

天然气输送用过滤分离设备性能测定与分析

姬忠礼

(中国石油大学机械与储运工程学院,北京 102249)

摘要:采用高压管道粉尘在线检测装置对天然气站场内多管旋风分离器和过滤分离器进出口管道内颗粒物浓度和粒径分布进行测定,得到多管旋风分离器和过滤分离器的实际分离性能。现场测试结果与常压常温下过滤分离设备的性能测定结果对比表明:多管旋风分离器现场的分离效率与实验室测试结果相一致,常压常温工况下的性能测定数据可以作为评价高压实际工况运行的指标。过滤分离器现场测试结果与常压常温下测试结果存在差别,主要原因在于滤芯现场使用过程中,滤芯纤维失效会导致较大颗粒穿透,使过滤分离器效率下降。

关键词:天然气管道;多管旋风分离器;过滤分离器;颗粒物在线检测

中图分类号:TE 931.1 **文献标志码:**A

Performance measurement and analysis of filtration and separation equipment for natural gas transportation

Ji Zhong-li

(College of Mechanical and Transportation Engineering in China University of Petroleum,
Beijing 102249, China)

Abstract: The concentration and size distribution of dust particles at the inlet and outlet of multi-cyclone separators and filters in two domestic natural gas stations are measured by the particle online measuring devices for high pressure gas, and the separation performances of in-site cyclones and filters are evaluated. These field test results are compared with the laboratory test results under atmospheric temperature and pressure. The field test results of multi-cyclone separators are in agreement with the laboratory test results, and so the data measured under atmospheric temperature and pressure can be used as the indicator for evaluating separation performance of multi-cyclone under high pressure condition. However, the field test results of filters show some differences from the laboratory test results. The overall efficiency of filters decreases with the operation period because some large particles can penetrate the filter candle.

Key words: gas pipeline; multi-cyclone; filter; particle online measurement

在高压天然气处理和长距离管道输送过程中,其中的固体粉尘和液滴等杂质会造成大型压缩机损坏、计量仪器失效以及站场停输等重大事故,严重影响管道的供气安全和长周期运行。过滤分离设备用于去除天然气中的石英砂和铁锈等固体杂质以及输送过程中冷凝析出的游离水和轻烃等液滴。Shin等^[1]利用两台光散射气溶胶计数器同时对旋风分离器进出口气体中颗粒的粒径分布及计数浓度进行了测量,确定出旋风分离器的分离效率。Iozia等^[2]

利用光散射颗粒分析仪测量了气溶胶颗粒的浓度和粒径分布。Kim等^[3]利用TSI 3300气动粒度仪对旋风分离器上下游的颗粒浓度进行了测量。Yoshida^[4]用激光散射法测量了分离器内颗粒的粒径分布情况。Huang等^[5]利用TSI 3936扫描电迁移粒径仪及TSI 3321空气动力学粒径分析仪测量了过滤分离器上下游气溶胶浓度和粒径分布,从而确定气溶胶粒子透过率。Charvet等^[6]利用光学粒子计数器测量了粒径在0.3~20 μm的颗粒,计算出过滤器

的过滤效率。Yun 等^[7]利用 TSI 3025 凝结核粒子计数器对过滤分离器上下游颗粒浓度进行了测量,得到了过滤分离器的颗粒透过率。目前对高压工况下过滤分离设备的性能通常采用离线取样检测的方式对管道内颗粒物进行测定,许乔奇等^[8]利用颗粒物取样橇对国内某天然气管道的含尘情况进行了测定。Xiong 等^[9]利用高压天然气管道内粉尘离线采样检测装置分别对天然气长输站场内高压多管旋风分离器和工艺气过滤器的性能进行了检测。张星等^[10]研制了一套高压天然气颗粒在线检测系统,可以在线检测天然气管道内粉尘变化情况,但需要先利用减压装置将高压天然气的压力降低到常压后,再采用在线粒径分析仪进行检测。笔者研究了可直接用于高压工况下气体管道内颗粒物的在线测定装置,无需减压装置,提高颗粒物在线检测仪的耐压能力,整体结构简单可靠。利用该套装置对天然气长输站场内的旋风分离器和过滤器的性能进行测定,并通过常温常压下的实验对比高压工况下过滤分离设备的分离性能。

