

天然气净化用多管旋风分离器的分离性能

吴小林¹, 熊至宜², 姬忠礼²

(1. 中国石油大学化工学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学机电学院, 北京 102249)

摘要: 为了系统评价天然气净化用多管旋风分离器的分离性能, 在线测量了入口气速 6~24 m/s、入口颗粒浓度 30~2000 mg/m³ 范围内多管旋风分离器的分离效率和分级效率。结果表明, 多管旋风分离器的分离效率和分级效率都随入口气速和入口颗粒浓度增大而提高。与单管旋风分离器相比, 在相同实验条件下, 多管旋风分离器的分离效率下降 2%~15%; 单管旋风分离器基本能除净粒径大于 10 μm 的颗粒, 而多管旋风分离器只能去除 15 μm 以上的颗粒。多管旋风分离器的压降主要是内部单管旋风分离器的压降, 占整个压降的 80%~90%。

关键词: 多管旋风分离器; 分离效率; 分级效率; 压降; 天然气; 颗粒

中图分类号: TQ05118⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2010)01-0041-05

1 前言

在天然气长输管道上, 为了增压和分输的要求, 需要在沿线设置多个工艺站场(压气站、分输站、分输清管站和独立清管站等)。在工艺站场内一般都装备有多管旋风分离器和过滤器, 目的是除去天然气中含有的砂和铁锈等固体杂质及少量的游离水和轻烃等液滴, 以保证天然气的气质、管道上阀门的密封、流量计的测量精度和大型压缩机组的稳定运行。天然气净化用多管旋风分离器由筒体直径 50~150 mm 的多个单管旋风分离器并联组成; 由于天然气在输送过程中含尘浓度较低, 一般小于 200 mg/m³, 因此, 天然气净化用多管旋风分离器入口颗粒浓度较低。

目前已有较多学者对单管旋风分离器在不同入口浓度时的分离性能和压降展开了详细研究。Stern 等^[1]、Patterson 等^[2]、罗晓兰等^[3]、Hoffmann 等^[4,5]研究发现入口浓度对分离效率有影响时的最低浓度分别为 2.5, 5, 0.1 和 5 g/m³, 随入口颗粒浓度增大分离效率升高。Mothes 等^[6]通过在线测量发现, 在入口颗粒浓度较低时, 虽然分离器总分离效率随入口颗粒浓度增加而升高, 但分级效率几乎不变。Yuu 等^[7]以直径 296 mm 的旋风分离器为研究对象, 发现即使入口颗粒浓度为 0.2 g/m³, 颗粒的存在也会使旋风分离器的压降下降。Ji 等^[8]利用在线测量方法系统研究了筒体直径为 150 mm 的单切向入口旋风分离器在入口颗粒浓度为 5~2000 mg/m³ 时的分离效率和分级效率, 认为低浓度下粉尘颗粒团聚是影响旋风分离器分离效率的一个很重要的因素。通过前面的研究可得出这样的结论: 单管旋风分离器的分离效率随入口气速和入口颗粒浓度增加而升高, 压降随入

口气速增加而增加、随入口颗粒浓度增加而有所下降。

另外也有一些学者对旋风分离器的并联运行进行了研究, Koffman^[9]对 14 个小型旋风分离器并联运行时的分离效率进行了测定, 发现分离效率从单个旋风分离器运行时的 96%降低到了并联运行时的 92.2%。另外, Broodryk 等^[10]在冷态实验装置上发现, 旋风分离器并联结构会导致系统流动存在多个平衡态, 且随入口气速增加, 通道间的不均匀程度增加。王江云等^[11]对炼油厂催化裂化高温烟气能量回收装置中的第三级旋风分离器进行了数值模拟, 其模拟的第三级旋风分离器由结构相同的 3 个单管旋风分离器左右相互并联等距排列, 共享集气室、集尘室和进气室, 结果发现, 3 个旋风分离器在排尘口发生窜流现象。尽管如此, 有关多管旋风分离器分离效率的测量方法、多管旋风分离器与单管分离器在分离效率和分级效率的区别和联系, 及影响多管旋风分离器分离效率的因素等方面的研究还少有报道。基于此, 本工作利用文献[8]介绍的在线测量方法, 系统测量了多管旋风分离器的分离性能, 对比了单管和多管旋风分离器在相同入口条件时分离性能和压降的差别。

