

研究论文

催化裂化沉降器内两端敞开型旋风分离器内气相流动规律

晁忠喜 孙国刚 龚 兵 时铭显
(石油大学(北京)化工学院, 北京 102249)

摘 要 研究考察了催化裂化沉降器内两端敞开型旋风分离器内油气流动规律. 用CFX软件采用DSM模型进行了数值模拟, 并与用五孔探针测试的流场进行了比较, 表明DSM模型有良好的预测精度. 在此基础上, 采用标量输运方程研究了气体在旋风分离器内的停留时间分布规律. 实验和模拟结果均表明, 该类旋风分离器内流场与常规旋风分离器的有很大的不同, 升气管和料腿均存在回流区, 升气管回流区最大可波及分离空间, 对分离空间流场有很大干扰. 气体示踪模拟结果表明, 由入口进入旋风分离器, 由升气管、料腿排出的气体的停留时间近似呈对数正态分布; 升气管、料腿回流区内气体停留时间呈双峰分布; 升气管回流区的存在可使总气体平均停留时间增大约5%~10%; 料腿直径的减小以及灰斗的存在均可增大由升气管排出的气量并使升气管、料腿回流区大幅减小, 进而减小粗旋风分离器内气体总平均停留时间.

关键词 旋风分离器 数值模拟 流场 回流区 停留时间 标量输运

中图分类号 TQ 051.8

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2004)07-1109-08

GAS FLOW BEHAVIOR IN A ROUGH-CUT CYCLONE IN FCC DISENGAGER

CHAO Zhongxi, SUN Guogang, GONG Bing and SHI Mingxian

(Department of Chemical Engineering, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract Gas flow behavior in a rough-cut cyclone in FCC disengager was studied. DSM model provided by CFX 5.5 was adopted to predict the gas flow field, and simulation results were compared with experimental data measured by means of five-hole probe. The comparison verified the good power of DSM model. The simulation and experimental results both revealed great differences between a rough-cut cyclone and a traditional one in terms of flow field. There existed reversed flow in the exit tube and dipleg, which could get to the separation space and strongly disturb the flow field. On the basis of the flow field, scalar transport equation was used to compute the gas residence time distribution. Simulation results of gas tracing showed that residence time distribution of the gas from the inlet and out of the dipleg and exit tube assumed logarithmic normal distribution. Gas residence time of the reversed flow took on a double-peak profile. Average gas residence time was increased by 5%—10% approximately for the existence of reversed flow in the exit tube. Decrease of diameter of the dipleg and existence of a hopper could increase mass flux out of the exit tube as well as decrease the reversed flow distinctly, thus the average gas residence time was decreased significantly.

Keywords cyclone, simulation, flow field, reversed flow, residence time, scalar transport

引 言

旋风分离器是炼油厂流化催化裂化装置的关键设备之一，对其内流场的研究是改进其性能的基础。对于常规旋风分离器（进入的气体只能从升气管一端排出）的流场，国内外众多学者多年来已做了大量研究工作，如姬忠礼^[1]、田彦辉^[2]、魏耀东^[3]等用五孔探针，Zhou^[4]、Hoekstra^[5]、胡砾元^[6]等采用 LDV 技术测试研究了旋风分离器内流场。但在炼油催化裂化反应沉降器内与提升管出口直接连接的第一级旋风分离器却是一类特殊的结构。它的料腿和升气管都敞开在同一空间内，进入的气体是从两端分别流出的。很显然，其中的气体流动肯定有其一定的特殊性，不能简单套用常规旋风分离器的研究结果。而这个问题对于反应后油气的快速引出又是十分重要的，迄今尚无人研究过。近年来，随着原料油日益变重和变劣，催化裂化反应沉降系统内结焦问题日益严重和普遍。因此，仔细考察高温油气在沉降器内的停留时间分布及其影响因素，对于减小裂化反应后油气停留时间进而减少结焦具有重要意义，然而，这方面的专门研究还很少有报道。有研究者^[7]采用微颗粒示踪的方法用颗粒轨道模型计算颗粒的停留时间。由于颗粒流动相对于气相流动的滞后性，这种方法仅可在一定程度上反应气体的停留时间特性。Lans^[8]、Lede^[9]分别采用气体示踪的方法测试了冷态旋流燃烧器和高温旋流反应器内气体停留时间分布规律，并根据实验结果给出了计算停留时间分布的经验公式。实验获得的停留时间是在流场关键点上测试结果的总结，不够全面。本文旨在结合实验与数值模拟方法研究旋风分离器内流场分布规律及全面考察气相停留时间分布规律。