1 过滤分离设备分离性能检测装置与方法

1.1 高压天然气管道内颗粒物在线检测装置

高压气体管道内颗粒物在线检测流程如图 1 所示。在线检测装置可分为等速采样、流量控制、粒子在线分析和减压放空等 5 部分。通过两种方法可实现等速采样:一是采用皮托管测量管路的气速,皮托管与采样嘴的设计与匹配方法参照文献[11],根据已知气速及采样嘴尺寸可确定采样流量,进而实现等速采样;二是利用静压平衡型取样器^[9]使等速采样管的内外静压差为零,此时即可认为采样管内流速等于管道内测点上的流速。通过等速取样获得具有代表性的颗粒物后,再采用具有耐高压的光学粒子分析仪进行测量。

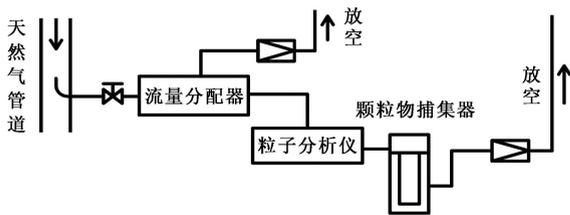


图 1 高压管道内颗粒在线检测流程

Fig. 1 Particle online measurement device at high pressure

由于在线检测分析仪在恒定流量下才能实现准确测量,因此等速取样后的气体首先通过流量分配

器,将一部分含尘气体分配给在线检测仪器。进行在线检测的同时利用离线采样装置对管道内粉尘取样,用于后期数据分析比对,最后两路气体分别计量后减压放空。整套系统通过 PLC 进行控制,实现数据的自动采集、存储与实时分析。

1.2 常温常压下过滤分离设备分离效率的测定

常温常压下在线检测装置同高压工况类似,由于不受高压限制,只须将取样嘴伸入过滤分离设备的进出口管路进行等速取样,利用真空泵从含尘气体管路中抽取具有代表性的颗粒样品后进行在线分析,同时采用高精度滤膜验证在线检测的准确性。

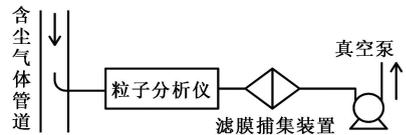


图 2 常温常压在线检测流程

Fig. 2 Particle online measurement device at atmospheric temperature and pressure

2 测定结果分析

2.1 多管旋风分离器性能评价

2.1.1 高压工况下

利用颗粒物在线检测装置对国内长输天然气管道计量站内多管旋风分离器的实际分离性能进行了测定。被测粉尘的物性和气体压力、气体温度对测量结果的影响,采用许乔奇等^[12]提出的模型进行修正。该站配置有 4 台高压多管旋风分离器,单台多管分离器的设计气量为 $103.75 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ (标准工况下),设计压力 6.3 MPa,分离器直径为 1200 mm,内部安装 19 个旋风子,进出口的管道规格为 $\Phi 219 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,实际工作压力 5.0 MPa 左右。选取站内一台旋风分离器的进出口管道进行测定,开孔位置及取样位置的确定依据相关标准^[13]。

在性能测试过程中,同时进行颗粒物在线检测和离线检测。即采用 $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ 过滤精度的滤筒捕集粉尘时,同时采用 Welas 3000 气溶胶粒径谱仪及耐高压气溶胶导管技术^[14],从而实现了高压工况下对天然气中颗粒物含量情况的在线分析,并以离线采样得到的结果为基准评价在线测量结果。在现场工况下共进行了 8 组离线取样,每次取样时间为 2 h,同时记录累积采样流量。在线检测装置可以实时显示管道内粉尘颗粒物的粒径分布和含尘浓度,离线检测结果为 2 h 内管道颗粒物的平均浓度。在测试前后将离线取样的滤筒分别置于真空干燥箱中,在