2 实验

2.1 材料

实验以空气为介质, 温度为室温, 压力为大气压。为模拟天然气实际的粉尘, 实验用粉尘为与天然气输气管道所含粉尘粒径分布接近的 800 目(18 μm)滑石粉, 粒径范围 0~40 μm, 中位粒径 10~12 μm, 密度 2700 kg/m³。

2.2 实验装置与分析仪器

图 1 为常压下多管旋风分离器的实验装置示意图, 装置由加料系统、流量测量系统、粉尘颗粒检测系统和

收稿日期: 2009-08-17, 修回日期: 2009-12-25

作者简介: 吴小林(1963-), 女, 北京市人, 博士, 教授, 主要从事油气分离设备和多相流方面的研究, E-mail: wuxl@cup.edu.cn.

实验对象组成。

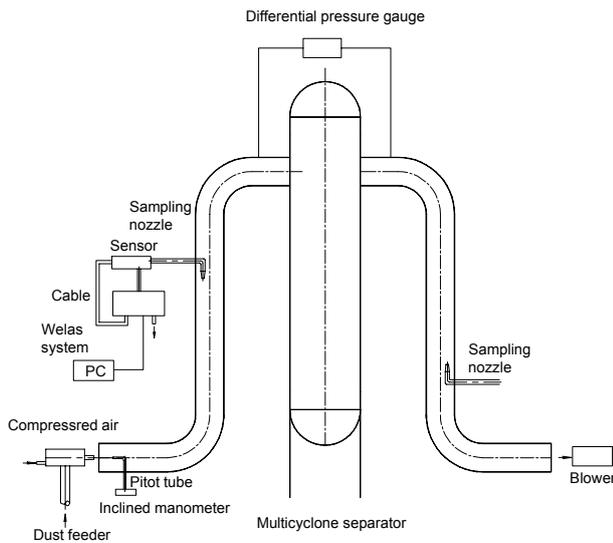


图 1 多管旋风分离器实验装置
Fig.1 Schematic diagram of experiment set-up for multi-cyclone separator

图 2(a)为实验所用多管旋风分离器, 内含 15 个相同结构和尺寸的筒体直径为 150 mm 的单管旋风分离器, 单管旋风分离器结构如图 2(b)所示, 所有单管旋风分离器共用一个进气室、排尘室和排气室。

德国 Palas 公司生产的 Welas2000 气溶胶粒径谱仪用于测量旋风分离器进口颗粒的浓度及粒径分布, 主要

由控制器与颗粒测量传感器组成, 采用光散射原理实现对气溶胶浓度与粒径分布的测量, 欧洲各国广泛用于过滤介质与分离设备效率的检测。控制器有一个真空泵, 可吸入被测含尘气体, 粉尘颗粒最后吸附在控制器自带的高效过滤芯上。控制器上装有白光灯泡和光纤, 是测量的关键部件。测量时由控制器自带的真空泵定流量(5 L/min)采样, 采出的气体进入 Welas 颗粒测量传感器中, 在颗粒通过光学测量空间时, 一束从光纤传过来的白光照射在气溶胶上, 粒子就会对光产生漫散射, 散射信号经另一根光纤传入控制系统, 在其中进行信号处理, 然后将处理后的结果传入电脑, 经专门软件进行分析整理。

2.3 实验方法

实验采用负压操作, 气体直接由风机抽出放空, 由安装在旋风分离器进气管道上的皮托管测定风速。粉尘经称重后由加料器 BEG-100(Palas 公司)加入进料口, 经进气管道后被气流带入旋风分离器中分离。实验过程中, Welas 气溶胶粒径谱仪全程测量旋风分离器入口及出口的颗粒粒径分布和颗粒浓度, 从而得到旋风分离器的分离效率和分级效率。另外, 多管旋风分离器进出口管道的采样位置和采样嘴在管道中的位置都严格按等动采样要求进行, 并通过改变采样嘴的尺寸保证不同速度下的等动采样, 如图 1 所示。多管旋风分离器流量为 $794\sim 3174\text{ m}^3/\text{h}$, 换算成内部单管旋风分离器的平均入口速度 $V_{in}=6\sim 24\text{ m/s}$, 颗粒浓度 $C_{in}=30\sim 2000\text{ mg/m}^3$ 。

