

文章编号:1673-5005(2007)06-0087-05

天然气用纤维过滤器非稳态性能实验研究

迟化昌¹, 姬忠礼¹, 韦荣方²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249; 2. 中石油管道天然气压缩技术公司, 山东 德州 253020)

摘要:针对天然气工业特点,设计了一套滤芯性能在线检测装置,采用光学粒子计数器 OPC 对过滤器上、下游粉尘的浓度和粒径分布进行适时测量。使用多分散性粉尘,在实验室内测试了天然气用纤维过滤器的非稳态性能,以及各种操作参数对其性能的影响规律。实验结果表明,纤维过滤器的过滤效率和阻力均随粉尘负荷的增加而增加,根据其变化趋势可分为深层过滤和滤饼过滤两个阶段。过滤速度过高容易导致大粒子穿透,从而使效率下降,纤维过滤器的表观过滤速度应低于 0.06 m/s;相对湿度和滤材厚度的增加有利于增大过滤效率,但也会导致阻力的迅速增加。

关键词:纤维过滤器; 天然气; 过滤效率; 压降; 光学粒子计数器

中图分类号:TQ 028.26

文献标识码:A

Experimental study of dynamic filtration performance of natural gas fibrous filter

CHI Hua-chang¹, JI Zhong-li¹, WEI Rong-fang²

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. China Petroleum Pipeline Natural Gas Compress Technology Limited Corporation, Dezhou 253020, Shandong Province, China)

Abstract: An on-line natural gas filter element testing unit was built up, and an optical particle counter was used to simultaneously measure the upstream and downstream aerosol of the filter. The dynamic performance during fibrous filter clogging and the effect of various parameters on filtration performance were investigated using polydisperse ashes. The results show that the filtration efficiency increases with dust loading, which can be described in two stages, depth filtration and cake filtration, just being like pressure drop. The leakage of big particles should be responsible for the poor efficiency at high filtration velocity and the optimal face velocity ought to be smaller than 0.06 m/s. Filtration efficiency can be improved by selecting thick filter media and increasing relative humidity, but the resistance will also increase.

Key words: fibrous filter; natural gas; filtration efficiency; pressure drop; optical particle counter

天然气工业中通常采用高效纤维过滤器除去气体中的固体杂质,从而保证下游的阀门、精密仪表和大型压缩机等管路部件的稳定运行^[1]。国内外学者对纤维过滤器的性能进行了广泛的研究,但这些研究主要集中在稳态方面,受测量手段的影响,对粉尘不断堵塞下的非稳态性能研究很少^[2-5],而且研究多针对单分散粒子,与实际相差很大^[6]。随着光学粒径测量技术的发展,滤材非稳态性能的在线测定成为可能^[7-8],当前国际上滤材检验中也通常采用光

学粒子计数器 OPC 的在线测量方法,如欧洲标准 EN779^[9]和美国标准 ASHRAE52.2^[10]。国内对于过滤器精度的测定通常仍采用冒泡实验或采样分析法^[11-12],针对天然气过滤器的性能尚没有一套完整、可靠的计算方法和评价标准。因此,笔者使用高精度的 OPC 测量纤维过滤器效率随多分散粉尘负荷的变化情况,分析各参数对过滤性能的影响规律,从而为天然气过滤器检验标准的制定进行有益的探索。

收稿日期:2007-03-09

基金项目:中石油中青年创新基金项目(03E7013)

作者简介:迟化昌(1980-),男(汉族),辽宁建平人,博士研究生,从事多相流分离技术研究。

1 实验装置

实验中采用的装置如图1所示。过滤管路采用负压吸气操作,在气体入口处安装滤布除去空气中的杂质,常温常压的干净气体进入管路后通过加料器自动、定量加入粉尘,均匀的气溶胶进入高效纤维过滤器后,粉尘被捕集,气体流量通过下游的调节阀控制。另外铺设了压缩气体管路为加料器、稀释器以及过滤器反吹净化提供高压气体。

