h, 入口烟气温度为 880 $^{\circ}\text{C}$, 组成成分及比重如表 6。

表 3 模块参数定义
Tab. 3 Module parameters definition

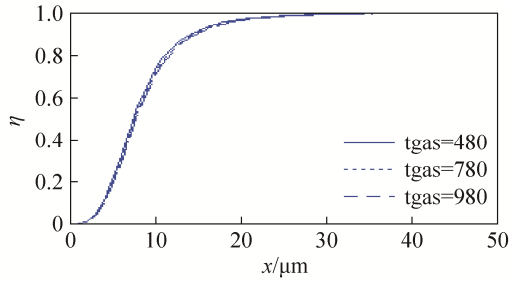
类型	序号	名称
输入参数	1	入口烟气总质量流量
	2	入口烟气温度
	3	入口烟气压力
	4	入口烟气焓值
	5	入口烟气固相组分不同组成粒径质量流量
	6	入口烟气气相组份份额
	7	环境温度
中间参数	8	入口烟气固相组分不同组成粒径平均粒径
	9	入口截面高度 a
	10	入口截面宽度 b
	11	本体直径 D
	12	总高 H
	13	升气管直径 D_x
	14	锥体段高度 H_c
	15	排尘口直径 D_d
	16	升气管插入深度 S
	17	升气管下口距离除尘口高度 H_i
	18	分离器金属比容
	19	入口烟气流速
	20	颗粒密度
	21	极限入口浓度
输出参数	22	旋风分离器切割粒径 x_{50}
	23	旋风分离器分离效率
	24	出口烟气流量
	25	出口烟气压力
	26	出口烟气温度
	27	出口烟气焓值
	28	出口烟气固相各组分质量流量
	29	出口烟气气相各组分份额
	30	旋风分离器本体压降
	31	旋风分离器升气管压降
	32	旋风分离器本体壁温

表 4 旋风分离器结构参数
Tab. 4 Structure parameters of cyclone

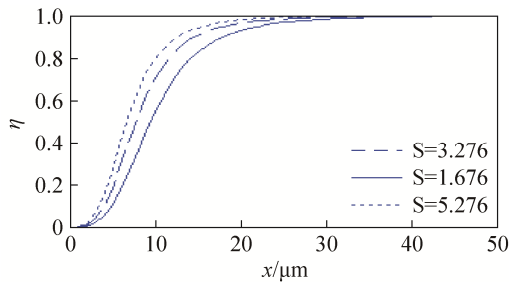
序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	D	5.46 m	6	b	3.958 m
2	D_x	2.566 m	7	H	3.958 m
3	D_d	0.797 m	8	H_c	11.739 m
4	S	3.276 m	9	v_{in}	25 m/s
5	a	4.095 m	10	ρ_p	2 030 kg/m^3