1 两端敞开型旋风分离器内稳态流场的模拟与实验检验

实践表明^[4,5,10]各向异性的湍流 ASM、DSM 模型对强旋流有良好的预报精度，而其他基于湍流脉动的各向同性假设的模型则不适合于预测强旋流场的旋风分离器内流场。因此，本文选择 DSM 模型模拟该类旋风分离器内流场。

1.1 两端敞开型旋风分离器几何模型

实验和模拟工作是针对图 1 所示的升气管、料腿两端敞开的冷态模型（直径为 500 mm）进行的。

为研究料腿直径大小、灰斗的存在与否对旋风分离器流场的影响，考察了表 1 所示的 4 种结构的旋风分离器。

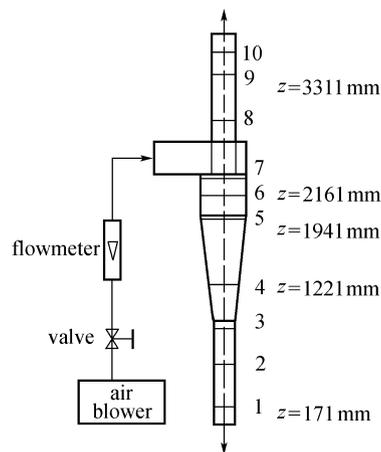


Fig. 1 Schematic diagram of the rough-cut cyclone separator

Table 1 Four different rough-cut cyclones

Cyclone	d_r /mm	d_o /mm	Existence of hopper
1	240	190	no
2	240	190	yes
3	240	240	no
4	240	240	yes

1.2 控制方程、边界条件、差分格式及网格

(1) 控制方程

控制方程有连续方程、动量方程、雷诺应力输运方程和湍流耗散率方程。具体形式参考文献 [10]。

(2) 边界条件

① 入口边界条件 入口给充分发展矩形管流速速度边界条件。

$$u_i = K v_i \{1 - [(x - x_0)/a]^m\} \{1 - [(y - y_0)/b]^n\}$$

入口处的雷诺应力 $\overline{u_i u_j}$ 和湍流耗散率 ϵ 则可通过湍流强度 I 和水力直径 D_h 间接给出。经验公式为

$$\overline{u_i u_j} = k = \frac{3}{2} I^2 v_i, \epsilon = \frac{k^{3/2}}{0.3 D_h}$$

式中 $I = 0.037$ 。

② 升气管、料腿出口边界条件 参考喷嘴旋转射流边界条件的处理，在升气管出口，料腿出口处接一较大的圆柱体空间，并对整个柱体表面给出压力边界条件： $p_1 = p_2 = 101325 \text{ Pa}$ （图 2）， $\overline{u_i u_j}$ 和 ϵ 的处理同入口。

③ 壁面边界条件 壁面处采用无滑移边界条件， $\varphi = 0$ ；对于壁面附近黏性支层采用 CFX 软件

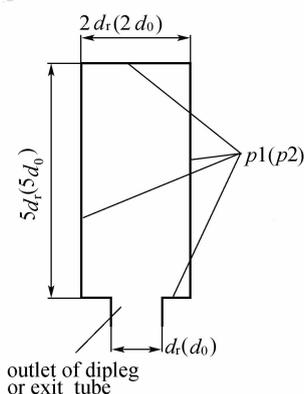


Fig. 2 Boundary conditions of outlets of exit tube and dipleg

提供的标准壁函数处理。

(3) 差分格式

对各方程对流项均采用二阶差分格式。

(4) 网格生成

建立网格系统时使用了贴体坐标的概念，在具体实施时，考虑到入口蜗壳部分与简体连接的尖锐程度，整体生成网格比较紊乱，网格质量难以保证。故将两部分分别生成网格（图 3，图 4），在交界面上，利用坐标组合法的思想采用插值方法建立各节点间的联系。

