

天然气新型气液分离器性能试验研究

吉雷,王兴,李正贵,李锐

(西华大学流体及动力机械教育部重点实验室,四川成都610039)

摘要:为了解决天然气含有饱和水汽和少量烃降低输气效率、堵塞管线和设备等问题,利用旋风子、稳流元件、叶栅式分离元件、折流板式分离元件组合成新型天然气分离器。利用相位多普勒粒子分析仪对新型天然气分离器进出口粒子粒径与液态水含量的进行对比测试,以研究新型分离器的分离效率。结果表明:新型分离器具有良好的气液分离作用;在流量为 $10\sim 64\text{ m}^3/\text{h}$ 时,分离器的分离效率成抛物线形式,在 $33\text{ m}^3/\text{h}$ 时分离器的分离效率降到最低值 95.16% ,主要原因是流量在 $33\text{ m}^3/\text{h}$ 时,试验气液混合不均匀,导致内部流态紊乱,以至于试验测得分离效率相对偏低;在流量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 时分离器分离效率最高,为 99.29% ;分离器对该进口条件的气体中雾状液粒有较高的分离作用,且可以明显降低分离器出口气体中液粒的平均粒径;从进口到气相出口压力逐渐降低,总压降为 950 Pa ;流动区域速度梯度大不利于气液相分离,流动掺混会导致分离效率降低。

关键词:天然气;新型气液分离器;流场计算;多普勒粒子分析

中图分类号:TE96 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.017

[引用本文格式]吉雷,王兴,李正贵,等.天然气新型气液分离器性能试验研究[J].热能动力工程,2020,35(3):116-121. JI Lei, WANG Xing, LI Zheng-gui, et al. Experimental study on the performance of new gas-liquid separator of natural gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):116-121.

Experimental Study on the Performance of New Gas-Liquid Separator of Natural Gas

JI Lei, WANG Xing, LI Zheng-gui, LI Rui

(Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039)

Abstract: Natural gas contains saturated water vapor and a small amount of hydrocarbon which reduces gas transmission efficiency and results in blockage of pipelines and equipment and other problems. To address these issues, a new natural gas separator is proposed and it is composed of cyclone, flow stabilizing element, cascade separating element and baffle separating element. The separation efficiency of the new natural gas separator is studied by comparing the particle size and liquid water content in the inlet and outlet of the new natural gas separator with the phase doppler particle analyzer. The results show that the new separator has good effect on gas-liquid separation of natural gas. In the test, when the flow is in between $10\sim 64\text{ m}^3/\text{h}$, the separation efficiency of the separator is in parabolic form. When the flow is $33\text{ m}^3/\text{h}$, the separation efficiency of the separator drops to the lowest value at 95.16% . At $10\text{ m}^3/\text{h}$, the maximum separation efficiency of the separator is 99.29% . The separator has a higher separation effect on the foggy liquid particles in the gas with the inlet condition, and can clearly reduce the average particle size of the liquid particles in the gas at the outlet of the separator. The pressure from the inlet to the gas phase outlet is gradually decreased, and the total pressure drop is 950 Pa . The large change of velocity gradient in the flow region adversely affects gas-liquid separation, and flow mixing will lead to the decrease of separation efficiency.

收稿日期:2019-03-11; 修订日期:2019-04-11

作者简介:吉雷(1969-),男,云南昆明人,西华大学实验师, E-mail:657485435@qq.com.

通讯作者:李正贵(1974-),男,甘肃兰州人,西华大学研究员, E-mail:lzhgui@126.com.

Key words: natural gas, new gas-liquid separator, flow field calculation, doppler particle analysis

引言

天然气不仅是一种丰富、优质的能源,也是重要的化工原料。国内的天然气资源多为凝析气田和酸性气田,从井口出来的天然气含有饱和水汽和少量烃,如果未经处理的天然气进入管线就会带来许多问题:降低输气量、增加管线的动力消耗;天然气中含有 CO_2 和 H_2S ,与游离水接触会形成酸,从而腐蚀管道和设备;天然气与水形成水合物结晶,时间长了会积累在管道内部,降低输气效率、供气不平稳、严重时堵塞管线和设备^[1]。所以需要从气体中除去液体杂质,即气液分离处理^[2-3]。同时过滤分离器要求具有高效的除液性能^[4-6]。