150 °C 下干燥 4 h 后,利用精度为 0.1 mg 的瑞士 MettlerToledo 公司 AL204-IC 型电子分析天平称重,得到粉尘样品的质量,由采样气流的流量获得离线采样的质量浓度,利用美国 Multisizer 3 型 Coulter 粒度分析仪分析离线取样样品的粒度分布。

所测定的旋风分离器进口管段天然气含粉尘浓度为 10.04 ~ 61.54 mg/m³,在线检测和离线检测所得的颗粒物浓度如图 3 所示。由图 3 中可以看出,在线检测所得粉尘浓度在一定范围内波动,说明天然气管道内粉尘浓度不稳定,在所测试的 16 h 内,可计算得到在线、离线检测平均浓度分别为 26.32 和 28.94 mg/m³,两种检测方法所得粉尘浓度变化范围基本一致。

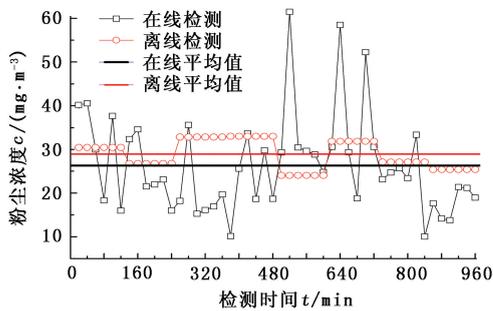


图 3 多管旋风分离器进口浓度变化

Fig. 3 Particle concentration change in multi-cyclone inlet

旋风分离器出口管路天然气含粉尘浓度为 1.02 ~ 8.76 mg/m³,颗粒粒径分布如图 4 所示。可见大部分粉尘颗粒集中在 10 μm 以下,10 μm 以上粉尘颗粒个数比例非常小。

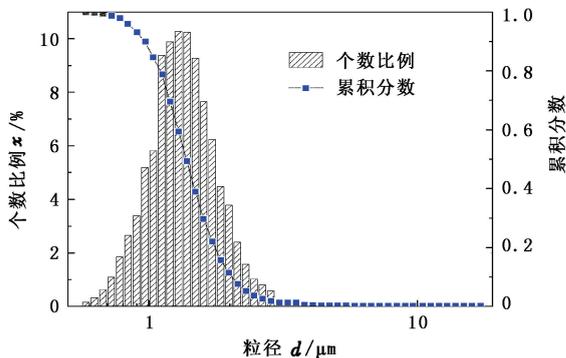


图 4 多管旋风分离器出口管路粉尘粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution in multi-cyclone outlet

受现场条件所限,进出口管道内粉尘在线测量不是同时进行,而是采用交替检测的方式进行,因此在计算旋风分离器分级效率时通过对旋风分离器出口管路进出口 2 h 内所有在线粒径分布的平均来计算,图 5 为离线测试中一组滤筒对应的在线粒径分布计算得到的旋风分离器的分级效率曲线。整体而

言,随着粒径的增大,旋风分离器的过滤效率逐渐升高。在粒径大于 6 μm 后,分级效率升高缓慢,在 10 μm 处达到 100%。因此旋风分离器可去除 10 μm 以上的粒子,达到了设计指标。

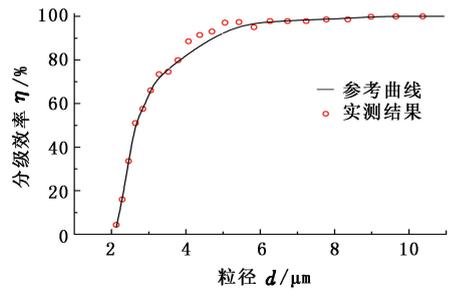


图 5 多管旋风分离器的分级效率

Fig. 5 Grade efficiency of multi-cyclone

2.1.2 常温常压下

选取结构尺寸与高压多管旋风分离器中旋风管完全相同的分离单管,测定了其常温常压状态下的分离性能。选用平均粒径 8 ~ 9 μm 的滑石粉作为实验粉尘,测定不同进口风速及浓度工况下旋风管的性能。入口速度为 15 m/s 时旋风管的分离效率见图 6。该旋风管在不同风速下,除去 10 μm 以上颗粒的能力如表 1 所示。

