

Numerical study on performances of a super vortex quick separation system at riser outlet under oil steam conditions

Zhiliang ZHANG^{1,2,3*}, Haijun CHEN¹, Tao CHEN⁴, Pei MOU¹, Anjun LI⁵, Wenjun LI⁶

1. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. Sichuan Zhongliyu Construction Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610044, China

4. Sichuan Gem Machinery Drilling and Mining Equipment Co. Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, China

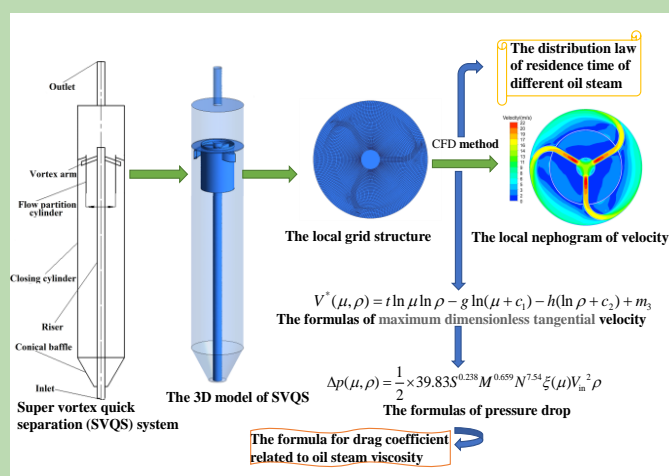
5. China National Pipeline Network Group Western Pipeline Co. Ltd., Urumqi, Xinjiang 831400, China

6. Urumqi Petrochemical Company of China Petroleum, Urumqi, Xinjiang 831400, China

Abstract: In recent years, there are many reports on super vortex quick separation (SVQS) system using air instead of oil steam, but the performance parameters such as separation efficiency are not very accurate, moreover the influence of oil steam properties on the performance of the system has not been studied. In order to promote the industrial application of SVQS system and accurately evaluate its performance, the flow fields at a series of oil steam model with different densities and viscosities in a $\phi 600\text{ mm} \times 4150\text{ mm}$ SVQS system were simulated by the commercial software FLUENT 2019 R3. The influences of oil

steam properties on the dimensionless tangential velocity and pressure drop were studied respectively by single factor analysis. The distribution law of residence time of different oil steam in SVQS were analyzed by employing the scalar transport equation. The simulation result showed that the dimensionless tangential velocity of oil steam in SVQS increased as the density increasing or decreasing of viscosity and the maximum dimensionless tangential velocity can reach 0.912. Both density and viscosity had logarithmic function relations with the dimensionless maximum tangential velocity. The residence time of oil steam in SVQS reduced with the increasing of density of oil steam or the decrease of viscosity that the minimum average residence time was 6.279 s. It was found that the pressure drop and drag coefficient were not only affected by the structural parameters of the SVQS system, but also impacted by the viscosity of oil steam. Both pressure drop and drag coefficient had a logarithmic function relationship with the viscosity of oil steam. Meanwhile, the formulas of dimensionless tangential velocity, pressure drop and resistance coefficient related to oil steam parameters were obtained by fitting, which had good universality and can provide data for the structural optimization of SVQS system.

Key words: riser; density of oil steam; viscosity of oil steam; separation; residence time distribution



收稿: 2020-12-14, 修回: 2021-01-11, 网络发表: 2021-01-27; Received: 2020-12-14, Revised: 2021-01-11, Published online: 2021-01-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2012CB215004); 国家科技重大专项课题(编号: 2011ZX05021-001); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2019M663865)

作者简介: 张智亮(1984-), 男, 四川省隆昌市人, 博士后, 高级工程师, 主要从事动力工程及工程热物理、机械工程等方面的研究, E-mail: 280238724@qq.com.

引用格式: 张智亮, 陈海军, 陈涛, 等. 油气工况下提升管出口旋流快分系统性能的数值研究. 过程工程学报, 2021, 21(11): 1277-1286.

Zhang Z L, Chen H J, Chen T, et al. Numerical study on performances of a super vortex quick separation system at riser outlet under oil steam conditions (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(11): 1277-1286, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220408.

油气工况下提升管出口旋流快分系统性能的数值研究

张智亮^{1,2,3*}, 陈海军¹, 陈涛⁴, 牟沛¹, 李安军⁵, 李文军⁶

1. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500
2. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249
3. 四川中利源建设工程有限公司, 四川 成都 610044
4. 四川宝石机械钻采设备有限责任公司, 四川 广汉 618300
5. 国家电网集团西部管道有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 831400
6. 中国石油乌鲁木齐石化分公司, 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要:为促进旋流快分(SVQS)系统的工业应用、准确评估其性能, 参照国家标准设计了一系列不同密度、黏度的油气模型, 并采用商用软件FLUENT 2019 R3对一套 $\Phi 600\text{ mm}\times 3150\text{ mm}$ 的SVQS系统进行了流动模拟和可行性验证。用单因素变量法分别研究了油气性质对系统无量纲切向速度和压降的影响; 用标量输运方程分析了油气在系统内的停留时间分布规律。结果表明, 无量纲切向速度随油气密度增加或黏度降低而变大; 无量纲最大切向速度随油气密度增加或黏度减小而呈对数递增, 最大为0.912; 密度越大、黏度越小的油气在SVQS系统内的平均停留时间越短, 最短可达6.279 s; 压降、阻力系数不仅与系统的结构参数相关, 也与油气黏度呈对数关系。拟合得到了与油气参数相关的无量纲切向速度、压降和阻力系数函数式, 具有较好的普适性, 可为SVQS系统的结构优化提供参考。

关键词:提升管; 油气密度; 油气黏度; 分离; 停留时间分布

中图分类号: TE624; TQ021.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)11-1277-10

1 前言

提升管出口快分技术是催化裂化(FCC)装置的重要技术, 其快分系统直接影响了催化裂化后反应系统中的油剂分离效率、油气的快速引出和催化剂的高效分离等^[1,2]。中国石油大学(北京)自主开发了一种旋流快分系统(VQS)^[3,4]。因VQS系统存在部分上行短路流而使分离效率降低的问题, 卢春喜等^[5]在VQS系统的旋流头喷口处增设了挡板和隔流筒, 开发了SVQS系统。孙凤侠等^[6-8]对隔流筒的直径进行了研究, 发现隔流筒的直径存在一个最佳尺寸。胡艳华等^[9]改变了隔流筒的形状, 研究发现圆锥形隔流筒的分离效果更佳。程兆龙等^[10,11]提出了提升管出口SVQS自然旋风长度的计算关系式, 为SVQS旋流快分的优化设计提供基础数据。李智等^[12]通过实验发现在SVQS旋流头的上行区域压力脉冲大, 存在不稳定的漩涡。李建涛等^[13]研究发现在SVQS旋流头出口的顶部封壁罩区域内增设直型导流板可以使封闭罩内的漩涡消失。