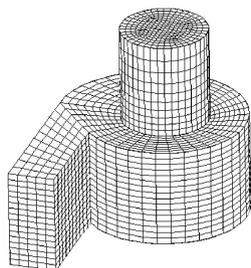


Fig. 3 Mesh in spiral inlet system

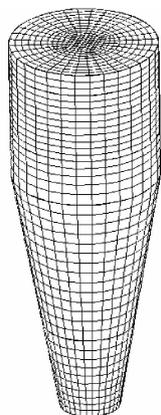
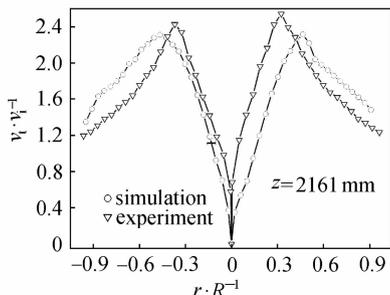


Fig. 4 Mesh in separation space

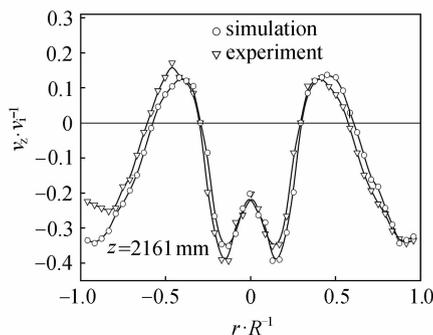
1.3 计算结果可靠性的验证

为验证该模型计算结果的准确性，进行了内流

场测试研究。实验是在图 1 所示的正压鼓风、升气管、料腿两端开放的冷态模型中进行的。旋风分离器入口平均气速 $v_i = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，如图所示沿轴向布置了 10 个测试截面，在周向 0° 、 90° 、 180° 、 270° 位置沿径向每隔 10 mm 布置一测点。用五孔探针测试了轴向、切向速度分布。一典型截面的切向速度、轴向速度的实验结果与模拟结果比较如图 5 所示，结果表明，DSM 模型有良好的预报精度，可以用它来进行旋风分离器流场的预测。



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison between experimental and simulation results

2 停留时间计算方法

在获得准确的稳态内流场之后，用标量示踪的办法，在旋分离器入口、料腿出口和升气管出口加入示踪烟气，瞬态求解标量运输方程

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\varphi) = \nabla \cdot \left[\left(\rho D_{\varphi} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \cdot \left(\frac{\varphi}{\rho} \right) \right] + S_{\varphi}$$

并在旋风分离器升气管出口、料腿出口监测烟气浓度，进一步获得烟气流流量随时间的分布规律，即烟气停留时间的分布规律。为保证烟气停留时间的计算精度，需在很短的时间内在旋分离器入口、有回流区的出口沿整个截面注入大量的烟气，烟气入口边界条件给出浓度表达式： $\varphi = C_0 \exp(-\alpha t)$ ，适当控制系数 C_0 和 α ，既可以保证流场中烟气浓度大