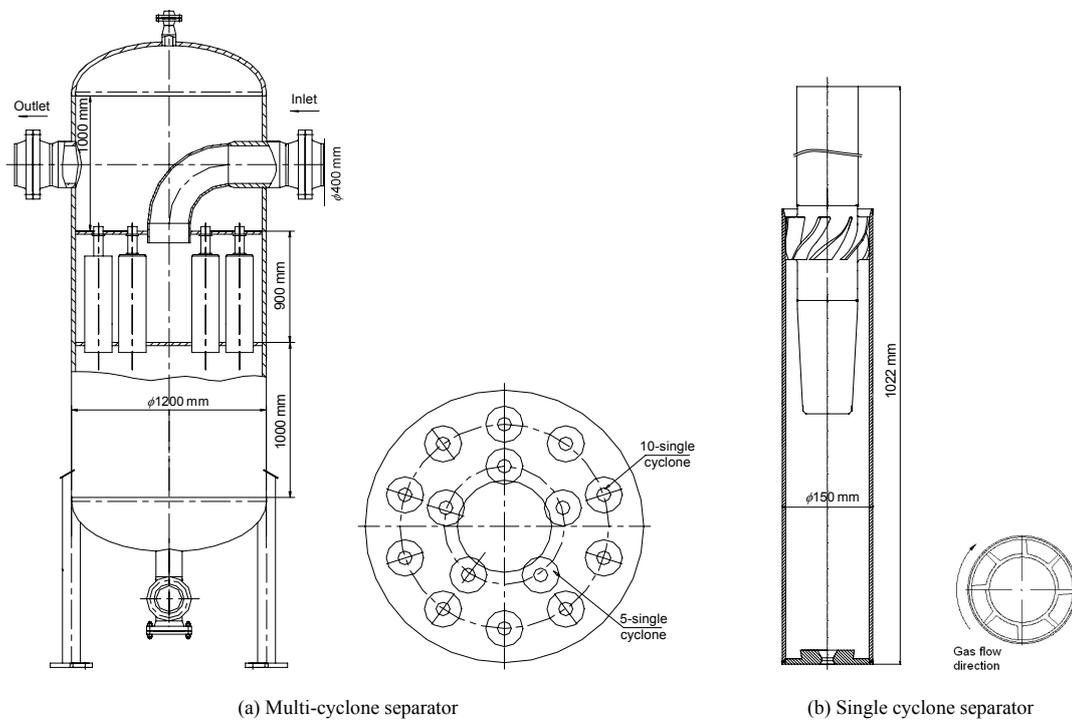


图 2 多管旋风分离器及内部旋风子示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-cyclone and single cyclone separators

为对比多管旋风分离器和单管旋风分离器分离性能的异同, 利用同样方法测定了如图 2(b)所示的单管旋风分离器的分离效率.

3 结果和讨论

3.1 多管旋风分离器的分离效率

图 3 给出了 4 个不同入口速度下(为了与单管旋风分离器对比方便, 将多管旋风分离器的流量换算成相同条件下单管旋风分离器的入口速度)多管旋风分离器分离效率随入口浓度的变化情况, 每个浓度下的分离效率至少测量 3 次, 取平均值. 从图可看出, 在入口浓度很低时, 同一浓度下分离效率波动较大, 而浓度高时分离效率较稳定. 尽管多管旋风分离器的分离效率在不同浓度下有所波动, 入口颗粒浓度在 30~2000 mg/m³ 范围内变化时, 分离器分离效率随其增大而增加, 但在低浓度下多管旋风分离器的分离效率不高, 如当入口气速为 6 m/s、入口颗粒浓度为 30 mg/m³ 时, 分离效率约为 60%. 另外, 从图也可看出, 随速度增加分离效率也增加.