目前, 较多学者通常以空气代替油气来对大型冷模旋流快分装置进行实验和数值模拟, 研究快分系统的流场分布、分离效率等。实际上, 在空气条件下并不能准确评估快分系统的分离性能, 同时也未考虑油气黏度对系统压降的影响, 从而不能准确分析系统的能量损失。

在实际工业应用中, 催化裂化反应时间、温度、压强和重质油原料等因素直接影响了汽油和丁烯等油气的产率^[14], 使混合油气的密度和黏度等性质发生了变化。油气密度、黏度变化会影响油气的流动速度, 进而影响旋流快分系统的分离效率和压降, 改变系统内油气的停留时间。为精确评估SVQS系统的性能参数, 使实验或模拟结果满足工业应用条件, 需要研究油气密度和黏度变化对该系统性能的影响。目前, 大部分学者都集中于研究气体对旋风分离器性能的影响, 关于油气对催化裂化旋流快分装置性能影响的研究较少。万古军等^[15]、Shi等^[16]研究了不同温度、压强下气体对旋风分离器性能的影响, 但温度和压强的变化最终会改变气体的密度和黏度, 因此不能单独定量地分析气体密度和黏度对旋风分离器性能的影响。Gimbun等^[17]采用计算流体动力学方法(CFD)对旋风分离器压降进行了研究, 发现压降随温度升高而显著降低, 这主要是由于气体密度降低和黏度增加造成的, 但没有单独分析气体密度、黏度变化对分离器压降的影响。

鉴于目前对油气性质对SVQS系统性能影响的研究较少, 且很难采用实验方法进行研究。本工作采用数值模拟的方法对一套 $\Phi 600\text{ mm}\times 3150\text{ mm}$ 的SVQS系统进行了研究, 用单因素变量法分析了SVQS系统的表征速度、压降和阻力系数等性能参数与油气黏度、密度的

关系并得到了拟合式,可为实验提供基础数据,以期优化工业上 SVQS 旋流快分装置结构。

2 研究方法

2.1 几何模型

以文献[18]的旋流快分系统为计算模型,借鉴程兆龙等^[10]提出的 SVQS 系统自然旋风长度的计算式,设计了本研究 SVQS 系统的高度。SVQS 模型主要由封闭罩、提升管、三旋臂旋流头和隔流筒等组成,图 1 中(a)和(b)分别为三维模型图和结构尺寸简图,其三旋臂旋流头的喷口截面尺寸为 29 mm×88 mm,封闭罩的直径为 600 mm,其他尺寸如图 1(b)所示。

2.2 数学模型

SVQS 系统内部的气相流动属于大曲率、强旋流的流动。从工程上应用情况来看,旋转湍流模拟中气体相的湍流模型主要有三大类,分别是雷诺应力模型(RSM)、Renormalization-group (RNG) $k-\varepsilon$ 模型、标准(standard) $k-\varepsilon$ 模型。RSM 模型^[19]相比于 RNG $k-\varepsilon$ 模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型,更严格地考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力的快速变化等,可以有效地计算各向异性的湍流流场;既考虑了雷诺应力分布受到壁面的影响程度,又对雷诺应力的微分输运方程进行了完全求解,模拟结果的精度和准确性均得以提高。本工作采用 RSM 模型进行计算,所有方程基于有限积分法建立。

压力与速度耦合方程采用 SIMPLE 算法,压力插补格式采用能反映高速旋转流动和高涡流 PRESTO! (Pressure Staggering Option!) 格式,其湍流扩散率方程、湍动能方程和动量方程均采用 QUICK 差分格式进行离散。文献[18]对这些方程和网格无关性进行了检验,同时验证了 RSM 模型可以很准确地反映旋流快分系统的流场特性。

2.3 网格划分和边界条件

SVQS 系统内某些壁面区域结构复杂(如旋流头),对这些区域采用非结构网格的方式划分,其他区域均采用六面体网格划分。对整个旋流快分装置模型共划分了 3687549 个网格,图 2 为旋流头局部网格示意图。提升管入口设定为 VELOCITY-INLET,其入口速度湍流指定方法为 I (湍流强度)和 D_h (水力学直径),其中湍流扩散率 ε 和湍动能 k 可利用 I 和 D_h 计算,模型的出口边界采用 outflow(出流)。在计算过程中壁面视为无滑移界面,且采用标准壁面函数法来进行计算,残差值的收敛标准全部为 1×10^{-6} 。

2.4 油气参数

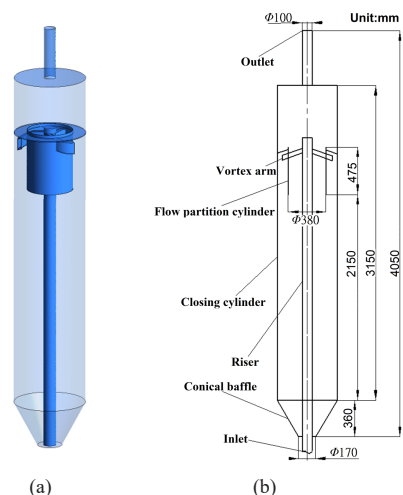


图 1 三维模型图与结构尺寸简图

Fig.1 Schematic diagram of 3D model and structural dimensions

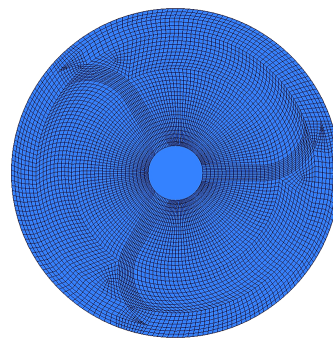


图 2 旋流头局部网格划分示意图

Fig.2 The schematic diagram of a local grid division of cyclone heads

由于提升管出口油气密度、黏度受催化裂化反应温度和时间等因素影响而随时变化,不能直接确定油气的密度和黏度值。参考国家标准 GB/T 50493-2019 附录 A—常用可燃气体蒸汽特性表^[20],可知丙烯的蒸汽密度为 1.94 kg/m^3 、汽油的蒸汽密度为 4.14 kg/m^3 、煤油的蒸汽密度为 6.47 kg/m^3 等。为了使计算结果具有普适性,选择油气的密度范围为 $0.605 \sim 6.725 \text{ kg/m}^3$,黏度范围为 $1.018 \times 10^{-6} \sim 4.881 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,涵盖了大部分油气的蒸汽特性参数。以常温常压下空气参数[密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$]为基准,采用单因素变量法分别将大于和小于空气密度、黏度值的油气参数按等差排列方式分布,并组合成一系列油气模型,共计 42 组,其命名方式和序号如表 1 所示。