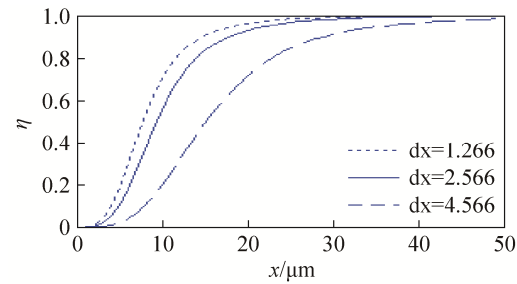
(a) 进口风速变化对分离效率影响



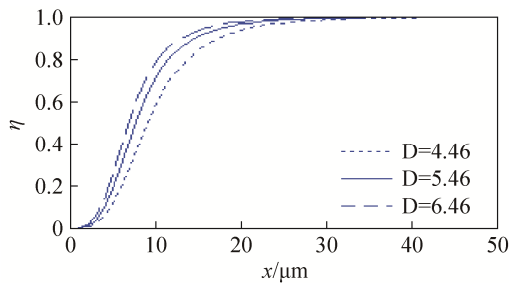
(b) 烟气温度变化对分离效率影响



(c) 中心管长度变化对分离效率影响



(d) 中心管直径变化对分离效率影响



(e) 旋风分离器筒体直径对分离效率影响

图6 旋风分离器分离效率影响因素曲线

Fig. 6 Influence factor curves of separation efficiency of cyclone

表5 分离效率影响因素表

Tab. 5 Table of influencing factors of separation efficiency

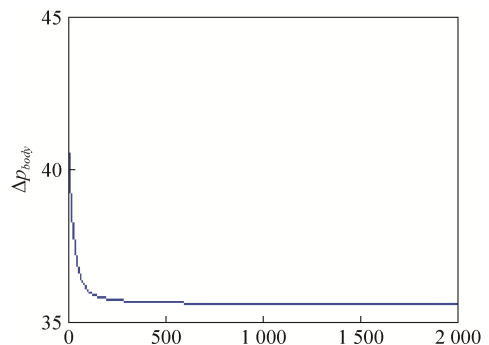
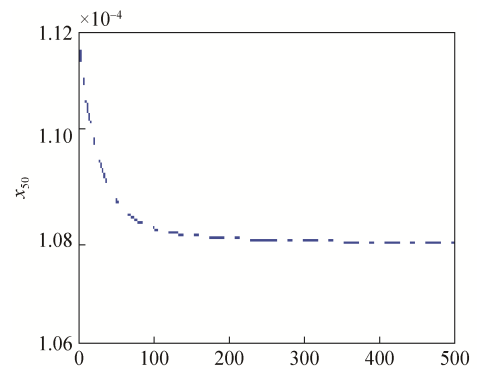
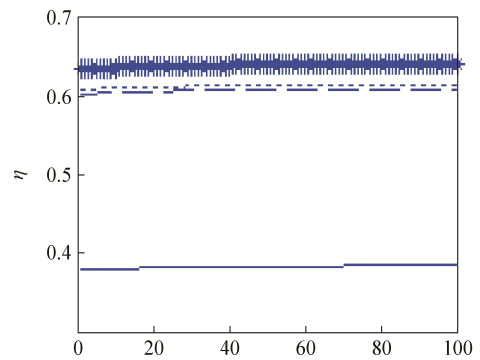
序号	影响因素	变化趋势	分离效率变化趋势
1	进口风速	增加	增加
2	烟气温度	增加	影响很小
3	中心管长度	增加	增加
4	中心管直径	增加	减小
5	筒体直径	增加	增加

表6 入口烟气成分及比例

Tab. 6 Composition and proportion of entrance flue gas

序号	成分	比例%	平均粒径(μm)
1	碳颗粒	3	190
2	石灰石颗粒	0.5	185
3	飞灰颗粒	43	215
4	底灰颗粒	57	57

模型主要参数的变化趋势如图7所示。



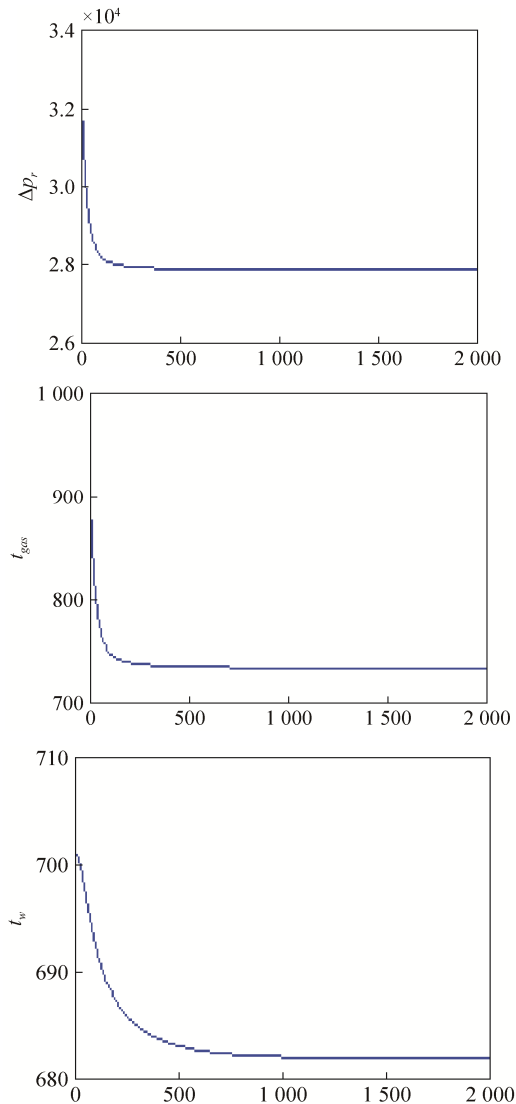


图7 旋风分离器主要参数变化趋势

Fig.7 Main parameters' variation trends of cyclone

分离器内的可燃颗粒分布较少,因此其出口温度呈现下降的趋势,并且升气管压降比旋风分离器本体压降从数值上要大很多,呈现数量级的差距。

6 结论

本文针对于一类循环流化床锅炉中常见的旋风分离器,对其组成结构进行细分,通过机理分析的方法建立其内部运行参数模型,体现分离效率、压降和内部传热过程。机理模型反映了输入信号以及结构特征对运行参数的影响关系,能够在一定程度上体现旋风分离器的工作原理,但是机理建模过程对旋风分离器内部的气固两相流的复杂旋涡运

动做了一定程度的简化,不像目前流行的CFD方法,能够从微观角度展现其内部气固两相尤其是颗粒相的运动过程。机理建模方法得到的数学模型可以用于火电机组仿真系统以及优化旋风分离器结构设计,这也是下一步理论模型的发展方向,有助于提高理论模型的精度。

参考文献:

- [1] A.C.霍夫曼, L.E.斯坦因. 旋风分离器—原理、设计和工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
Alex C. Hoffmann, Louis E. Stein. Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] 王海刚, 赵国荣, 邱桂芝. 循环流化床多旋风分离器入口电容层析成像测量[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(1): 109-113.
WANG Hai-gang, ZHAO Guo-rong, QIU Gui-zhi. Investigation the Solid Phase Distribution in the Inlet of Multi-Cyclone of a Circulating Fluidised Bed by Electrical Capacitance Tomography[J]. JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS, 2014, 35(1): 109-113.
- [3] 王帅, 罗坤, 杨世亮, 等. 旋风分离器内气固两相流动特性的 LES-DEM 研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(2): 342-346.
WANG Shuai, LUO Kun, YANG Shi-Liang, et al. LES-DEM Investigation of the Gas-Solid Flow Characteristics in a Cyclone Separator[J]. JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS, 2016, 37(2): 342-346.
- [4] 钱付平, 章名耀. 旋风分离器分离性能的经验模型与数值预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 35-39.
Qian Fuping, Zhang Mingyao. Empirical model and numerical prediction for separation performance of cyclone separator[J]. JOURNAL OF SOUTHEAST UNIVERSITY(Natural Science Edition), 2005, 35(1): 35-39.
- [5] 沈贤锋, 刘汉周, 韦维. 单双锥旋风分离器分离性能数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35(10): 824-829.
SHEN Xianfeng, LIU Hanzhou, WEI Wei. Numerical Simulation on Separation Performance of Single-and Double-cone Separators[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(10): 824-829.
- [6] 万里鹏, 苟小龙, 李波, 等. 440 t/h 循环流化床锅炉汽冷式旋风分离器动态仿真[J]. 重庆大学学报(自然科

- 学版), 2006, 29(3): 45-47.
- WAN Li-peng, GOU Xiao-long, LI Bo, et al. Dynamic Modeling and Simulation of 440 t/h Steam-cooled Cyclone Separator for CFB Boiler[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006, 29(3): 45-47.
- [7] 高明明, 岳光溪, 雷秀坚, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(35): 6319-6328.
- GAO Mingmin, YUE Guangxi, LEI Xiujian, et al. Research on Control System of 600MW Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(35): 6319-6328.
- [8] Dirgo J, Leith D. Performance of theoretically optimized cyclones[J]. Filtration and Separation (S0015-1882), 1985, 22(2): 119-125.
- [9] Overcamp T J, Mantha S V. A simple method of estimating cyclone efficiency[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy (S1944-7442), 2010, 17(2): 77-79.
- [10] 陈克俭. 循环流化床锅炉旋风分离器效率的计算[J]. 动力工程, 2003, 23(2): 2346-2349.
- CHEN Ke-jian. The Calculation of Efficiency for CFB-Boil's Cyclone Separator[J]. POWER ENGINEERING, 2003, 23(2): 2346-2349.
- [11] 岑可法, 倪明江, 骆仲泱, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- Cen Kefa, Ni Mingjiang, Luo Zhongyang, et al. Theoretical design and operation of circulating fluidized bed boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [12] 钱付平, 章名耀. 基于响应曲面法旋风分离器的自然旋风长[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 247-251.
- Qian Fuping, Zhang Mingyao. Natural vortex lengths of cyclone separators based on response surface methodology[J]. JOURNAL OF SOUTHEAST UNIVERSITY (Natural Science Edition), 2006, 36(2): 247-251.
- [13] 付焜, 孙国刚, 刘佳, 等. 旋风分离器进口涡旋感生速度场的减阻增效作用[J]. 化工学报, 2011, 62(7): 1927-1932.
- FU Da, SUN Guogang, LIU Jia, et al. Effect of induced velocity on separation efficiency and pressure drop of cyclones caused by vortex in vortex-tube inlet pipe[J]. CIESC Journal, 2011, 62(7): 1927-1932.
- [14] 高建强. 大型循环流化床锅炉实时仿真模型与运行特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- Gao Jianqiang. Study of Real-time Simulation Model and Operation Property for Big Capacity Circulating Fluidized Bed Boiler Unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [15] 张建, 金有海. 排气结构对导叶式旋风分离器的性能预测研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 1214-1217.
- Zhang Jian, Jin Youhai. CFD Analysis on Collection Performance of Swirl Tube with Different Vortex Finder Geometries[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(4): 1214-1217.
- [16] 刘向阳. 固-气旋风分离器分离效率影响的数值分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(1): 68-70.
- Liu Xiangyang. Numerical analysis for separation performance of cyclone separator[J]. Journal of Yangtze University(natural science Edition), 2013, 10(1): 68-70.
- [17] 钱付平, 章名耀. 基于边界层理论旋风分离器分离效率的改进模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 71-75.
- QIAN Fu-ping, ZHANG Ming-yao. An Extended Model for Determining the Separation Efficiency of a Cyclone With Boundary Layer Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 71-75.
- [18] 翟会琴, 许朋, 邱冰冰, 等. 体积流量对旋风分离器影响的模拟分析[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2013, 30(1): 34-37.
- ZHAI Huiqin, XU Peng, QIU Bingbing, et al. Simulation and Analysis of Volume Flow Influencing of Cyclone Separator[J]. Journal of Anhui University of technology (Natural Science), 2013, 30(1): 34-37.