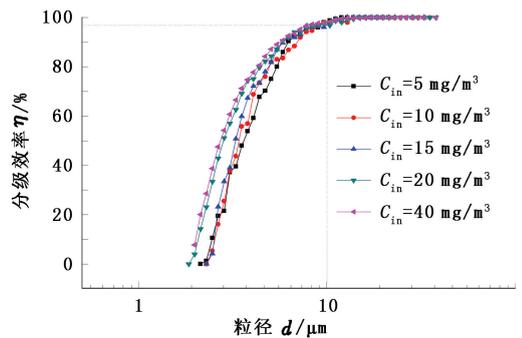


图 6 v_{in} = 15 m/s 时入口浓度对颗粒分级效率的影响

Fig. 6 Effect of inlet particle concentration on grade efficiency for v_{in} = 15 m/s

表 1 不同风速、浓度下旋风管去除 10 μm 以上颗粒的分离效率

Table 1 Separation efficiency for particles size larger than 10 μm at different inlet velocity and particle concentration

风速 v/ (m · s ⁻¹)	浓度 c/(mg · m ⁻³)				
	5	10	15	20	40
10	97.1	98.5	99.9	99.9	98.9
15	98.6	99.1	100	98.5	99.2
20	99.5	99.8	99.9	100	100
25	99.9	99.8	98.5	99.5	99.3

由表1中可以看出,在不同入口速度和浓度下旋风管除去10 μm以上颗粒的效率都接近100%,即便是浓度较低的工况,也能够除去10 μm以上的颗粒,这与JI等^[15]的研究结果相一致。由此可知,旋风分离器在常温常压下分离10 μm以上颗粒的效率同高压工况下的效率接近,常温常压下旋风分离器的性能测试数据可用于指导高压现场用旋风分离器的选型、操作运行和性能评价。

2.2 长输管道用过滤分离器性能评价

2.2.1 高压工况下

对某天然气长输站场内的卧式过滤分离器进出口管路内粉尘浓度和粒径进行检测。该站配置有5台过滤分离器,输气总量为 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ (标准工况下),设计压力6.4 MPa,实际工作压力3.5 MPa左右,单台分离器设计气量 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。选定站内一台过滤器作为试验测定对象。

同样采用在线检测与离线检测相结合的方式,共进行8组离线取样,单次取样时间为2 h。

图7为在线检测得到的过滤分离器进口管段粉尘粒径分布。可见10 μm以上的颗粒的个数和所占体积比例较小,大部分粉尘颗粒粒径在10 μm以下。图8为两种检测方法所得到的粉尘浓度对比图。在所测试的16 h内,可计算得到在线、离线检测平均浓度分别为3.64和3.36 mg/m³,二者吻合较好。

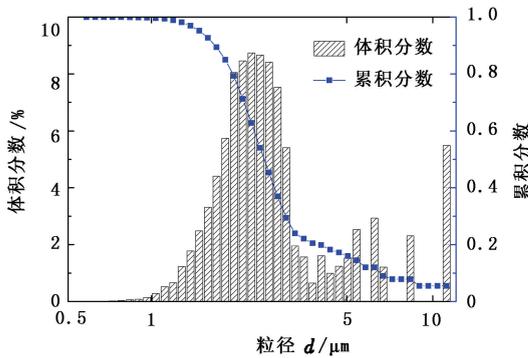


图7 过滤分离器进口粉尘粒径分布

Fig.7 Particle size distribution at inlet of filter

过滤分离器出口管路粉尘浓度为1.58~3.25 mg/m³,粒径为0.56~8.98 μm。图9为计算得到的过滤分离器的累积效率。由图9可知,随着粒径的增大,累积效率逐渐升高。对于粒径小于1 μm的颗粒,过滤效率约为60%。对于粒径大于5 μm的颗粒,其最低过滤效率为90%。但在4~6 μm内颗粒累积效率有所下降,这可能是由于经滤分离器过滤后的小粒子发生团聚,在此范围内形成了大粒子而造成的。