3 结果与讨论

3.1 可行性验证

表1 油气性质	
Table 1 Properties of oil steam	
Viscosity/[kg/(m·s)]	Density/(kg/m ³)
	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7
	(0.605) (1.225) (2.325) (3.425) (4.525) (5.625) (6.725)
A1(1.018×10 ⁻⁶)	A1B1 A1B2 A1B3 A1B4 A1B5 A1B6 A1B7
A2(4.993×10 ⁻⁶)	A2B1 A2B2 A2B3 A2B4 A2B5 A2B6 A2B7
A3(9.846×10 ⁻⁶)	A3B1 A3B2 A3B3 A3B4 A3B5 A3B6 A3B7
A4(1.789×10 ⁻⁵)	A4B1 A4B2 A4B3 A4B4 A4B5 A4B6 A4B7
A5(3.335×10 ⁻⁵)	A5B1 A5B2 A5B3 A5B4 A5B5 A5B6 A5B7
A6(4.881×10 ⁻⁵)	A6B1 A6B2 A6B3 A6B4 A6B5 A6B6 A6B7

为验证数值模拟方法的可行性,先以常态空气对SVQS装置进行了流动模拟。以提升管出口处水平截面为基准平面($Z=0\text{ mm}$),向下方取 $Z=150$ 和 300 mm 为计算截面,可表示为 $Z=0.25D$ 和 $Z=0.5D$ (D 为封闭罩直径),其简图如图3所示。将模拟所得切向速度与文献[18]所测实验结果进行了对比,由图4可知(r 为测点距中心轴线半径, R 为封闭罩半径),实验值和模拟值很接近,相对误差在4%以内。实验过程中采用智能型五孔探针系统测量SVQS系统封闭罩内的气相流场。实验时在同一点处测量多组瞬时速度,再用统计学处理方法获得最佳数据,而数值模拟方法获得某点的速度值是稳定不变的,此外智能型五孔探针的测点位置与测量位置会有误差。这导致了实验和模拟结果不同,但总体趋势一致,误差在可接受的范围内,表明数值模拟方法可行。

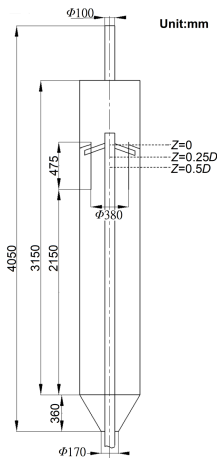


图3 SVQS计算截面位置示意图
Fig.3 Schematic diagram of calculated section position of SVQS

3.2 油气性质对SVQS系统分离效率的影响

旋流头喷口处油气切向速度越大,催化剂颗粒所受离心力也越大,分离效果更好。通过研究无量纲切向速度分析油气性质对SVQS系统分离效率的影响。无量纲切向速度 $V_{t0}=V_t/V_s$,无量纲最大切向速度 $V^*=V_{tmax}/V_s$ 。

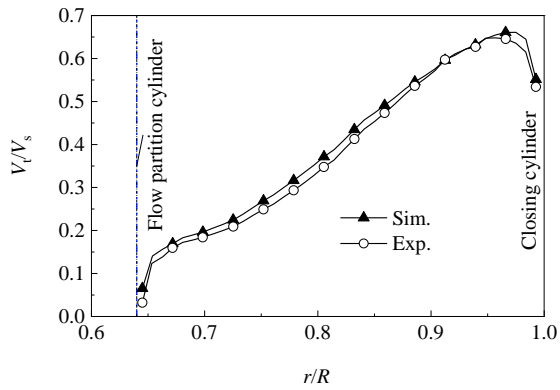


图4 切向速度的模拟结果和实验结果对比($Z=0.5D$)
Fig.4 Comparison of dimensionless tangential velocities between simulation and experimental results ($Z=0.5D$)

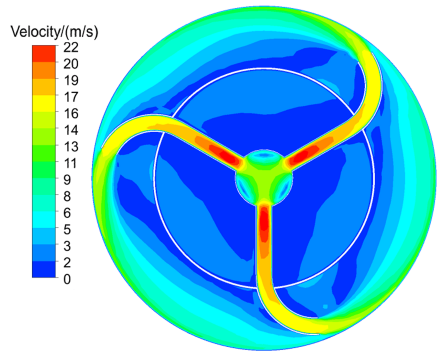
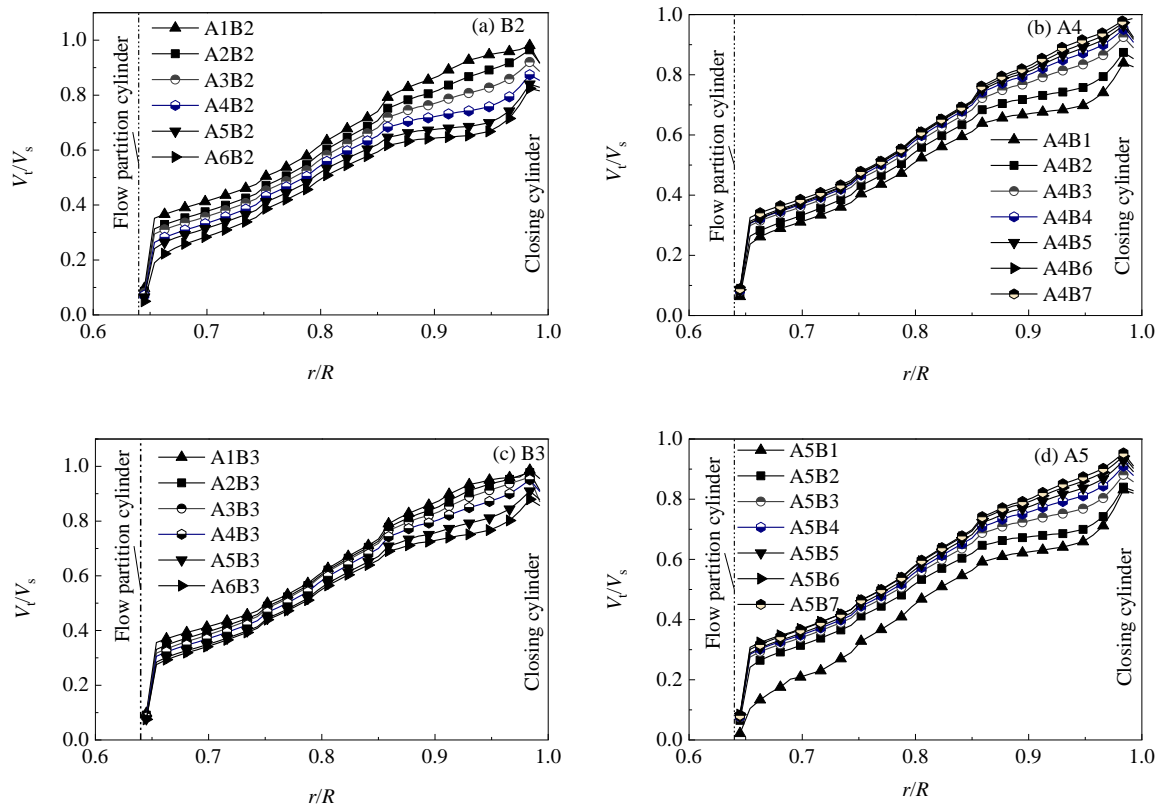