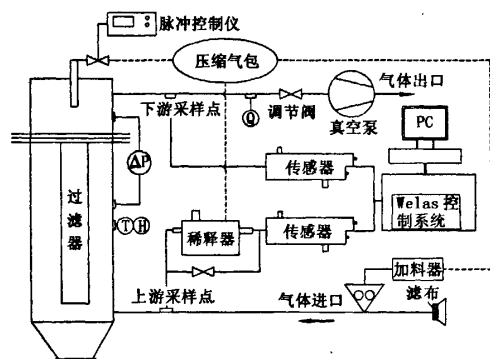


图1 实验装置

该装置采用旋转刷式加料器(PALAS® BEG-1000型)加尘,其原理是利用旋转刷将传送带上粉尘扬起,通过压缩空气将粉尘从喷嘴喷出,形成均匀的气溶胶,通过调节携带粉尘皮带的带速控制加料量(10~6 000 g/h)。气溶胶粒径分布使用OPC(PALAS® Welas® 2000系列)测量,采用两个光学传感器分别对过滤器上、下游进行等动采样,采样动力由Welas®控制器提供,采样流量为5 L/min。OPC的测量原理是当额定流量的气溶胶通过测量管时,一束白光或激光经透镜形成一个光学限定的微小测量空间,对其间气溶胶进行照射,此时粒子会产生光散射,在与光源呈90°角处收集散射光的信号,然后将散射光的强度和脉冲数还原成粒子的等效球形直径和数量,从而测量气溶胶的粒径分布和浓度。Welas® OPC采用白光作为光源,有60个测量通道,精度较高,拥有两个测量区间0.3~17 μm和0.6~40 μm,可方便切换,最大测量浓度为10⁵ P/cm³,能够满足天然气过滤器的测量要求。对于过滤器上游采样,当粒子浓度较高时,采出气先进入稀释器(PALAS® VKL-10型)中稀释,稀释因子为10。装置中还安装有压差、温度、相对湿度和流量传感器,可以对过滤器的阻力和工作条件进行适时检测。

实验中采用的滤芯是天然气用管状玻璃纤维滤

芯,过滤介质为常温常压空气,实验粉尘为超细滑石粉,它的折射率是1.59,与OPC要求相同,其粒径分布如图2所示。

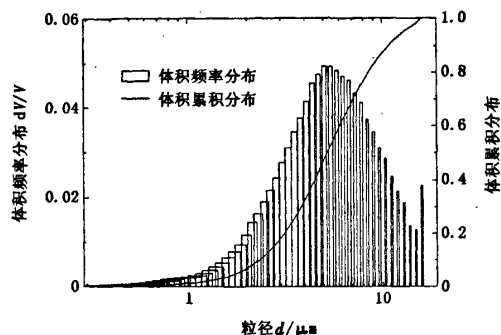


图2 超细滑石粉粒径体积分布

2 实验结果及其分析

2.1 天然气过滤器性能分析与评价

天然气滤芯性能的表征通常采用过滤效率、过滤精度和压降等,然而在实际使用中,前两种参数有很大的局限性。过滤效率能够反应过滤器对粉尘总的捕集能力,然而过滤器入口粉尘的浓度对它的影响很大,显然入口粉尘浓度越高,效率越高。对于过滤器精度的表述方法有很多种,如绝对精度、相对精度和名义精度等,然而这些值相差很大,也缺少相应的标准来统一,因此很多厂家都标称产品的精度很高,造成用户选用时有很大的盲目性。另外,过滤器的精度受很多条件的制约,如过滤速度、气体湿度等,实际操作中误差很大,也不能反应产品的实际性能。本文中根据天然气过滤器的使用特点,对过滤器出口粉尘质量浓度 C_d 、筛上累积百分数 F 和压降 Δp 随粉尘负荷的变化情况进行了分析(图3~5)。使用天然气现场用纤维滤芯,厚度 h 为16 mm、长度 L 为1 m,滤速 U 为0.02 m/s,入口粉尘浓度 C_0 为2 g/m³,空气相对湿度 H 为45%。

由图3可见,过滤器的效率随着粉尘质量负荷的变化而变化,这里质量负荷 m 指的是滤芯单位表面积捕集的粉尘量。根据质量浓度的变化趋势可将过滤过程分为两个阶段:一个是滤饼逐渐形成的深层过滤阶段,此时主要依靠滤材本身捕集粉尘,随着捕集的粉尘量增加,出口质量浓度迅速下降,根据Thomas^[4]和Song^[5]的研究,在此阶段不断沉积的粒子在滤材内部形成树枝结晶状结构,这相当于增加了滤材的填充率,使得捕集效率提高;另一个是滤饼过滤阶段,此阶段主要依靠前一阶段形成的滤饼捕

集粉尘。由于滤芯表面形成的粉尘层孔隙率较小,充当了新滤材的作用,因此过滤器的效率提高,并且由于孔隙率随粉尘负荷的变化较小,此阶段的效率变化不大,出口质量浓度逐渐稳定。在两个阶段之间还有一个连续的过渡阶段,可称作过滤器的非稳态过滤阶段。