国内外科研人员采用不同的实验方法、不同的分离器做了大量研究。李柏松^[7]以癸二酸二辛酯(DOS)为实验介质,采用称重法对天然气过滤器的气液分离性能进行了实验研究,得出了随着滤芯表面滤速的增加,滤芯的气液分离性能也随之提高,过滤效率随液滴粒径和气体含液量增大而增加。李东芬^[8]在天然气聚结过滤器气液分离性能的研究中,采用两种加入液滴方式,通过 winner318B 激光粒度对出口粒径进行在线测量来评价天然气聚结过滤器的气液分离性能,当流量为 $94 \sim 182 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入口液体浓度为 $30 \sim 75 \text{ g}/\text{m}^3$ 时,气液分离效率随着气体流量和入口液体浓度的增加而增大,当流量超过 $220 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,分离效率迅速降低;分离器出口处粒径大于 $8 \mu\text{m}$ 的液滴基本除尽。已有报道主要利用软件和试验对分离器气液分离性能进行研究^[9-14]。

本研究采用相位多普勒粒子分析仪^[15-16](Phase Doppler Particle Analyzer, PDPA)来进行试验,对分离器进出口液滴粒子的粒径及浓度进行测试,通过进出口粒子粒径与液态水含量的对比,研究组合型气液分离器的分离效率,得到流量、出口压力特性以及流动区域速度梯度、掺混对分离性能的影响,为天然气的运输提供了保障。

1 组合分离器

1.1 几何模型

新型天然气气液分离器直径为 DN300,即直径

为 300 mm 的管道。主要由旋风子、稳流元件、叶栅式分离元件和折流板式分离元件。组合而成,其分离元件几何模型如图 1 所示。

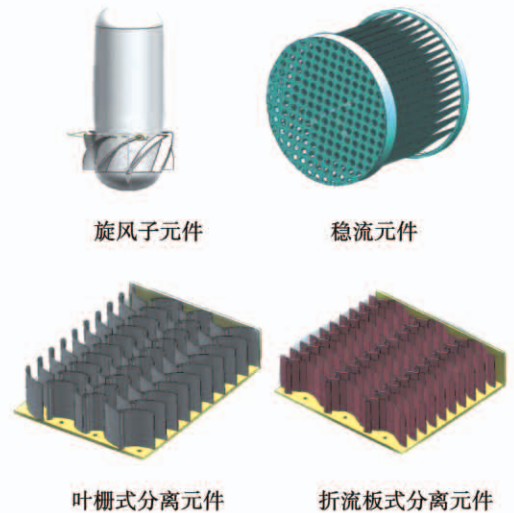


图 1 各组合元件的几何模型

Fig.1 Geometric model of each combination element

通过各元件组合成新型天然气气液分离器。天然气先经叶栅式分离元件和折流板式分离元件进行气液分离,再经过稳流元件,最后通过旋风子来完成分离器的分离过程。现场新型天然气气液分离器试验段如图 2 所示。