图5 旋流头喷出口沿中心轴线横截面的速度分布云图
Fig.5 The nephogram of the velocity distribution at the nozzle outlet along a central axis

其中 V_s 为旋流头喷口速度, V_t 为切向速度, V_{tmax} 为最大切向速度。图5为常态空气下旋流头喷口沿中心轴线横截面的速度分布云图,可见气体从旋流头喷出后沿着封闭罩壁面做强旋运动,其三旋臂喷口速度呈中心对称分布。

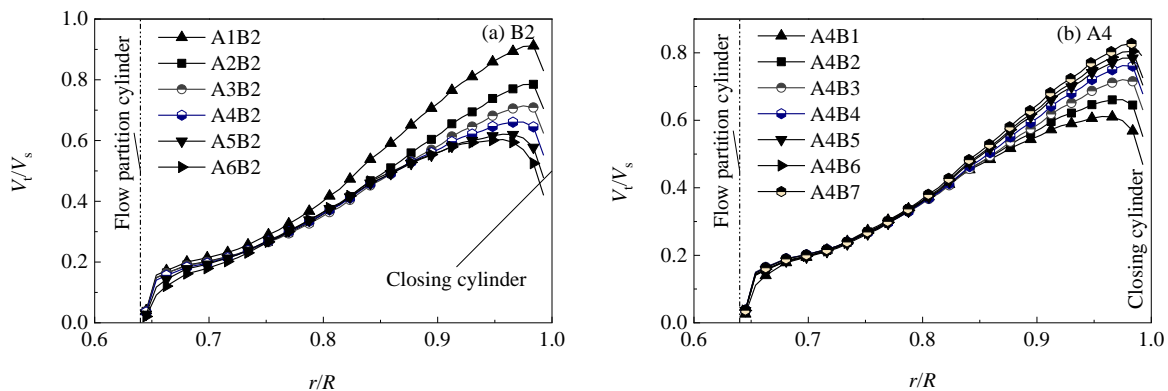
在旋流头喷口速度不变的条件下,对42组模型油气进行了模拟计算,将A4, B2两栏数据与A5, B3两栏数据进行对比,如图6所示。图6(a)和6(c)是油气密度分别为B2和B3时随油气黏度变化,无量纲切向速度在 $Z=0.25D$ 环形截面上(位于喷出段区)的径向分布曲线;图6(b)和6(d)是油气黏度分别为A4和A5时随着油气密度变化,无量纲切向速度在 $Z=0.25D$ 环形截面上的径向分布曲线。由图6可知,油气密度或黏度变化会改变SVQS系统的切向速度,分析其他组数据后也发现了相似的规律,表明油气密度或黏度的改变会影响SVQS系统的分离效率。

分离区的切向速度对SVQS系统内催化剂颗粒的分离效果起决定性作用,因此以 $Z=0.5D$ 为研究面(喷出段与分离段的过渡区域),分析该系统无量纲切向速度

图6 $Z=0.25D$ 时不同油气的无量纲切向速度分布Fig.6 Distributions of dimensionless tangential velocity for different oil-steam with $Z=0.25D$

与油气密度和黏度的关系。以A4和B2两栏模型油气为代表进行对比分析,图7(a)和7(b)分别为油气黏度和密度变化时,无量纲切向速度在 $Z=0.5D$ 截面上(外旋流区)的径向分布曲线。由图7(a)可知,无量纲切向速度在 $0.65 < r/R < 0.8$ 的径向区域内变化较小,在 $r/R > 0.8$ 的区域随黏度减小而变大,最大可达0.912。由图7(b)可知,无量纲切向速度在 $0.65 < r/R < 0.8$ 的径向区域内几乎无变化,在 $r/R > 0.8$ 的区域内随密度增大而逐渐变大,但其增

加幅度逐渐减小。由图可知,密度较大或黏度较小的油气,在 $r/R > 0.8$ 的径向区域内其无量纲切向速度较大,油气和催化剂颗粒更容易分离,能提高SVQS系统的分离效率。靠近封闭罩附近的无量纲最大切向速度对油气与催化剂的分离作用最明显,可以函数拟合的方式研究无量纲最大切向速度与油气密度、黏度的关系。图8和9分别为无量纲最大切向速度与油气黏度 μ 和密度 ρ 呈对数关系的拟合曲线图,式(1)和(2)为拟合公式。

图7 $Z=0.5D$ 时不同油气的无量纲切向速度分布Fig.7 Distributions of dimensionless tangential velocity for different oil-steam with $Z=0.5D$

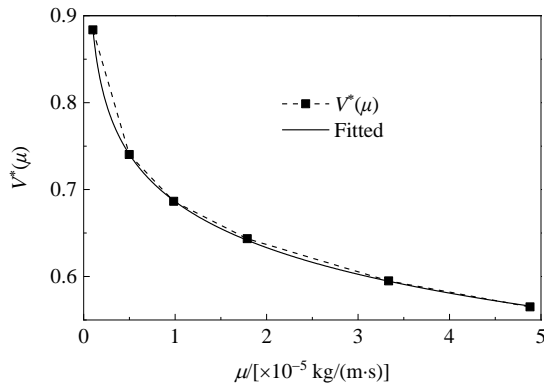


图8 V^* 与 μ 的拟合曲线
Fig.8 Fitting curves of V^* and μ

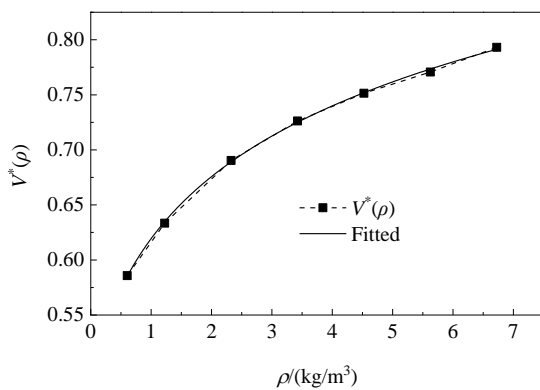


图9 V^* 与 ρ 的拟合曲线
Fig.9 Fitting curves of V^* and ρ

$V^*(\mu) = 0.68361 - 0.07419 \ln(\mu - 0.03437)$ ($R^2 = 0.99988$) (1)
 $V^*(\rho) = 0.57576 + 0.10971 \ln(\rho + 0.48636)$ ($R^2 = 0.99929$) (2)
 式中, $V^*(\mu)$ 为关于油气黏度的无量纲最大切向速度, $V^*(\rho)$ 为关于油气密度的无量纲最大切向速度。对其他组数据拟合后也可得到相似的函数式, 且拟合程度较好, 可表示为