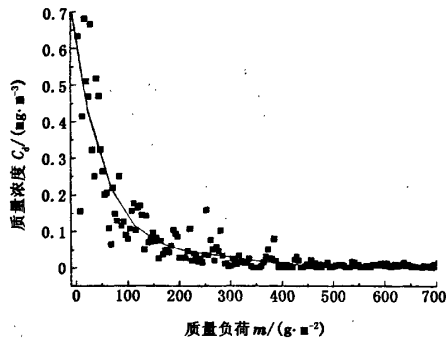


图 3 过滤器出口粉尘质量浓度随粉尘负荷的变化

天然气管道输送中,过滤器通常作为压缩机的上一级,因此它的性能直接影响到压缩机的正常工作。实践中发现对压缩机危害最大的是大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子,其中 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子主要是在叶片上沉积,而 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上的粒子对叶片的冲蚀较严重。根据图 3 中过滤器出口粉尘质量浓度的变化情况,比较了质量浓度 C_d 分别为 $0.47, 0.13$ 和 0.01 mg/m^3 时的粉尘粒径分布情况(图 4,这里采用筛上累积百分数 F 表征粒径的分布,筛上累积百分数指的是粉尘中大于某粒径的粒子所占的质量百分比)。从图 4 中可以看到,在过滤初期过滤器下游存在一部分

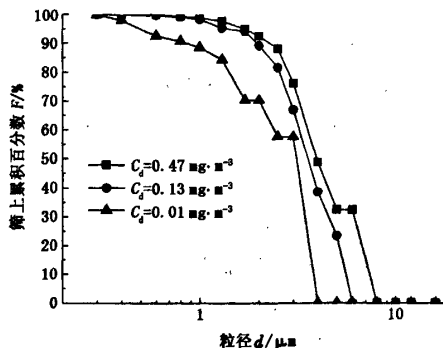


图 4 过滤器出口粉尘筛上累积百分数随粒径的变化

大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子,随着滤饼的逐渐形成,过滤器对大粒子的捕集效率提高,在滤饼过滤阶段能够基本除净 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上粒子。因此,天然气现场应特别注意在管道投产或更换新滤芯时对压缩机等管路部件的磨损,而采用筛上累积百分数能够反应不同过滤

阶段时过滤器出口粉尘中大粒子的分布情况,从而明确过滤后气体对管路部件的危害程度。

过滤器的阻力性能直接影响到天然气处理的经济效益和管路的稳定操作,这里采用滤饼压降 Δp (指的是由于粉尘的沉积引起的阻力增加)来表征。从图 5 中可以看到,压降的变化趋势同效率一样可以分为两个阶段,在深层过滤阶段压降增加缓慢,在滤饼过滤阶段,随着粉尘质量负荷的增加,压降基本呈线性增加,这也说明在文中实验条件下,该阶段滤饼的孔隙率随粉尘负荷变化不大。

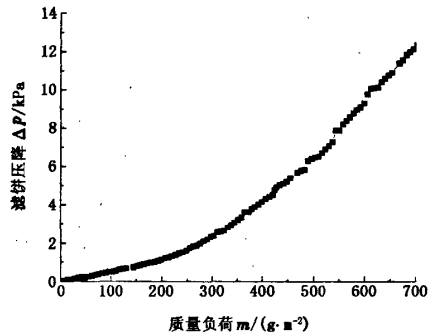


图 5 滤饼压降随粉尘负荷的变化

2.2 各种参数对纤维过滤器性能的影响

2.2.1 过滤速度

选用相同的管状玻璃纤维滤芯,厚度 h 为 10 mm ,长度 L 为 464 mm , Δp 达到 20 kPa 时终止,气体相对湿度 H 为 45% 。不同滤速时过滤器上、下游粉尘的平均质量浓度(OPC 实测)及过滤效率如表 1 所示。从表 1 中可以看出,随着过滤速度的提高,过滤效率降低。为了判断高滤速下效率下降是由于穿过粒子数增多还是大粒子比例增加引起的,比较了过滤器压降达到 3 kPa 时,不同滤速下过滤器出口粉尘的粒径分布情况,结果见图 6。从图中可以看出,随着过滤速度的提高,出口粉尘中大粒子所占比例明显增加,这与实验中观察到的高滤速下滤饼中有微孔出现非常吻合。因此,考虑到对于数量浓度较低的气溶胶,大粒子对质量浓度的影响较大,认为高滤速时效率下降主要是由于大粒子的穿透引起的。

表 1 不同滤速下过滤器性能对比

过滤速度 $U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	上游粉尘浓度 $C_u/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	下游粉尘浓度 $C_d/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	过滤效率 $E/\%$
0.02	2527.9	0.422	99.983
0.04	4921.8	1.060	99.978
0.06	1033.7	0.364	99.965
0.08	1297.0	1.630	99.874
0.12	1117.8	6.000	99.463