该输气站过滤分离器滤芯给定的设计性能参数为:粒径大于1 μm的粉尘,过滤效率99.9%。由此可知,该过滤分离器不能完全除去5 μm以上的颗粒,对于粒径大于1 μm的粉尘,过滤效率也达不到99.9%,该过滤分离器没有达到设计的性能指标。

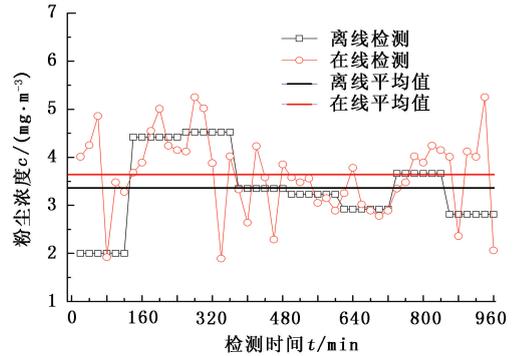


图8 过滤分离器进口浓度变化

Fig.8 Particle concentration change in filter inlet

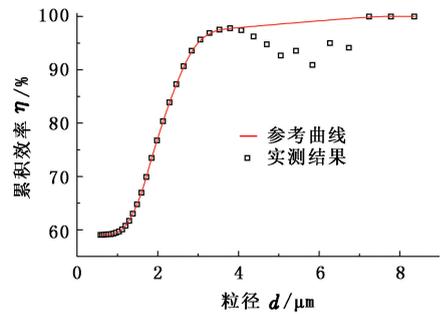


图9 过滤分离器累积效率变化

Fig.9 Cumulative efficiency change of dust particle for filter

2.2.2 常温常压下

依据国内、美国和欧洲有关空气滤材过滤性能测定标准^[16-18],建立了全尺寸滤芯性能检测装置,图10所示为流程图。利用气溶胶发生器,以DEHS

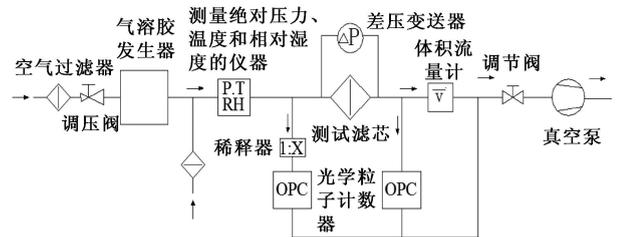


图10 滤芯过滤性能测试流程

Fig.10 Test workflow of filtration performance of filter candle

作为实验液滴,以KCl颗粒作为实验用粉尘,颗粒浓度控制在180~200 mg/m³,粒径为0.31~17.17 μm。测试期间控制系统内的温度为(23±5)℃,相对湿度为(55±15)%。