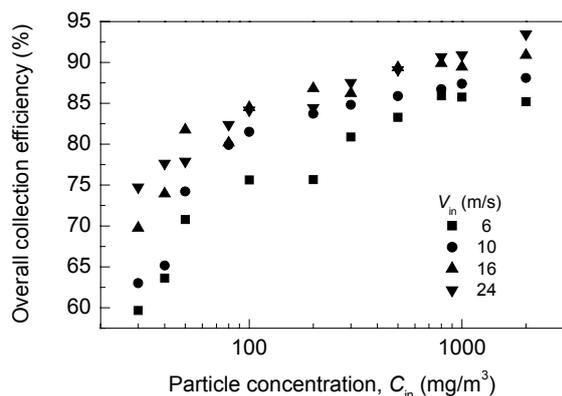


图 3 多管旋风分离器不同入口颗粒浓度的分离效率
Fig.3 Collection efficiency of multi-cyclone separator as a function of particle concentration

尽管随入口气速和入口颗粒浓度增加, 多管旋风分离器的分离效率升高, 但多管旋风分离器没有单管旋风分离器的分离效率高. 表 1 对比了相同实验条件下多管旋风分离器和单管旋风分离器的分离效率, 其中多管旋风分离器的分离效率与图 3 相同. 在相同的入口气速和入口颗粒浓度下, 多管旋风分离器的分离效率比单管低, 入口速度越大, 二者间的差值就越大, 最大达 10% 以上, 如 $V_{in}=24$ m/s, $C_{in}=50$ mg/m³ 时二者分离效率的差值就达 15%. 大多数情况下多管旋风分离器的分离效率只比单管的低百分之几, 有时差值很小, 如 16 m/s 时的分离效率. 主要原因有两个: 一是各单管旋风分离器之间存在入口气流分布不均, 二是旋风分离器底部排尘口间没有相互隔离. 当 2 个或多个旋风分离器并联且共用

一个集气室和一个灰斗时, 上述现象就会发生, 从而可能发生交叉窜气或“干扰”现象. 进入各旋风分离器的气流分布不均匀使各旋风分离器排料管内压力不同, 导致一个或多个旋风分离器“漏气”, 而其余旋风分离器则出现窜气来作为补偿, 存在窜气的旋风分离器的分离性能会受到严重影响, 从而影响了多管旋风分离器的分离效率. 随入口气速增大, 进入各单管旋风分离器的气量差别越大, 旋风分离器之间发生“漏气”和窜气现象越严重, 导致多管旋风分离器与单管旋风分离器分离效率差值越大, 对比表 1 中 2 种旋风分离器的分离效率就可发现这种现象.

表 1 单管和多管分离器的分离效率对比
Table 1 Comparison of collection efficiency between single and multi-cyclone separators (%)

| Particle conc. (mg/m ³) | $V_{in}=10$ m/s | | $V_{in}=16$ m/s | | $V_{in}=24$ m/s | |
|-------------------------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | Single | Multiple | Single | Multiple | Single | Multiple |
| 30 | - | 63.00 | - | 69.75 | - | 74.74 |
| 40 | - | 65.17 | - | 73.93 | - | 77.67 |
| 50 | 78.78 | 74.23 | 83.30 | 81.75 | 91.58 | 77.91 |
| 80 | 82.27 | 79.90 | 86.19 | 80.15 | 94.03 | 82.42 |
| 100 | 82.56 | 81.48 | 86.64 | 84.49 | 94.43 | 84.18 |
| 200 | 85.65 | 83.73 | 86.68 | 86.81 | 95.23 | 84.47 |
| 300 | 86.30 | 84.81 | 87.56 | 86.21 | 95.68 | 87.52 |
| 500 | 89.31 | 85.87 | 88.56 | 89.37 | 96.21 | 89.10 |
| 800 | 91.38 | 86.73 | 89.90 | 89.87 | 96.38 | 90.69 |
| 1000 | 92.63 | 87.37 | 90.19 | 89.43 | 96.21 | 90.90 |
| 2000 | 92.80 | 88.10 | 90.51 | 90.86 | 96.85 | 93.48 |

通过改变多管旋风分离器内部内外层单管旋风分离器位置, 即把内外层单管旋风分离器错层分布, 使外层旋风分离器入口比内层高, 以及将多管旋风分离器进入集气室的气体出口升入集气室底部以改变气体进入内外层旋风分离器的距离比, 能改善各旋风分离器的流量分布, 但不能保证每个单管旋风分离器入口流量相同.