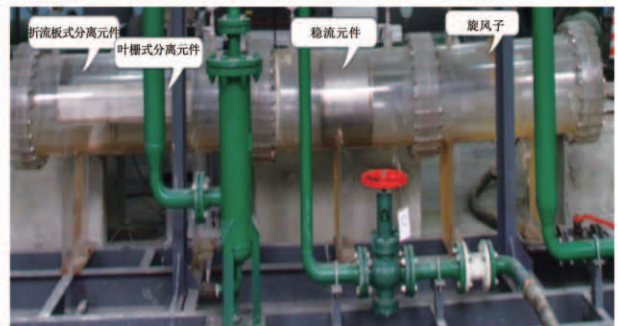


图 2 分离器试验段

Fig.2 Separator test section

1.2 试验系统

试验系统由压缩空气系统、调压系统、雾化粒子及股液生成系统、分离器试验段和 LDV (PDPA) 测试装置构成,系统构成如图 3 所示。



图 3 PDPA 测试系统

Fig.3 PDPA test system

2 分离性能测试

2.1 试验测试仪器与条件

PDPA 测试技术依托西华大学流体及动力机械教育部重点实验室拥有的美国 TSI 公司的 PD + PA/ (LDV) 系统。该系统主要由激光器、分光器、PDPA 探头、LDV 探头、PDM 图像处理单元、FAS 信号处理单元及相应专门测试分析软件等构成。主要部件有 LA70 - 5 一体式 5 W 氩离子激光器、配有 6 个光纤耦合器的 FBL - 3 fiberlight™ 多色光分光器、TM250 二维光纤发射探头 (70 mm 直径)、RV3070 PDPA 光纤接收探头 (110 mm 直径)、PDM1000 - 3P 三通道光电检测器组件和用于测量速度和尺寸 FSA4000 - 3P 信号处理器等。

2.2 试验方法

对分离器进口液体加注雾化粒子,测试工况:喷

雾流量为 $10.44 \text{ m}^3/\text{h}$, 试验段内压力为 0.055 MPa , 试验段内温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。气体流量分别为 10 、 20 、 33 、 40 、 53 和 $64 \text{ m}^3/\text{h}$ 分别表示为 Q_{10} 、 Q_{20} 、 Q_{33} 、 Q_{40} 、 Q_{53} 和 Q_{64} 进行 PDPA 测试, 具体试验器进口流量工况如表 1 所示。通过对分离器进、出口的粒径 D_{10} 和浓度 LWC 的测试, 对分离器分离效率进行分析。

表 1 试验测试工况

Tab.1 Test conditions

工况 序号	进气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	进液量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	液态水含量/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$	总流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
1	10	0.010 44	1 040.825	10.010 44
2	20	0.010 44	520.684	20.010 44
3	33	0.010 44	315.631	33.010 44
4	40	0.010 44	260.410	40.010 44
5	53	0.010 44	196.548	53.010 44
6	64	0.010 44	162.772	64.010 44

2.3 试验结果分析

在试验过程中通过压力表测得分离器的进口端到分离器的内部压降为 350 Pa , 由分离器的内部到出口端压降为 600 Pa , 经过分离器天然气的压降为 950 Pa 。

通过试验测定雾化粒子加注分离器进、出口试验数据如表 2 和表 3 所示。其中, 浓度用液态水含量 (LWC) 表示。

表 2 分离器进口测试数据

Tab.2 Test data of separator inlet

Q_{64}		Q_{53}		Q_{40}		Q_{33}		Q_{20}		Q_{10}	
粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
24.8	131.107	23.23	163.856	21.32	217.659	22.19	245.386	21.24	432.608	21.12	910.248
24.66	131.228	23.083	168.931	21.80	202.714	22.02	272.764	20.94	422.170	21.56	988.531
25.00	133.305	23.38	163.374	21.62	206.679	21.72	253.414	21.15	405.273	21.72	932.431
24.95	132.359	23.15	160.744	21.87	209.740	21.80	250.745	21.3	433.798	21.86	990.017
24.852	131.999	23.211	164.226	21.652	209.198	21.932	255.577	21.158	423.462	21.565	955.307

试验测定雾化粒子加注分离器进、出口试验数据如表 4 所示。在流量为 $10 \sim 33 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 分离器的分离效率明显下降, 在流量为 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 分离器的分离效率下降最大; 在 $33 \text{ m}^3/\text{h}$ 时分离器的分离效率降到最低值 95.16% , 主要原因是流量在

$33 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 试验气液混合不均匀, 导致内部流态紊乱, 以至于试验测得分离效率相对偏低。流量在 $33 \sim 64 \text{ m}^3/\text{h}$, 分离器的分离效率明显呈上升趋势, 分离效率与流量成正比关系。分离器最高分离效率为 99.29% , 最低分离效率为 95.16% 。

表3 分离器出口测试数据
Tab.3 Test data of separator outlet

Q_{64}		Q_{53}		Q_{40}		Q_{33}		Q_{20}		Q_{10}	
粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径/ μm	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
13.75	1.19	13.99	3.8084	13.91	8.6228	13.8	12.2288	13.34	15.3453	12.73	8.7456
13.77	1.3	13.98	3.8274	14.02	8.2734	13.81	12.5628	13.37	15.411	12.83	7.3751
13.68	1.25	13.95	4.3409	13.98	8.2201	13.75	12.1765	13.31	15.1363	12.68	5.8578
13.84	1.1798	13.87	4.109	13.92	8.3955	13.37	12.553	13.37	15.1513	12.67	5.1684
13.76	1.22995	13.947	4.02142	13.957	8.37795	13.6825	12.3802	13.347	15.2609	12.727	6.7867