小方便计量，又可以保证烟气起始流动时间基本相同。未作流动示踪的出、入口初始时刻烟气浓度为 0。

对于两端敞开型旋风分离器，由于升气管、料腿出口存在回流区，故平均停留时间计算分为 4 部分进行：由旋风分离器入口来流上行由升气管排出的气体的平均停留时间 t_1 ，由旋风分离器入口来流下行由料腿排出的气体的平均停留时间 t_2 ，升气管出口回流气体平均停留时间 t_3 ，料腿出口回流气体平均停留时间 t_4 。各计算式如下

$$t_1 = \int_0^\infty tQ_1(t)dt / \int_0^\infty Q_1(t)dt$$

$$t_2 = \int_0^\infty tQ_2(t)dt / \int_0^\infty Q_2(t)dt$$

$$t_3 = t'_3(1 + \eta_1 + \eta_1^2 + \dots) = t'_3 / (1 - \eta_1)$$

$$t_4 = t'_4(1 + \eta_2 + \eta_2^2 + \dots) = t'_4 / (1 - \eta_2)$$

式中

$$t'_3 = \int_0^\infty tQ_3(t)dt / \int_0^\infty Q_3(t)dt$$

$$t'_4 = \int_0^\infty tQ_4(t)dt / \int_0^\infty Q_4(t)dt$$

气体总平均停留时间 t 的计算式

$$t = \frac{t_1 Q_{up} + t_2 Q_{down}}{Q} + t_3 \frac{Q_{r1}}{Q} + t_4 \frac{Q_{r2}}{Q}$$

因升气管、料腿回流区的存在使停留时间增加的比率 λ_1 的计算

$$\lambda_1 = \left(t_3 \frac{Q_{r1}}{Q} \right) / \left(\frac{t_1 Q_{up} + t_2 Q_{down}}{Q} \right)$$

$$\lambda_2 = \left(t_4 \frac{Q_{r2}}{Q} \right) / \left(\frac{t_1 Q_{up} + t_2 Q_{down}}{Q} \right)$$

3 结果与讨论

3.1 两端敞开型旋风分离器内气相流动特点分析

为比较两端敞开型旋风分离器与常规旋风分离器内流场的不同，本文将结构 4 的料腿出口封死，对升气管出口采用 $\partial\varphi/\partial z=0$ 出口边界条件，其他条件均与前面的相同。模拟计算了该常规旋风分离器的内流场，结果如图 6、图 7 所示。可见与常规旋风分离器流场（文献 [6]）比较，两端敞开型旋风分离器内流场有如下特点。

① 在升气管、料腿内存在很大回流区，而常规旋风分离器升气管则存在滞留区。

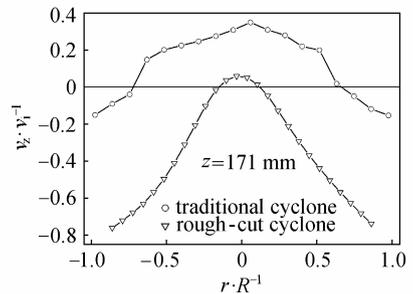
② 分离空间的切向速度分布与常规旋风分离器相似，同样是由近壁的准自由涡和近轴线的准强制涡组成，且外旋流区域较大，在两种涡的交界处

切向速度达到最大值，可用 $v_{t\max} = Cr^{-n}$ 表达。

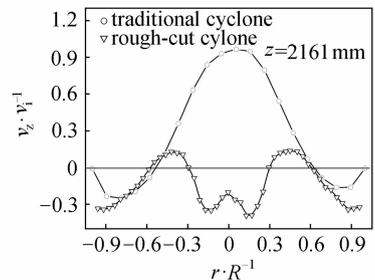
③ 分离空间的轴向速度分布不同于常规旋风分离器，不是简单的外层向下，内层向上分布（图 8），而是由上至下可分为 3 个特征区域（图 9）。上部由于回流的干扰，近壁处、近轴心处轴向速度向下，其他位置向上；中部近壁处轴向速度向下，近轴心处轴向速度向上，为滞留区；下部轴向速度均向下。

④ 升气管由于回流区的存在轴心处轴向速度向下，边壁处向上。升气管内切向速度分布与常规旋风分离器相似，亦分为内、外旋流，内旋流较大，分界点在距壁约为 1/4 管半径处。