3.2 多管旋风分离器的分级效率

图 4 给出了内部单管旋风分离器入口气速为 16 m/s

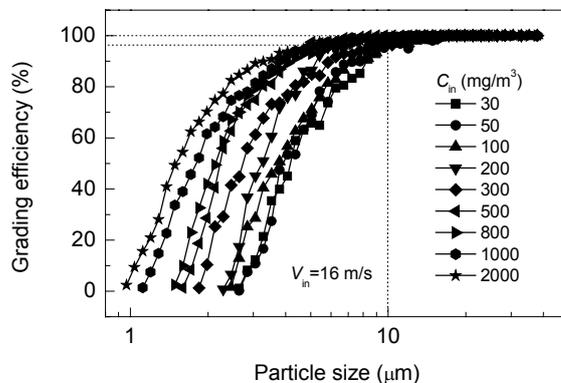


图 4 不同入口颗粒浓度时多管旋风分离器的分级效率
Fig.4 Grading efficiency of multi-cyclone separator as a function of particle concentration

时不同入口颗粒浓度下多管旋风分离器分级效率的变化规律. 与单管旋风分离器的变化规律^[8]相似, 入口浓度越高, 多管旋风分离器的分级效率越高. 从图也可看出, 当入口颗粒浓度大于 100 mg/m^3 时, 多管旋风分离器能除尽 $10 \mu\text{m}$ 以上的颗粒, 但入口颗粒浓度小于 100 mg/m^3 时, 只能除尽 $15 \mu\text{m}$ 以上的颗粒.

图5给出了入口浓度为 100 mg/m^3 时不同入口速度下分级效率的变化规律, 入口速度越大分级效率越高. 从图可以看出, 多管旋风分离器在入口风速为 6 和 10 m/s 时, 只能除尽 $15 \mu\text{m}$ 以上的颗粒.

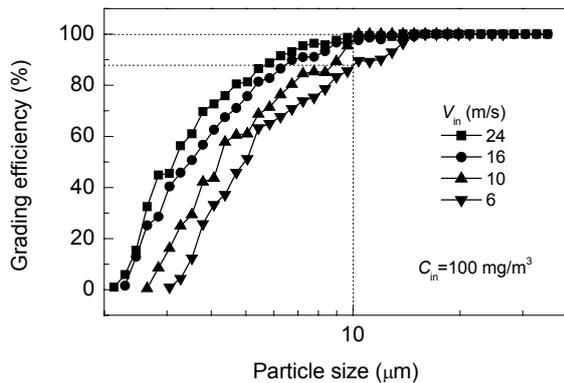


图5 不同入口风速时多管旋风分离器的分级效率
Fig.5 Grading efficiency of multi-cyclone separator as a function of inlet velocity

图6给出了入口速度为 16 m/s 时单管旋风分离器的分级效率曲线, 从图可看出, 图2(b)所示的单管旋风分离器能除尽 $7 \mu\text{m}$ 以上的颗粒. 与单管旋风分离器相比, 多管旋风分离器的分离效率和分级效率都有所降低, 这主要是由于影响多管旋风分离器分离效率和分级效率的因素很多, 如入口风速、旋风分离器的结构和入口颗粒浓度等, 其中旋风分离器的结构是一个很重要的因素.

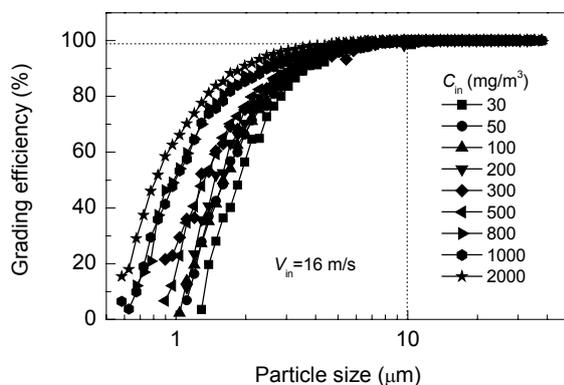


图6 单管旋风分离器的分级效率
Fig.6 Grading efficiency of single cyclone separator as a function of particle concentration