表4 试验分离器进、出口试验数据处理
Tab.4 Processing of inlet and outlet
test data of test separator

气体流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$		分离效 率/%	粒径/ μm	
	进口	出口		进口	出口
64	131.99	1.23	99.07	24.85	13.76
53	164.23	4.02	97.55	23.21	13.95
40	209.20	8.38	96.00	21.65	13.96
33	255.58	12.38	95.16	21.93	13.68
20	423.46	15.26	96.40	21.16	13.35
10	955.31	6.79	99.29	21.56	12.73

由试验可知,分离器对该进口条件的气体中雾状液粒有较高的分离作用,且可以明显降低分离器出口气体中液粒的平均粒径。

3 内部流场数值模拟

3.1 数值计算

由于新型天然气气液分离器流道模型几何形状复杂且多为不规则区域,因此流场计算中采用适应性强的CFX-mesh方式生成非结构性网格,并对旋流子叶片、稳流元件、叶栅元件和折流板元件等细小的区域网格进行局部加密处理,既保证网格质量和计算稳定性,又保证计算速度和效率。经过多次的尝试,并结合计算服务器的承载能力,生成的网格模型如图4所示,网格单元总数为2 430 140,其中节点数为870 278,此时的网格数量和质量既满足了计算精度,又不会显著增加计算时间。

在数值模拟之前,已通过试验测定的分离器进口粒径平均值为0.022 mm,故此处模拟时取液体颗

粒粒径为0.022 mm。将表2中的流量数值转化为数值模拟中的进口输入参数,得到进口参数如表5所示。



图4 分离器模型的网格离散化

Fig.4 Grid discretization of the separator model

表5 分离器数值模拟工况

Tab.5 Working condition of the separator
for numerical simulation

工况	总流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	水体积分数	空气体积分数
1	0.006 175	0.001 043	0.998 957
2	0.009 455	0.000 522	0.999 478
3	0.013 720	0.000 316	0.999 684
4	0.016 016	0.000 261	0.999 739
5	0.020 281	0.000 197	0.999 803
6	0.023 890	0.000 163	0.999 837

表5给出了进口的流量和气液组份,按照实际情况进行数值计算模型边界条件和流动介质条件的设定,之后便在软件中进行模拟计算。计算收敛之后,对模拟结果进行分析。

分离器内部流动高速区主要分布在稳流元件前、稳流元件内部和折流板分离元件—框架间隙处,分离器内部速度分布不均,部分区域速度梯度变化较大。由于在管道中装置了稳流元件,造成了气液回流,导致稳流元件前速度分布不均匀,速度梯度变

化较大,不利于气液相分离。液相积存区压力较高,气相区压力较低。从进口到气相出口压力逐渐降低,总压降约为 500 Pa。

分离器内部的顶部液相体积分数较低,而底部较高,这是由重力沉降作用造成的。因此在分离器内部应尽量避免混合气体在竖直方向存在速度分量,即避免竖直方向混合气体的相对流动和质量交换,因为该流动掺混会导致分离效率的降低。气相组分在进口处贴壁区含量较低,说明液相在管壁出现附壁效应;经过稳流元件之后,大部分液体颗粒从缝隙中流出,达到了分离作用。通过旋风子子的作用使气液基本完全分离。

3.2 分离效率

表 6 是模拟的分离效率的结果。绝大部分的气体 (>99.5%) 均从气体出口流出,而绝大部分的液体 (>99.5%) 也均从液相出口流出,并且总的进口流量和出口流量满足质量守恒条件。

表 6 试验工况下的数值模拟分离效率
Tab.6 Separation efficiency of numerical simulation under test conditions

工况	进口总流量		出口总流量		分离效率/%
	总流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	液态水含量/ $g \cdot m^{-3}$	总流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	液态水含量/ $g \cdot m^{-3}$	
1	10	1 040.825	9.995	0.138	99.987
2	20	520.684	19.994	0.123	99.976
3	33	315.631	32.903	0.130	99.959
4	40	260.410	39.919	0.263	99.899
5	53	196.548	53.043	0.178	99.909
6	64	162.772	64.008	0.127	99.922