$$V^*(\mu) = m_1 - n_1 \ln(\mu + c_1) \quad (3)$$

$$V^*(\rho) = m_2 - n_2 \ln(\rho + c_2) \quad (4)$$

式中, m_1, n_1, c_1 是关于 μ 的函数, m_2, n_2, c_2 是关于 ρ 的函数。合并式(3)和(4)可得与油气密度、黏度相关的无量纲最大切向速度 $V^*(\mu, \rho)$ 的通式。

$$V^*(\mu, \rho) = t \ln \mu \ln \rho - g \ln(\mu + c_1) - h(\ln \rho + c_2) + m_3 \quad (5)$$

式中, t, g, h 为常数。以式(5)为拟合函数, 对所有数据进行拟合可得式(6), 其中 $R^2 = 0.99911$, 图10为其拟合曲面图。

$$V^*(\mu, \rho) = 0.01021 \ln \mu \ln \rho - 0.10836(\ln \mu + 0.17302) + 0.08628(\ln \rho + 0.17065) + 0.71321 \quad (6)$$

影响SVQS系统分离效率的区域主要为外旋流区, 而内旋流区对系统的分离效果作用不大, 其内旋流区切

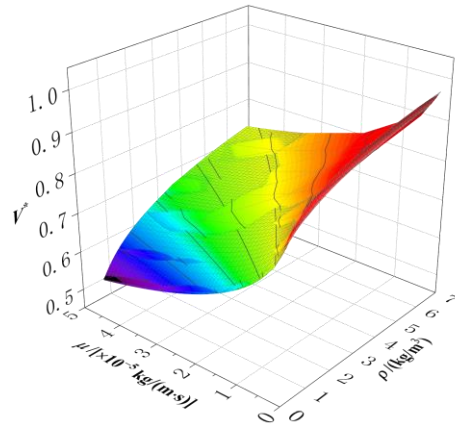


图10 V^* 与 μ, ρ 的拟合曲面
Fig.10 Fitting surface of μ, ρ and V^*

向速度的大小会影响系统的能量损耗。图11(a)和11(b)分别为油气黏度和密度变化时, 无量纲切向速度在内旋流区(提升管外壁与隔流筒内壁之间) $Z=0.5D$ 截面上的径向分布曲线。由图可知, 内旋流区的无量纲切向速度与外旋流区的无量纲切向速度总体变化趋势很相似。由图11(b)可知, 无量纲切向速度在提升管外壁区附近(以 $r/R=0.37$ 附近为界限)随着密度增大而逐渐变小, 而在隔流筒内壁区附近随着密度的增大逐渐变大, 但增加幅度逐渐减小。将图11与图7对比分析可知, 密度较大或黏度较小的油气, 能提高SVQS系统的分离效率, 但内旋流区的无量纲切向速度较大(旋转强度大), 系统的能量损耗也会增加。

3.3 油气性质对SVQS系统能量损耗的影响

Chen等^[21]和Morin等^[22]都给出了旋风分离器的压降经验模型, 如式(7)所示, 除阻力系数不同之外, 格式比较统一。

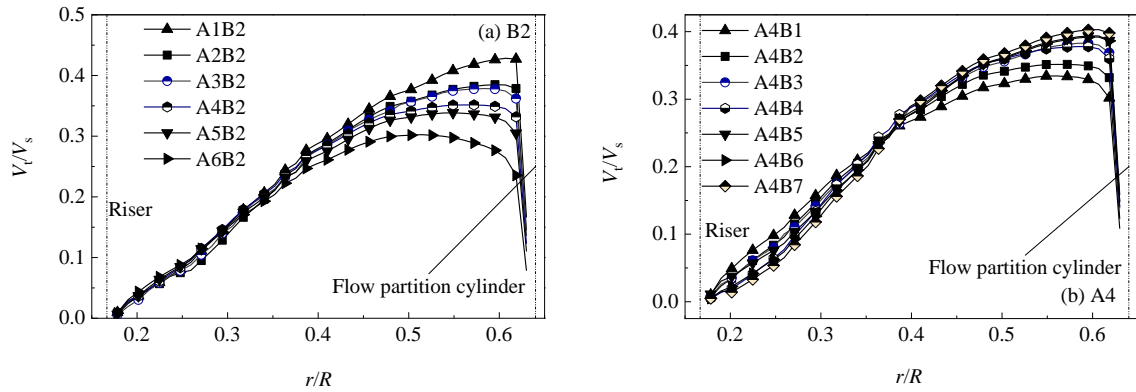
$$\Delta p = \frac{1}{2} \xi \rho V_{in}^2 \quad (7)$$

式中, Δp 为压降(Pa), ξ 为阻力系数, V_{in} 为分离器入口速度(m/s)。

提升管出口旋流快分系统的能量损耗通常利用压降或阻力系数评价。目前, 很少有学者研究旋流快分系统的压降经验模型和阻力系数公式, 文献[18]给出了旋流快分系统中阻力系数 ξ 的相关公式, 如式(8)所示, 这与旋风分离器的压降经验模型格式相一致。

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho V_{in}^2} \quad (8)$$

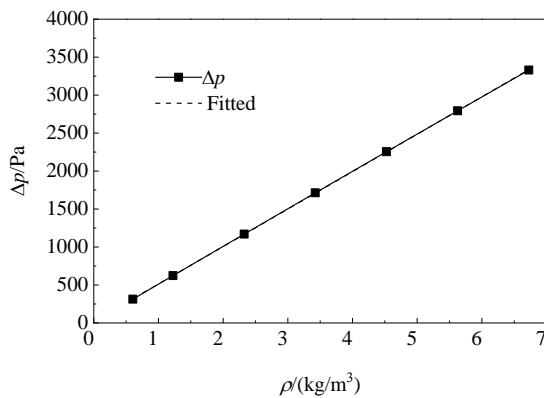
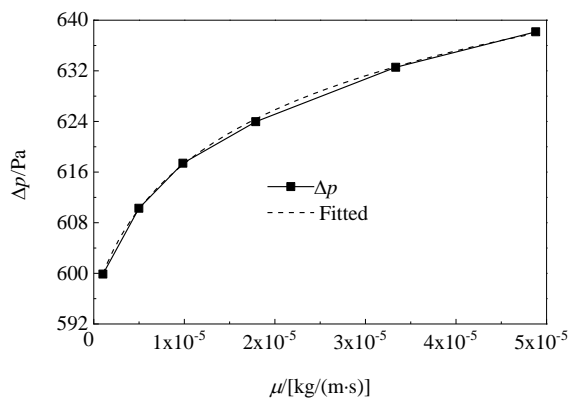
用压降值能计算阻力系数。采用单因素变量法以函数拟合的方式先得到压降公式, 再通过式(8)得到阻力系数函数式。图12是油气黏度为A4时油气密度与压降的拟合曲线图, 式(9)为油气密度与压降的函数式, 由图