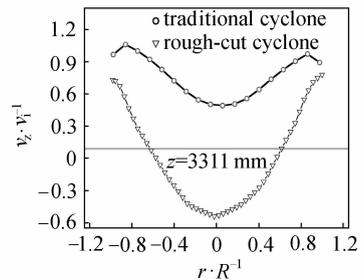
⑤ 灰斗上部轴向速度均向下，灰斗下部近壁处轴向速度向下，近轴心处轴向速度向上；切向速度亦分为内、外旋流，内旋流较大，分界点在距壁约为 1/4 管半径处。



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Comparison of axial velocities between a rough-cut cyclone and a traditional one

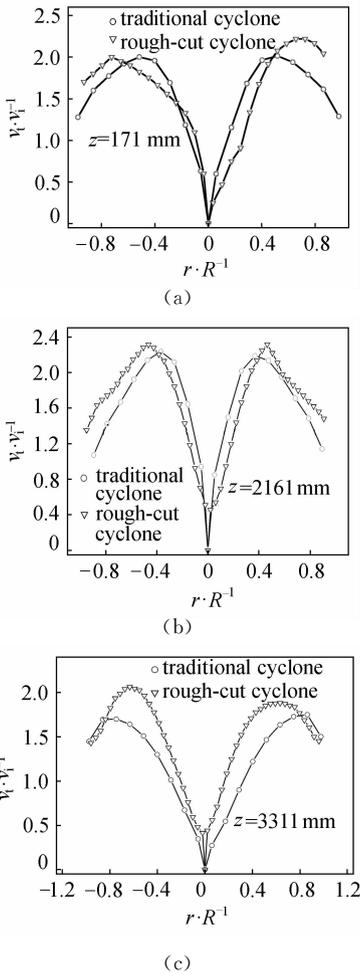


Fig. 7 Comparison of tangential velocities between a rough-cut cyclone and a traditional one

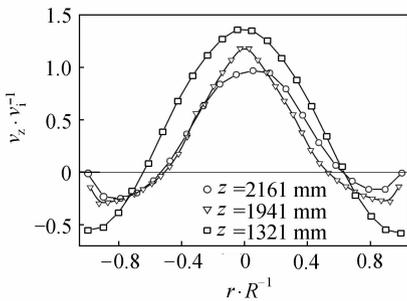


Fig. 8 Axial velocities in separation space in a traditional cyclone

3.2 升气管与料腿内回流区及影响因素的分析

计算和实验结果均表明，升气管、料腿中存在的回流区对该类旋风分离器流场造成很大影响。为表达回流区域的大小，本文定义了以下几个量纲 1 参数

$$Rl_r = l/l_r (Rl_0 = l/l_0), RA_r = A/A_r (RA_0 = A/A_0)$$

分别称为量纲 1 回流区相对高度和量纲 1 回流

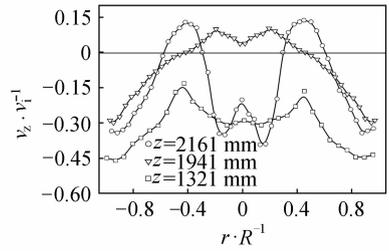


Fig. 9 Axial velocities in separation space in a rough-cut cyclone

区相对横截面积。其物理意义分别表示升气管（料腿）回流区长度相对于升气管（料腿）长度的相对大小和升气管（料腿）回流区平均横截面积相对于升气管（料腿）横截面积的相对大小。

表 2 分别给出了本文研究的 4 种结构的两端敞开型旋风分离器升气管、料腿回流区相对大小的模拟计算结果和实验结果。可见回流区在升气管、料腿中存在范围较大。升气管回流区最大在纵向上可探及分离空间上部约 160 mm，横向上可达横截面积的约 46%。料腿回流区最大在纵向上约占料腿长度的 54%，横向上占横截面积的 43%。无疑这种回流区分布特征对这类旋风分离器性能的正常发挥存在负面影响，不但会降低旋风分离器的油剂分离效率，而且会增大了油气在旋风分离器内的停留时间和结焦几率。