通过表 6 可以看出,分离效率均在 99.8% 以上,最小分离效率在工况流量为 40 m^3/h 时,该效率也已达 99.899%,说明该新型天然气气液分离器分离效果很好。小流量时,由于进口流速很低,因此分离效率很高,接近于 100%。分离器内部速度分布均匀后液相在管壁出现附壁效应,经过稳流元件之后,大部分液体颗粒从缝隙中流出,达到了初步的分离作用,经过旋风子子之后,液相得到很好的分离。

4 试验与数值模拟分离效率对比分析

试验分离效率和数值模拟分离效率的对比曲

线,如图 5 所示。

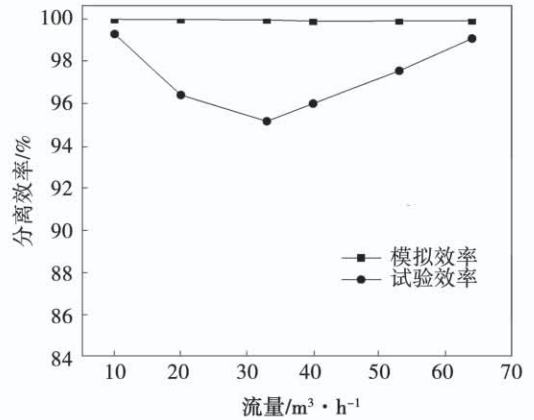


图 5 分离器分离效率的数值模拟值与试验值比较
Fig.5 The numerical simulation results of separator separation efficiency compared with the experimental results

从图 5 可以看出,模拟分离效率高于试验分离效率,但曲线的趋势基本一致,数值模拟和试验的最大误差出现在流量 33 m^3/h 工况,约为 4.7%。最小误差出现在在流量 10 m^3/h 工况,约为 0.7%,考虑到数值模拟中计算误差和试验误差因素等,模拟和试验的结果基本一致。

5 结论

通过数值模拟和试验,可得出利用旋风子、稳流元件、叶栅式分离元件和折流板式分离元件,组合成新型天然气气液分离器,对天然气的气液分离具有良好作用。

(1) 数值模拟中分离器内部速度分布不均,部分区域速度梯度较大,不利于气液相分离;分离器内部速度分布均匀后液相在管壁出现附壁效应,经过稳流元件之后,大部分液体颗粒从缝隙中流出,达到了初步分离作用,经过旋风子子之后,液相得到很好的分离。

(2) 试验在流量为 10 ~ 64 m^3/h 时,分离器的分离效率成抛物线形式,在 33 m^3/h 时分离器的分离效率降到效率最低值 95.16%,主要原因是流量在 33 m^3/h 时,试验气液混合不均匀,导致内部流态紊乱,以至于试验测得分离效率相对偏低。在 10 m^3/h 时分离器分离效率最高为 99.29%,分离器对该进

口条件的气体中雾状液粒有较高的分离作用,且可以明显降低分离器出口气体中液粒的平均粒径。

(3) 分离效率随着流量的增加先减小后增大,从进口到气相出口压力逐渐降低,总压降为 950 Pa。流动区域速度梯度大不利于气液相分离,流动掺混会导致分离效率的降低。

参考文献:

- [1] 胡燕林,胡子焯,胡礼萍. 天然气集输系统中液相危害及解决方案分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2013,33(20):106-108.
HU Yan-lin, HU zi-xuan, HU Li-ping. Analysis of liquid phase hazards and solutions in natural gas gathering and transportation system[J]. China petroleum and chemical industry standard and quality, 2013, 33(20):106-108.
- [2] 文绍牧,胡攀峰,沈萍,等. 含硫天然气脱水装置技术改造及效果分析[J]. 天然气工业,2004(12):127-131,198.
WEN Shao-mu, HU Pan-feng, SHEN Ping, et al. Technical renovation and effect analysis of natural gas dehydration plant containing sulfur[J]. Natural gas industry, 2004(12):127-131,198.
- [3] 陈明鹏. 气液分离技术设备发展[J]. 企业导报,2010(6):287.
CHEN Ming-peng. Development of gas-liquid separation technology and equipment[J]. Business herald, 2010(6):287.
- [4] 毛靖儒,王新军,徐廷相,等. 天然气气液两相分离器的设计与实验研究[J]. 天然气工业,1997(6):68-71,9.
MAO Jing-ru, WANG Xin-jun, XU Ting-xiang, et al. Design and experimental research of gas-liquid two-phase separator for natural gas[J]. Natural gas industry, 1997(6):68-71,9.
- [5] 李奎. 大型天然气过滤器的现状与改进措施[J]. 石油矿场机械,2004(S1):124-126.
LI Kui. Current situation and improvement measures of large natural gas filters[J]. Oil field machinery, 2004(S1):124-126.
- [6] 王绍周. 气液分离及高效分离器的应用探索[J]. 小氮肥,2007(3):25.
WANG Shao-zhou. Application of gas-liquid separation and efficient separator[J]. Small nitrogen fertilizer, 2007(3):25.
- [7] 李柏松,姬忠礼,陈洪玉. 天然气过滤器气液分离性能的实验研究[J]. 天然气工业,2007(10):123-125,147.
LI Bai-song, JI Zhong-li, CHEN Hong-yu. Experimental study on gas-liquid separation performance of natural gas filter[J]. Natural gas industry, 2007(10):123-125,147.
- [8] 李东芳,谢绪扬,高光才,等. 天然气聚结过滤器气液分离性能的实验研究[J]. 化工机械,2015,42(3):317-323.

- LI Dong-fang, XIE Xu-yang, GAO Guang-cai, et al. Experimental study on gas-liquid separation performance of natural gas coalescing filter[J]. Chemical machinery, 2015, 42(3):317-323.
- [9] 陈秀珍. 天然气脱水用旋流过滤器结构优化及性能研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2014.
CHEN Xiu-zhen. Study on structure optimization and performance of cyclone flow filter for natural gas dehydration[D]. Qingdao: China university of petroleum (East China), 2014.
- [10] 谭蛟龙,秦婧,郭钰,等. 天然气净化用旋风分离器气液分离性能[J]. 化工管理,2014(14):197.
TAN Jiao-long, QIN Jing, GUO Yu, et al. Gas-liquid separation performance of cyclone separator for natural gas purification[J]. Chemical industry management, 2014(14):197.
- [11] 张昱威,李方俊. 天然气聚结滤芯气液分离性能研究[J]. 当代化工,2015,44(8):1948-1951.
ZHANG Yu-wei, LI Fang-jun. Research on gas-liquid separation performance of natural gas coalesce filter core[J]. Contemporary chemical industry, 2015, 44(8):1948-1951.
- [12] 史夏逸. 天然气折流板式分离器流场和性能的数值模拟[D]. 北京:中国石油大学(北京),2016.
SHI Xia-yi. Numerical simulation of flow field and performance of natural gas baffle separator[D]. Beijing: China university of petroleum (Beijing), 2016.
- [13] 王英. 用于天然气净化的导叶式旋风管三相旋流分离数值模拟研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
WANG Ying. Numerical simulation of three-phase cyclone separation in a guide vane cyclone for natural gas purification[D]. Guangzhou: South China university of technology, 2012.
- [14] 吴小林,熊至宜,姬忠礼. 天然气净化用旋风分离器气液分离性能[J]. 化工学报,2010,61(9):2430-2436.
WU Xiao-lin, XIONG Zhi-yi, JI Zhong-li. Gas-liquid separation performance of cyclone separator for natural gas purification[J]. Journal of chemical industry and technology, 2010, 61(9):2430-2436.
- [15] KIM H, TONGCHAI S, LIM O. A Study on the Particle Size and Velocity Profile on a Gasoline Port Injector Using a Phase Doppler Particle Analyzers (PDPA) [J]. Energy Procedia, 2018(145):374-380.
- [16] TAMHANE T V, JOSHI J B, MUDALI Kamachi, et al. Patil. Measurement of drop size characteristics in annular centrifugal extractors using phase Doppler particle analyzer (PDPA) [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012(90):985-997.