图 11 $Z=0.5D$ 时不同油气的无量纲切向速度分布Fig.11 Distributions of dimensionless tangential velocity for different oil-steam with $Z=0.5D$

可知,数据和公式的拟合程度非常好,油气密度与压降呈线性关系,这与式(7)中呈正比例的关系基本一致。

$$\Delta p(\rho) = 20.56593 + 492.95837\rho \quad (R^2=0.99998) \quad (9)$$

式中, $\Delta p(\rho)$ 为压降(与油气密度相关)。

图 12 Δp 与 ρ 的拟合曲线Fig.12 Fitted curves of Δp and ρ 图 13 Δp 与 μ 的拟合曲线Fig.13 Fitted curves of Δp and μ

对其他组数据分析后,数据与函数的拟合程度也较好,可得出压降 $\Delta p(\rho)$ 的表达式

$$\Delta p(\rho) = a + bV_{in}^2 \rho \quad (10)$$

式中 a 和 b 均为常量,这与压降公式(7)基本一致。图 13 为油气密度为 B2 时系统压降与油气黏度拟合曲线,式(11)为其压降与油气黏度的拟合式,可见,随着油气黏度变大压降呈对数递增。

$$\Delta p(\mu) = 785.26487 + 14.93134 \ln(\mu + 3.5 \times 10^{-6}) \quad (R^2 = 0.99946) \quad (11)$$

式中, $\Delta p(\mu)$ 为压降(与油气黏度相关)。其他组数据与函数的拟合程度也较好,其基本公式见式(12)。

$$\Delta p(\mu) = d - e \ln(\mu + c_3) \quad (12)$$

式中, d 和 e 是关于 μ 的函数, c_3 为常量。

将式(12)与式(7)对比后可知,阻力系数 ξ 与油气黏度密切相关。 ξ 与诸多因素有关,但很少有学者考虑到气体黏度,因而不能较好地预测压降的变化。将阻力系数 ξ 定义为 $\xi = \xi(\mu)\xi(g)$, 其中 $\xi(g)$ 是与系统结构尺寸参数相关的阻力系数,对于特定的 SVQS 系统其结构参数一定,可将 $\xi(g)$ 视为常数; $\xi(\mu)$ 为与油气黏度相关的阻力系数, $\xi(\mu) = k[d - e \ln(\mu + c_3)]$, 其中 k 为常数。压降公式(7)可进一步表示为

$$\Delta p = \frac{1}{2} \xi(\mu) \xi(g) \rho V_{in}^2 \quad (13)$$

为了与式(13)相对应,忽略式(10)中的常数项并以式(10)和(12)为基础,可得出压降公式(14)。

$$\Delta p(\mu, \rho) = k[d - e \ln(\mu + c_3)] V_{in}^2 \rho \quad (14)$$

式中, k 为常数, $\Delta p(\mu, \rho)$ 为与油气密度和黏度相关的压降(Pa)。

为保证压降与油气密度关系的同时也能保证压降与油气黏度的关系,以式(14)作为函数对 42 组数据进行曲面拟合(图 14)可得

$$\Delta p(\mu,\rho)=0.07357V_{in}^2\rho[31.57635+24032.03981\ln(\mu+1.00041)](R^2=0.99946)\quad(15)$$

可知,随着油气密度或黏度增加压降会变大,其能量损失也随之增加。将 V_{in} 值代入式(15)中并联合式(13)可得 $\xi(\mu)\xi(g)=4.64646+3536.31466\ln(\mu+1.00041)$ 。利用周闻等^[23]提出的与不同SVQS系统结构参数相关的阻力系数 $\xi(g)$ 的表达式,可得 $\xi(g)=39.83S^{0.238}M^{0.659}N^{7.54}=20.031(S=S_c/S_v, M=S_c/S_v, N=D_c/D)$,其中 S_v, S_c, S_e 分别为提升管截面面积、旋流头出口面积和封闭罩截面面积, D 和 D_c 分别为封闭罩直径和隔流筒直径),最终可得 $\xi(\mu)=0.23196+176.54209\ln(\mu+1.00041)$ 。SVQS系统的阻力系数可表示为 $\xi=39.83S^{0.238}M^{0.659}N^{7.54}\xi(\mu)$,压降公式 $\Delta p(\mu,\rho)$ 可进一步表示为

$$\Delta p(\mu,\rho)=\frac{1}{2}\times 39.83S^{0.238}M^{0.659}N^{7.54}\xi(\mu)V_{in}^2\rho\quad(16)$$

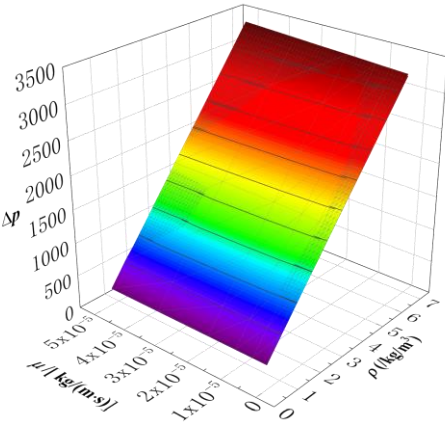


图14 Δp 与 μ,ρ 的拟合曲面
Fig.14 Fitted surface of μ,ρ and Δp

3.4 可靠性验证

为验证所得公式的可靠性,分别以天然气^[24]($\mu=1.0225\times 10^{-4}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)},\rho=0.8141\text{ kg/m}^3$),乙烯($\mu=1.0318\times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)},\rho=1.138\text{ kg/m}^3$)和丁烯($\mu=8.163\times 10^{-6}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)},\rho=2.327\text{ kg/m}^3$)^[25]3种气体为模型,在SVQS快分系统中进行模拟。将所得模拟值与以式(6)和(16)计算的预测值进行了对比,结果如表2所示。

可见预测值和模拟值的数据很接近,相对误差范围均在3%以内,说明函数式可以较准确地预测不同油气工况下SVQS系统的性能参数,具有较好的普适性,可为SVQS快分装置的结构优化提供数据。

3.5 油气性质对SVQS系统中油气停留时间的影响

油气在旋流快分系统内停留时间是评估旋流快分系统性能的一个重要指标。孙凤侠等^[26]引入了主停留时间 t_{main} 、最大停留时间 t_{max} 、最小停留时间 t_{min} 和平均停