3.3 多管旋风分离器的压降

多管旋风分离器的压降组成比单管旋风分离器复杂得多, 主要包括以下部分: 多管旋风分离器进口到进气管出口处之间的弯管压力损失、进入进气室的膨胀损失、进气室内气体与多管分离器进气室内壁和单管旋风分离器外壁的摩擦损失、各单管旋风分离器的入口损失、气体进入单管旋风分离器后的压力损失、气体进入灰斗空间的压力损失、单管旋风分离器进入集气室的膨胀损失及集气室出口损失等. 尽管影响多管旋风分离器压降的因素较多, 但主要还是由内部的单管旋风分离器引起的, 如图7所示, 在相同的入口风速下, 单管旋风分离器压降约占多管旋风分离器压降的 $80\% \sim 90\%$. 从文献[12-16]的研究结果可知, 常压下单管旋风分离器压降 Δp_s 可表示为

$$\Delta p_s = (\rho/2) \xi_s V_{in}^2 \quad (1)$$

式中, ρ 和 ξ_s 分别为常压气体密度和单管旋风分离器的阻力系数.

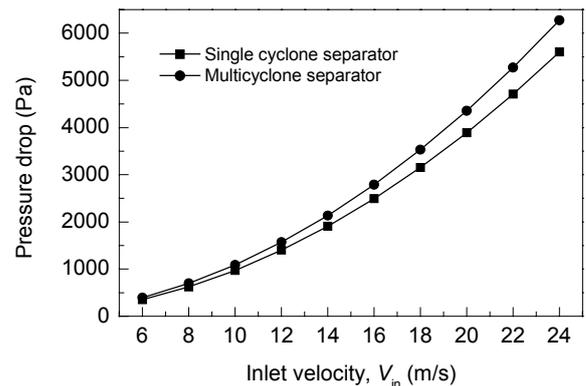


图7 单管与多管旋风分离器压降对比
Fig.7 Comparison of pressure drops between single and multi-cyclone separators

从图7可看出, 多管旋风分离器 and 单管旋风分离器压降具有相似规律, 都与入口风速的平方成正比. 因此, 多管旋风分离器的压降 Δp_m 也可表示为

$$\Delta p_m = (\rho/2) \xi_m V_{in}^2 \quad (2)$$

式中, ξ_m 为多管旋风分离器的阻力系数.

根据常压下单管和单管旋风分离器的压降关系, 二者之间的阻力系数有以下近似关系:

$$\xi_s = (0.8 \sim 0.9) \xi_m \quad (3)$$

由于高压下多管旋风分离器的结构没有改变, 所以多管旋风分离器的阻力系数不会改变. 因此高压下多管旋风分离器的压降 Δp_{m-h} 可以表示为

$$\Delta p_{m-h} = (\rho_h/2) \xi_m V_{in}^2 \quad (4)$$

式中, ρ_h 为高压下的气体密度。

根据多管和单管旋风分离器的压降关系, 高压下多管旋风分离器的压降可以表示成

$$\Delta p_{m-h} = \rho_h \Delta p_s / [(0.8 \sim 0.9) \rho] \quad (5)$$

4 结 论

为系统评价天然气净化用多管旋风分离器的分离性能, 在线测量了入口气速 6~24 m/s、入口颗粒浓度 30~2000 mg/m³ 范围内多管旋风分离器的分离效率和分级效率, 由研究结果得到以下结论:

(1) 当入口颗粒浓度在 30~2000 mg/m³ 间变化时, 多管旋风分离器的分离效率为 60%~94%。

(2) 在相同的入口条件下, 多管旋风分离器的分离效率比单管旋风分离器低 2%~15%, 这是由多管旋风分离器的结构引起的, 进气室不能把流量均匀分布到每个单管旋风分离器中, 使每个单管旋风分离器的分离性能不同, 从而影响了多管旋风分离器的分离效率。

(3) 在入口颗粒浓度低于 100 mg/m³ 时, 多管旋风分离器只能除净 15 μ m 以上的颗粒, 而单管旋风分离器能除净 10 μ m 以上的颗粒。

(4) 多管旋风分离器的压降主要由内部单管旋风分离器引起, 后者引起的压降约占前者的 80%~90%, 如果已知高压时气体的密度, 就可利用常压下单管旋风分离器的压降值估算出高压下多管旋风分离器的压降。

参考文献:

[1] Stern A C, Caplan K J, Bush P D. Cyclone Dust Collectors [M]. New York: American Petroleum Institute, 1955. 67.