Table 2 Dimensionless parameters of reversed flow in exit tube and dipleg

Cyclone	Rl_r	Rl_{re}	Rl_0	Rl_{0e}	RA_r	RA_{re}	RA_0	RA_{0e}
1	0.186	0.15	0.098	0.087	0.18	0.21	0.114	0.09
2	0.014	0.02	0.019	0.014	0.037	0.05	0.015	0.02
3	1.16	1.24	0.54	0.43	0.46	0.51	0.43	0.37
4	0.041	0.05	0.046	0.037	0.088	0.10	0.047	0.07

由表 2 可以看出灰斗的存在和料腿直径的减小可使回流区显著减小。对比结构 2 和结构 3，加上灰斗并将料腿直径减小 21%，可基本消除料腿回流区，使升气管回流区量纲 1 横截面积减小约 96%，量纲 1 相对高度减小约 98%。

3.3 气相停留时间分布规律

对于无灰斗的结构，典型的流动示踪模拟计算结果如图 10~图 13 所示。图 10、图 11 为在旋风分离器入口在零时刻加入一股烟气，在不同时刻在升气管、料腿出口监测烟气流量的模拟结果。该停留时间分布近似呈对数正态分布。上行从升气管流出的烟气流量在大约 0.2 s 时刻达到高峰，而下

行由料腿流出的烟气的流量大约在 0.34 s 时刻达到高峰.

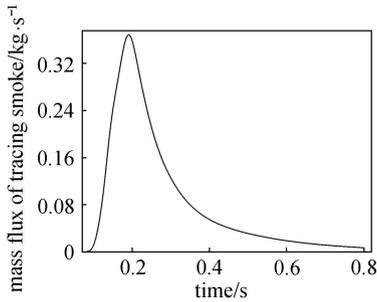


Fig. 10 Residence time distribution of gas introduced from inlet and out of exit tube

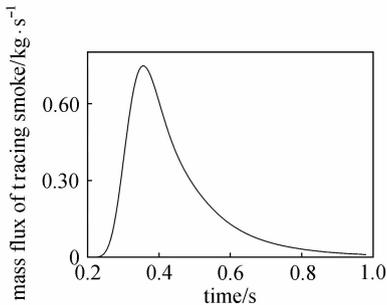


Fig. 11 Residence time distribution of gas introduced from inlet and out of dipleg

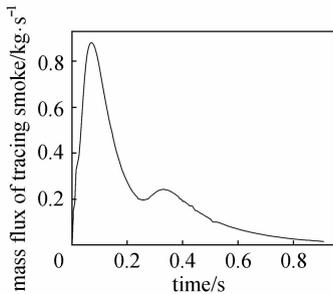


Fig. 12 Residence time distribution of reversed flow in exit tube

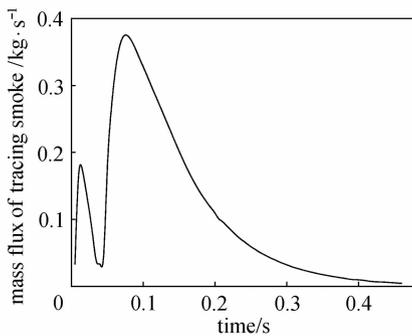


Fig. 13 Residence time distribution of reversed flow in dipleg

图 12 为在旋风分离器升气管出口回流区在零时刻加入一股烟气,在不同时刻在升气管出口外流区监测烟气流出量的模拟结果. 烟气流量随时间变化呈双峰分布,在约 0.065 s 时刻烟气流量达到最大值后流量减小,又在约 0.34 s 时达到次峰值. 图 13 为在该旋风分离器料腿出口回流区在零时刻加入一股烟气,在不同时刻在料腿出口外流区监测烟气流出量的模拟结果. 烟气流量随时间变化呈双峰分布,在约 0.02 s 时刻烟气流量达到一峰值后减小,又在约 0.08 s 时达到最大值. 无疑升气管与料腿回流气体停留时间分布特点与其流动特点有关. 两个峰值的形成分别对应着由回流区直接进入近壁区的气体主流和到达回流区终点后折返的气体主流.