选取与现场同一厂家相同规格的新滤芯,对现场分别运行 3、6 及 9 个月的滤芯进行了常压常温下性能测试,滤芯气-液、气-固过滤累积效率如图 11

所示。滤芯出口气体内的液滴浓度、相应的粒径分布及累积效率见表 2,而粉尘浓度、粒径分布及不同粒径的累积效率见表 3。

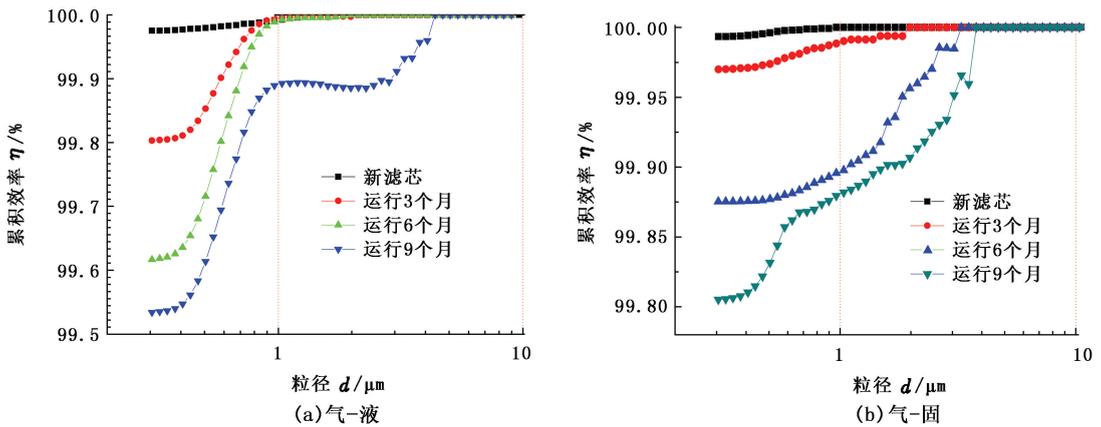


图 11 滤芯气-液、气-固过滤累积效率

Fig. 11 Cumulative efficiency of liquid droplet and dust particle for filter candle

表 2 不同运行时间下的滤芯气液累积效率

Table 2 Cumulative efficiency of liquid droplet for filter candle at different operation period

运行时间	液滴浓度 $c/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	粒径 $d/\mu\text{m}$	累积效率 $\eta/\%$	
			大于 $1 \mu\text{m}$	大于 $5 \mu\text{m}$
未使用	0.04 ~ 0.06	0.31 ~ 1.20	99.990	100
3 个月	0.22 ~ 0.38	0.31 ~ 1.98	99.990	100
6 个月	0.49 ~ 0.70	0.31 ~ 1.85	99.989	100
9 个月	0.74 ~ 0.86	0.31 ~ 4.01	99.889	100

由表 2 可知,对于粒径大于 $1 \mu\text{m}$ 的液滴,随着运行时间增加,滤芯的累积效率逐渐降低。当滤芯使用 9 个月后,其平均浓度约为新滤芯下游平均浓度的 16 倍,下游液滴浓度明显增大。而对于粒径大于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒,滤芯累积效率没有变化,均为 100%,可完全除去 $5 \mu\text{m}$ 以上的大颗粒。

表 3 不同运行时间段滤芯气固分离性能

Table 3 Cumulative efficiency of dust particles for filter candle at different operation period

运行时间	粉尘浓度 $c/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	粒径 $d/\mu\text{m}$	累积效率/ $\%$	
			大于 $1 \mu\text{m}$	大于 $5 \mu\text{m}$
未使用	0.00 ~ 0.01	0.31 ~ 0.90	100	100
3 个月	0.00 ~ 0.01	0.31 ~ 1.85	99.989	100
6 个月	0.26 ~ 0.40	0.31 ~ 3.05	99.896	100
9 个月	0.35 ~ 0.52	0.31 ~ 3.52	99.880	100

表 3 表明,对于粒径大于 $1 \mu\text{m}$ 的液滴,随着运行时间的增加,滤芯的累积效率逐渐降低,当滤芯使用 9 个月后,下游最大粉尘浓度从 0.01 增长为 $0.52 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。而对于粒径大于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒,滤芯累积效

率没有变化,均为 100%,可完全除去 $5 \mu\text{m}$ 以上的大颗粒。分析认为该输气站使用的是聚酯纤维滤芯,其滤材纤维和孔径会随着阻力增加发生改变,造成过滤分离器出口浓度的上升和分离效率的降低。此外,由于天然气长输管道中常含有液滴,使得滤芯出口处的小颗粒聚结成大颗粒,导致过滤分离器实际运行中 $1 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 颗粒效率偏低。此时过滤分离器滤芯的压降增长缓慢,因此不能将压降作为过滤分离器是否正常运行的唯一判别指标。