表2 SVQS系统性能参数预测值与模拟值的对比
Table 2 Comparison of predicted and simulated values of SVQS system performance parameters

Parameter		Gas		
		Natural gas	Ethylene	Butene
$V^*(\mu,\rho)$	Simulation value	0.54563	0.70632	0.79842
	Predictive value	0.53934	0.71666	0.80007
	Relative error/%	1.1528	1.4639	0.2067
$\Delta p/\text{Pa}$	Simulation value	439.192	574.360	1157.306
	Predictive value	428.585	574.068	1154.258
	Relative error/%	2.4151	0.0508	0.2634

留时间 τ 等与停留时间相关的参数,采用数值计算的方法研究了旋流快分器(VQS)内气体停留时间的分布特性。采用数值计算的方法考察油气性质对SVQS系统内气体停留时间的分布的影响。在SVQS快分入口处加入与油气性质参数相同的示踪气体,在出口处监测示踪气体的流率,进一步得到示踪气体的停留时间分布曲线。式(17)和(18)分别为停留时间分布密度函数 $E(t)$ 和平均停留时间公式。

$$E(t)=\frac{Q_0(t)}{\int_0^\infty Q_0(t)dt}\quad(17)$$

$$\tau=\int_0^\infty tE(t)dt\quad(18)$$

式中, $Q_0(t)$ 为示踪气体流率随时间变化的函数, t 为时间(s)。图15(a)和15(b)分别为密度为B2、黏度为A4时,两栏示踪气体的停留时间分布曲线,表3为部分示踪气体在SVQS系统内的停留时间参数值。

由图15和表3可知,随着油气密度增大或黏度减小,示踪气体的主停留时间、最小停留时间、最大停留时间和平均停留时间均逐渐变小,其中平均停留时间和主停留时间变化最明显,最短平均停留时间可达6.279 s,分析其他组数据后也可发现相同的规律。可知,在旋流头喷口速度不变的情况下,密度越大或黏度越小的油气在SVQS系统内停留的时间越短。这是由于密度值大或黏度值小的油气在此系统相应位置处的无量纲切向速度大,其单位时间内的旋转位移变大,这有利于系统内油气的快速引出,从而降低了SVQS系统结焦几率。

4 结论

采用RSM模型对不同油气模型在SVQS系统中的流动进行了模拟,用单因素变量法分析了油气性质参数(油气密度、黏度)与表征速度、压降、阻力系数和油气停留时间的关系,得到如下结论:

(1) 随着油气密度变大,SVQS系统相应位置的无量纲切向速度变大,且无量纲最大切向速度呈对数增大趋

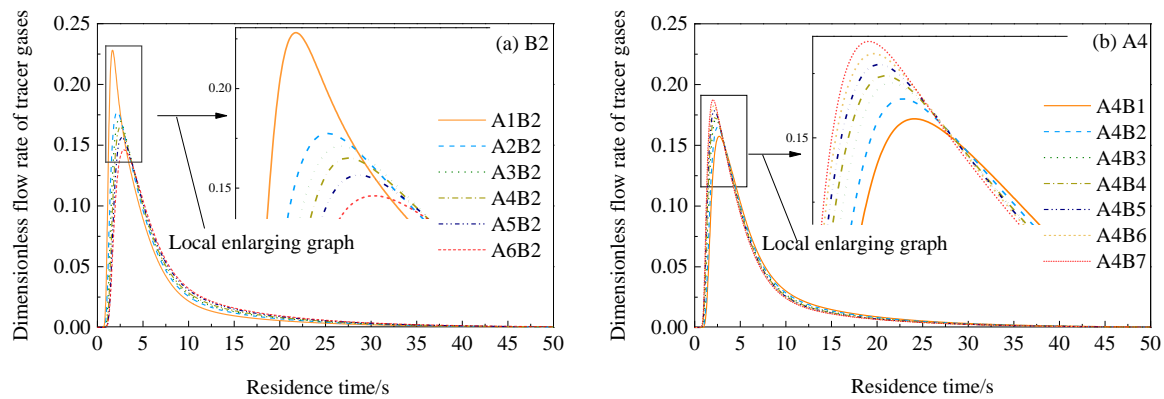


图 15 示踪气体停留时间分布
Fig.15 Residence time distributions of tracer gases

表 3 密度为 B2 或黏度为 A4 时部分示踪气体的停留时间参数值

Table 3 Residence time parameters of part of tracer gases with density of B2 or viscosity of A4								
Time parameter	Properties of oil-steam							
	A4B1	A4B3	A4B5	A4B7	A1B2	A3B2	A5B2	A6B2
t_{min}/s	2.695	2.350	2.170	2.005	1.660	2.370	2.670	2.935
t_{min}/s	0.985	0.865	0.805	0.760	0.730	0.910	1.050	1.120
t_{max}/s	42.625	41.110	40.285	39.610	37.840	41.130	42.745	43.435
τ/s	8.221	7.689	7.093	6.681	6.279	7.435	8.217	8.631

势;随着油气黏度变大,无量纲切向速度减小,且无量纲最大切向速度呈对数减小趋势。当油气密度增加或黏度减小时,无量纲切向速度最大可达 0.912,油气和催化剂颗粒更容易分离,这会提高 SVQS 系统的分离效率。

(2) 系统压降不仅与油气密度相关,还随油气黏度变大而呈对数增加趋势。当油气黏度变化时会改变系统的阻力系数。

(3) 对计算数据进行拟合,得到了与油气密度、黏度相关的无量纲最大切向速度和压降函数式,并计算得到了仅与黏度参数相关的阻力系数表达式。将公式预测值与模拟值进行了比较,预测结果较精确,其相对误差均在 3% 以内,说明公式具有较好的普适性,对 SVQS 快分装置的性能评估有很大应用价值,可避免重复、复杂的实验或数值模拟。

(4) 不同的油气模型在 SVQS 系统内的停留时间分布曲线很相似,其系统内油气停留时间随油气密度增大或黏度减小而变短,其最短平均停留时间可达 6.279 s,从而减少了 SVQS 系统内的焦炭产量。