3.4 升气管/料腿气体流量分配和平均停留时间分布

两端敞开型旋风分离器内升气管/料腿气体流量分配对沉降器内油气的停留时间的大小有着决定性的影响. 若由料腿分流进入沉降器空间的气体减少,则不但可以减少气体在旋风分离器中的停留时间,更可减少气体在沉降器空间的停留时间. 因而,寻找对旋风分离器内升气管/料腿气体流量分配较敏感的影响因素并利用这些因素完善该类旋分离器设计有着重要的意义.

表 3、表 4 给出了不同结构参数的两端敞开型旋风分离器升气管/料腿气体流量分配和气体停留时间分布的模拟结果,可见料腿直径的减小和灰斗的存在均可大幅提高由升气管排出的气量. 对于均无灰斗的情况,料腿直径减少 21%,从绝大部分气量(占总气量的 71.1%)下行由料腿排出变为绝大部分(占总气量的 78.6%)上行由升气管排出. 灰斗的存在也可使上行由升气管排出的气量大幅增加. 由升气管排出的气量的增大伴随着气体总平均停留时间的减小. 平均停留时间减小的原因如下.

Table 3 Mass flux division between exit tube and dipleg

Cyclone	Q_{up}/Q	Q'_{up}/Q	Q_{down}/Q	Q'_{down}/Q
1	0.786	0.816	0.214	0.184
2	0.907	0.919	0.093	0.081
3	0.289	0.322	0.711	0.678
4	0.634	0.713	0.366	0.287

Table 4 Average gas residence time of gas in different rough-cut cyclones

Cyclone	t_1/s	t_2/s	t_3/s	t_4/s	t/s	$\lambda_1/\%$	$\lambda_2/\%$
1	0.217	0.478	0.146	0.011	0.288	5.91	0.007
2	0.196	0.513	0.114	0	0.241	6.90	0
3	0.27	0.439	0.317	0.141	0.423	9.57	1.90
4	0.241	0.467	0.186	0.017	0.345	6.71	0.02

① 料腿直径的减小和加上灰斗使气体下行阻力加大，绝大部分气体上行由升气管排出，这就缩短了气体排出旋风分离器的行程，宏观上保证了总的气体停留时间的减小。

② 大量气体上行由升气管排出使芯管回流区上移，回流区仅可影响到升气管中上部，升气管中下部和分离空间上部从回流区变为滞留区。这就导致升气管回流区大大缩短，回流气体行程缩短，停留时间缩小。另外，料腿直径的减小和加上灰斗后升气管回流气量亦有大幅减少，这也有助于气体总平均停留时间的减少。

③ 料腿直径的减小和加上灰斗后使料腿出口回流区基本消除，这也有助于总气体平均停留时间的减少。

4 结 论

(1) 采用合适的网格系统、边界条件等，DSM 模型计算催化裂化沉降器内的两端敞开型的旋风分离器流场有很好的预测精度。

(2) 两端敞开型的旋风分离器内流场与常规旋风分离器的内流场有很大的不同，升气管、料腿出口边界条件不同是造成这种流场差异的原因。

(3) 料腿直径的减小和灰斗的存在可大幅度减小回流区并增大由升气管排出的气量，有助于这类旋风分离器效率的提高和油气停留时间的缩短。

(4) 烟气示踪结果表明由入口进入旋风分离器，而分别由升气管、料腿排出的气体停留时间分布近似呈对数正态分布；升气管、料腿回流区气体停留时间呈双峰分布。

(5) 一般在旋风分离器内气体总平均停留时间不会超过 0.5 s，若结构尺寸匹配恰当，如料腿直径的减小和灰斗的存在可将旋风分离器内总气体平均停留时间减小到 0.25 s 以下。