3 结 论

(1) 研发的高压气体管道内颗粒物在线检测装置具有操作安全、性能可靠和数据重复性好等特点,满足天然气长输管道站场过滤分离设备的性能测定要求。

(2) 旋风分离器可以除去 $10 \mu\text{m}$ 以上颗粒,同实验室常压常温工况下性能测试结果一致,常温常压下旋风分离器的性能测试数据可用于指导高压现场用旋风分离器的选型、操作运行和性能指标。

(3) 高压工况下过滤分离器的滤芯分离性能随着运行周期的增加而降低,当天然气中含有液体杂质时,过滤分离器滤芯的压降增长缓慢,压降变化不能完全反映过滤器的过滤性能,因此不能将压降作为评判过滤分离器是否正常运行的唯一指标。

参考文献:

[1] SHIN Mi-soo, KIM Hey-suk, JANG Dong-soon, et al. A

- numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25:1821-1835.
- [2] IOZIA Donna Lee, LEITH David. The logistic function and cyclone fractional efficiency[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1990, 12(3):598-606.
- [3] KIM J C, LEE K W. Experimental study of particle collection by small cyclones[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1990, 12(4):1003-1015.
- [4] YOSHIDA Hideto. Effect of apex cone shape and local fluid flow control method on fine particle classification of gas-cyclone[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 85:55-61.
- [5] HUANG Sheng-hsiu, CHEN Chun-wan, et al. Penetration of 4.5 nm to 10 μm aerosol particles through fibrous filters[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38:719-727.
- [6] CHARVET A, GONTHIER Y, et al. Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65:1875-1886.
- [7] YUN Ki Myoung, SURYAMAS Adi Bagus, et al. Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 75:340-345.
- [8] 许乔奇, 姬忠礼, 张星, 等. 天然气管道内颗粒物采样分析装置设计与应用[J]. *油气储运*, 2013, 32(3):317-320.
XU Qiao-qi, JI Zhong-li, ZHANG Xing, et al. Design and application of particulate matters sampling and analysis device for gas pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(3):317-320.
- [9] XIONG Z, JI Z, WU X, et al. Experimental and numerical simulation investigations on particle sampling for high-pressure natural gas[J]. *Fuel*, 2008, 87(13/14):3096-3104.
- [10] 张星, 姬忠礼, 陈鸿海, 等. 高压天然气管道内粉尘在线检测方法[J]. *化工学报*, 2010, 61(9):2334-2339.
ZHANG Xing, JI Zhong-li, CHEN Hong-hai, et al. Method of dust on-line measurement in high-pressure natural gas pipeline[J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(9):2334-2339.
- [11] GB/T 16157-1996 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[S]. 北京: 国家环境保护局, 1996.
- [12] 许乔奇, 姬忠礼, 刘刚, 等. 高压天然气管道内颗粒物在线检测结果校正方法[J]. *过程工程学报*, 2012, 12(5):870-875.
XU Qiao-qi, JI Zhong-li, LIU Gang, et al. Experimental research on online determination technology of particles in high pressure natural gas pipeline[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2012, 12(5):870-875.
- [13] ANSI/ASME PTC 38-1980 Determining the concentration of particulate matter in a gas stream[S]. America: The American Society of Mechanical Engineers, 1980.
- [14] 姬忠礼, 许乔奇, 等. 高压气溶胶检测导管: 中国, 201020670641.5[P]. 2011-09-14.
- [15] JI Z L, XIONG Z Y, WU X L, et al. Experimental investigations on a cyclone separator performance at an extremely low particle concentration[J]. *Powder Technology*, 2009, 191:254-259.
- [16] GB/T 6165-2008 高效空气过滤器性能测试方法效率和阻力[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] EN779-2012 Particulate air filter for general ventilation-determination of the filtration performance[S]. England: The British Standards Institution, 2012.
- [18] ASHRAE52. 2-2007 Method of testing general ventilation air cleaning devices for removal efficiency by particle size[S]. America: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2007.

(编辑 沈玉英)