参考文献

[1] Gilbert A T. Customized FCC Revamps [C]//UOP Refining Technology Conference. 1995: 28.
[2] Gauthier T, Bayle J, Leroy P. FCC: fluidization phenomena and

technologies [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2000: 55(2): 187–207.
[3] 孙凤侠. 旋流快分系统的流场分析与数值模拟 [D]. 北京: 中国石油大学, 2004: 10–39.
Sun F X. Analysis and numerical simulation of flow field in vortex quick separation system of FCC disengager [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2004: 10–29.
[4] 胡艳华, 卢春喜, 魏耀东, 等. 旋流快分系统(VQS)环形空间内气相流场的研究 [J]. 石油炼制与化工, 2008, 39(10): 55–57.
Hu Y H, Lu C X, Wei Y D, et al. Study on flow in the annular space of vortex quick separation system (VQS) [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2008, 39(10): 55–57.
[5] 卢春喜, 徐文清, 魏耀东, 等. 新型紧凑型催化裂化沉降系统的实验研究 [J]. 石油学报(石油加工), 2007, 23(6): 6–12.
Lu C X, Xu W Q, Wei Y D, et al. Experimental studies of a novel compact fcc disengager [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing), 2007, 23(6): 6–12.
[6] 孙凤侠, 卢春喜, 时铭显. 旋流快分器内气相流场的实验与数值模拟研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(3): 106–111.
Sun F X, Lu C X, Shi M X. Experiment and numerical simulation of gas flow field in new vortex quick separation system [J]. Journal of China University of Petroleum University (Edition of Natural Science), 2005, 29(3): 106–111.
[7] 孙凤侠, 卢春喜, 时铭显. 催化裂化沉降器新型高效旋流快分器内气固两相流动 [J]. 化工学报, 2005, 56(12): 2280–2287.
Sun F X, Lu C X, Shi M X. Numerical simulation of gas particles flow field in new vortex quick separation system for FCC disengager [J]. CIESC Journal, 2005, 56(12): 2280–2287.
[8] 孙凤侠, 卢春喜, 时铭显. 催化裂化沉降器新型高效旋流快分器的结构优化与分析 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(5): 109–113.
Sun F X, Lu C X, Shi M X. Configuration optimization and analysis of newly developed vortex quick separator for FCC disengage [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(5): 109–113.
[9] 胡艳华, 汪洋, 卢春喜, 等. 催化裂化提升管出口旋流快分系统内隔流筒结构的优化改进 [J]. 石油学报(石油加工), 2008, 24(2): 177–183.
Hu Y H, Wang Y, Lu C X, et al. Improvement of the isolate cylinder in vortex quick separation system at FCC riser outlet [J].

- Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing), 2008, 24(2): 177–183.
- [10] 程兆龙, 鄂承林, 卢春喜. 提升管出口SVQS自然旋风长度的数值模拟 [J]. 化工学报, 2016, 67(8): 3347–3356.
- Chen Z L, E C L, Lu C X. Numerical simulation of natural vortex length in riser termination with SVQS system [J]. CIESC Journal, 2016, 67(8): 3347–3356.
- [11] 程兆龙, 姚秀颖, 鄂承林, 等. 带隔流筒旋流快分新型工业催化裂化沉降器内气相流场的数值模拟 [J]. 过程工程学报, 2016, 16(1): 86–95.
- Chen Z L, Yao X Y, E C L, et al. Numerical simulation of gas phase flow field in a novel FCC disengaged with flow partition cylinder quick separation system [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(1): 86–95.
- [12] 李智, 李萌, 张博峰, 等. 带有环流预汽提的旋流快分系统动态压力的小波分析 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 11–20.
- Li Z, Li M, Zhang B F, et al. Wavelet analysis of dynamic pressure in vortex quick separation system with annular pre-stripper [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(1): 11–20.
- [13] 李建涛, 李智, 卢春喜. 催化裂化密闭快分系统封闭罩内流场优化 [J]. 中国粉体技术, 2017, 23(3): 73–80.
- Li J T, Li Z, Lu C X. Optimization of flow field in closing cylinder of circulation stripping vortex quick separator system [J]. China Powder Science and Technology, 2017, 23(3): 73–80.
- [14] 华东石油学院炼油工程教研室. 石油炼制工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1981: 294–345.
- East China Institute of Petroleum Refining Engineering Teaching and Research Section. Petroleum refining engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981: 294–345.
- [15] 万古军, 孙国刚, 魏耀东, 等. 温度和压力对旋风分离器内气相流场的综合影响 [J]. 动力工程, 2008, 28(4): 579–584.
- Wan G J, Sun G G, Wei Y D, et al. Comprehensive influence of temperature and pressure on the gas phase flow field in a cyclone [J]. Power Engineering, 2008, 28(4): 579–584.
- [16] Shi L M, David J B, Greg K, et al. CFD simulation of the influence of temperature and pressure on the flow pattern in cyclones [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 45(22): 7667–7672.
- [17] Gimbut J, Chuah T G, Fakhru-Razi A, et al. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44: 7–12.
- [18] 张智亮. 提升管CSVQS系统的流体力学特性及结构优化研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2018: 18–47.
- Zhang Z L. Research on fluid mechanics characteristics and structure optimization of circulating stripping vortex quick separator system [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018: 18–47.
- [19] 蒋明虎, 徐保蕊, 赵立新. 湍流模型在圆管螺旋流场模拟中的应用与对比 [J]. 化学工程, 2016, 44(9): 38–43.
- Jiang M H, Xu B R, Zhao L X. Application and comparison of various turbulence models in simulation of pipe spiral-flow field [J]. Chemical Engineering, 2016, 44(9): 38–43.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准: GB/T 50493–2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 16–21.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of combustible gas and toxic gas detection and alarm for petrochemical industry: GB/T 50493–2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019: 16–21.
- [21] Chen J Y, Shi M X. A universal model to calculate cyclone pressure drop [J]. Chemical Engineering and Technology, 2007, 30(3): 184–191.
- [22] Morin M, Raynal L, Reddy Karri S B, et al. Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: experimental study and CFD simulations [J]. Powder Technology, 2021, 377: 174–185.
- [23] 周闻, 王康松, 鄂承林, 等. 多旋臂气液旋流分离器压降特性试验 [J]. 化工学报, 2019, 70(7): 2564–2573.
- Zhou W, Wang K S, E C L, et al. Multi-spiral gas-liquid vortex separator pressure drop characteristics test [J]. CIESC Journal, 2019, 70(7): 2564–2573.
- [24] 魏凯丰, 宋少英, 张作群. 天然气混合气体黏度和雷诺数计算研究 [J]. 计量学报, 2008, 29(3): 248–250.
- Wei K F, Song S Y, Zhang Z Q. Research on calculation of natural mix gas viscosity and Reynolds number [J]. Acta Metrology, 2008, 29(3): 248–250.
- [25] 陈惠钊. 黏度测量 [M]. 修订版. 北京: 中国计量出版社, 2003: 342–346.
- Chen H Z. Viscosity measurement [M]. Revised Edition. Beijing: China Metrology Press, 2003: 342–346.
- [26] 孙凤侠, 卢春喜, 时铭显. 催化裂化沉降器旋流快分器内气体停留时间分布的数值模拟研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(6): 77–82.
- Sun F X, Lu C X, Shi M X. Numerical simulation of gas residence time distribution in vortex quick separator of FCC disengage [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(6): 77–82.