在同时考虑有催化剂颗粒存在的条件下，上述结果会在数量大小上有所不同，但总的趋向规律还是一致的，所以具有很好的参考价值。

符 号 说 明

- C_0 ——浓度系数， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- d_r, d_0 ——分别为升气管、料腿直径，mm
- D_f ——分子扩散系数， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- k ——湍动能， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- Q ——旋风分离器入口气体质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_{down} ——旋风分离器料腿出口气体净质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q'_{down} ——实验测得旋风分离器料腿出口气体净质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_{r1} ——升气管出口回流区回流气体质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_{r2} ——料腿出口回流区回流气体质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_{up} ——旋风分离器升气管出口气体净质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q'_{up} ——实验测得的旋风分离器升气管出口气体净质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_1, Q_2 ——分别为升气管、料腿净排气量， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- R ——回转体半径，m
- RA_r, RA_{re} ——分别为升气管回流区相对横截面积模拟值和实验值
- RA_0, RA_{0e} ——分别为料腿回流区相对横截面积模拟值和实验值
- RL_r, RL_{re} ——分别为升气管回流区相对长度模拟值和实验值
- RL_0, RL_{0e} ——分别为料腿回流区相对长度模拟值和实验值
- r ——径向位置，m
- Sc_t ——湍流 Schmidt 数
- t ——时间，s
- t_1, t_2 ——分别为由旋风分离器入口进入由升气管和料腿排出的气体平均停留时间，s
- t_3, t_4 ——分别为升气管和料腿出口回流气体平均停留时间，s
- U ——速度矢量， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- u_i ——旋风分离器入口气体速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- v_i ——入口气体平均速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- v_t ——切向速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- v_{max} ——最大切向速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- v_z ——轴向速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- x, y ——坐标，mm
- x_0, y_0 ——旋风分离器入口中心 x, y 坐标值，mm
- α ——系数， s^{-1}
- η_1, η_2 ——分别为升气管和料腿回流气量与净排气量之比
- λ_1, λ_2 ——分别为因芯管和料腿回流区的存在使停留

时间增加的比率

μ_t ——湍流黏度, Pa·s

ρ ——气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

~——量纲 1 化

References

- 1 Ji Zhongli (姬忠礼), Shi Mingxian (时铭显). Flow Field Characteristics of Cyclone Separator with a Spiral Inlet. *Journal of the University of Petroleum, China* (石油大学学报), 1992, **16** (1): 47—53
- 2 Tian Yanhui (田彦辉), Ji Zhongli (姬忠礼), Shi Mingxian (时铭显). Study on Flow Field of PV Type Cyclone Separator. *Journal of the University of Petroleum, China* (石油大学学报), 1992, **16** (1): 54—59
- 3 Wei Yaodong (魏耀东), Yan Hui (燕辉), Shi Mingxian (时铭显). Study on Flow Field in the Annular Space of a Cyclone Separator with a Volute Inlet. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 2000, **31** (11): 46—50
- 4 Zhou L X, Soo S L. Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator. *Powder Technology*, 1990, **63** (7): 45—53
- 5 Hoekstra A J, Derksen J J, Van Den Akker H E A. An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54** (6): 2055—2065
- 6 Hu Liyuan (胡砾元), Shi Mingxian (时铭显). Three Dimensional Time-averaged Flow Structure in Cyclone Separator with Volute Inlet. *Journal of Chemical Industry and engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (4): 549—556
- 7 Guo Hongzhi (郭鸿志). Numerical Simulation of Transfer Process (传输过程数值模拟). Beijing: Metallurgy Industry Press, 1998. 258—263
- 8 Lans R P. Residence Time Distribution in a Cold, Confined Swirl Flow: Implications for Chemical Engineering Combustion Modeling. *Chemical Engineering Science*, 1997, **52** (16): 2743—2756
- 9 Lede J. Study on Fluid Residence Time Distribution in a Cyclone Reactor. *Chemical Engineering Journal*, 1989, **42** (7): 37—56
- 10 Zhao Jianxing (赵坚行). Numerical Simulation to Combustion (燃烧的数值模拟). Beijing: Science Press, 2002. 51—80