- [2] Patterson P A, Munz R J. Cyclone Efficiencies at Very High Temperatures [J]. Can. J. Chem. Eng., 1989, 67(2): 321-328.
- [3] 罗晓兰, 陈建义, 金有海. 固相浓度对旋风分离器性能影响的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 1992, 13(3): 282-285.
- [4] Hoffmann A C, Arends H, Sie H. An Experimental Investigation Elucidating the Nature of the Effect of Solids Loading on Cyclone Performance [J]. Filtr. Sep., 1991, 28(3): 188-193.
- [5] Hoffmann A C, Van Santen A, Allen W K, et al. Effects of Geometry and Solids Loading on the Performance of Gas Cyclones [J]. Powder Technol., 1992, 70(1): 83-91.
- [6] Mothes H, Löffler F. Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators [J]. Int. Chem. Eng., 1988, 28(1): 51-55.
- [7] Yuu S, Jotaki T, Tomita Y, et al. The Reduction of Pressure Drop due to Dust Loading in a Conventional Cyclone [J]. Chem. Eng. Sci., 1978, 33(1): 1573-1580.
- [8] 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 Technol., 2009, 191(3): 254-259.
- [9] Koffman J L. The Cleaning of Engineering of Engine Air [J]. Gas Oil Power, 1953, 14(1): 89-94.
- [10] Broodryk N J, Shingles T. Aspects of Cyclone Operation in Industrial Chemical Reactors: Fluidization VIII Conference [M]. New York: Engineering Foundation, 1995. 1083.
- [11] 王江云, 毛羽, 王娟. 卧式三旋内多管串流返混的数值模拟 [J]. 炼油技术与工程, 2008, 38(8): 38-42.
- [12] Shepherd C B, Lapple C E. Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors [J]. Ind. Eng. Chem., 1939, 31(8): 972-984.
- [13] Alexander R M. Fundamentals of Cyclone Design and Operation [J]. Proceeding of the Australian Institute of Mining Metals, 1949, 16(152/153): 203-228.
- [14] Casal J, Benet J M M. A Better Way to Calculate Cyclone Pressure Drop [J]. Chem. Eng., 1983, 90(2): 99-115.
- [15] Shi L, Bayless D J, Kremer G, et al. CFD Simulation of the Influence of Temperature and Pressure on the Flow Pattern in Cyclones [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2006, 45(22): 7667-7672.
- [16] Chen J, Shi M. A Universal Model to Calculate Cyclone Pressure Drop [J]. Powder Technol., 2007, 171(3): 184-191.

Separation Performance of Multi-cyclone Separator for Purification of Natural Gas

WU Xiao-lin¹, XIONG Zhi-yi², JI Zhong-li²

(1. Faculty of Chemical Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to evaluate the separation performance of multi-cyclone separator for purification of natural gas, the overall collection and grading efficiencies of a multi-cyclone separator with inlet velocities of 6~24 m/s and particle concentrations of 30~2000 mg/m³ were investigated under atmospheric pressure and room temperature. The particle concentration and particle size distributions of inlet and outlet of the cyclone separator were measured by aerosol spectrometer based on measured particle number. The experimental results showed that the overall collection efficiency and grade efficiency increased with increasing of particle concentrations and inlet velocities. The overall collection efficiency of multi-cyclone separator was 2%~15% less than that of single cyclone separator at the same operation condition. Most of the particles with the diameters bigger than 15 μ m could be removed by multi-cyclone separator while single cyclone separator could remove clearly the particles bigger than 10 μ m. The pressure drop of the single cyclone separators in a multi-cyclone occupied 80%~90% of the overall pressure drop of multi-cyclone separator.

Key words: multi-cyclone separator; collection efficiency; grading efficiency; pressure drop; natural gas; particles