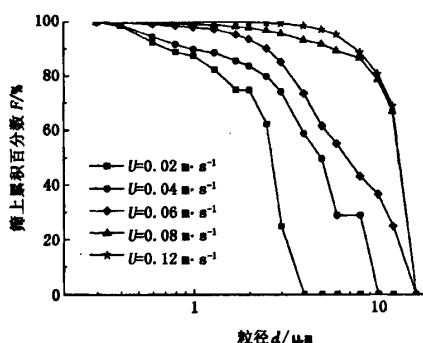


图6 不同滤速下筛上累积百分数随粒径的变化

由以上分析可知,大粒子的捕集效率对过滤性能的影响很大,为了定量地考察滤速对大粒子捕集效率的影响规律,比较了不同粒径时过滤效率随过滤速度的变化(图7)。这里的过滤效率指的是过滤器对粉尘中大于一定粒径 d 的粒子的计重过滤效率。从图7中可以看出,随着过滤速度的增加,过滤效率在低滤速时相差不大,而高滤速时则迅速下降。这主要是因为大粒子在高速下具有较高的动能,容易从滤材上脱落,不易捕集。同时从图6中可以看到,在高滤速时大粒子在出口粉尘中占有较高的比例,因此考虑到大粒子对压缩机等管路部件的危害,应使过滤器的工作滤速低于 0.06 m/s 。

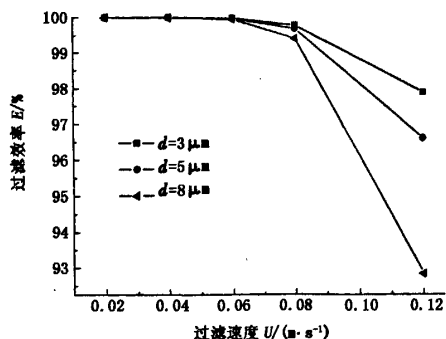
图7 大粒子过滤效率随过滤速度的变化($\Delta p = 3 \text{ kPa}$)

图8为不同滤速下滤饼压降随粉尘负荷的变化曲线。从图8中可以看出,随着过滤速度的增加,过滤器阻力随粉尘负荷的增加变大。根据Choi^[13]的研究,滤饼的孔隙率是过滤速度和粉尘负荷的函数,高滤速下滤饼容易在气流电力的作用下压缩成孔隙率更小的结构,因此确定合理的滤速是保证过滤器经济、可靠运行的重要保障。

2.2.2 相对湿度

天然气在输送过程中通常含有一定的水分,因此探究相对湿度对过滤性能的影响规律,对于全面

了解过滤器的性能十分必要。在滤速 U 为 0.08 m/s 、 $\Delta p = 3 \text{ kPa}$ 时,不同相对湿度下的分级效率如图9所示。从图中可以看到,过滤器对相对湿度较大的气溶胶的过滤效率较高,这主要是因为当相对湿度较大时,粒子容易出现团聚现象,形成较大粒子,同时,在水的作用下,小粒子也容易粘结在滤芯壁面上。

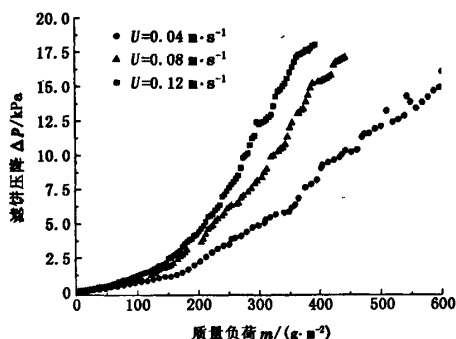


图8 不同滤速下滤饼压降随粉尘负荷的变化

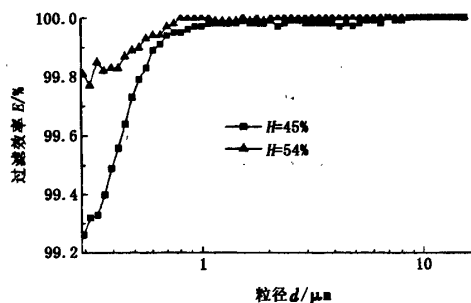


图9 相对湿度对过滤效率的影响

2.2.3 粉尘粒径

过滤器对不同粒径粒子的捕集能力可以通过分级效率来表征。清洁滤芯在不同过滤速度时的分级效率情况如图10所示(相对湿度 H 为45%)。从图中可以看到,过滤效率随着粒径的增加而增加。根据岑可法等人^[14]的研究,纤维过滤器对小于 $1 \mu\text{m}$ 粒子的捕集以扩散机理为主,随着过滤速度的提高,扩散机理的捕集效率下降,因此不同滤速下效率相差很大;而对大于 $1 \mu\text{m}$ 粒子的捕集则以惯性碰撞和直接拦截为主,在本研究条件下速度对效率影响不大。

2.2.4 滤材厚度

纤维过滤器属于深层滤材,滤材的厚度对过滤性能影响很大。采用相同内径、不同外径的管状滤芯,长度 L 为 1 m ,玻璃纤维毡物性相同,厚度 h 分别为 $7.5, 12.5 \text{ mm}$,滤速 U 为 0.02 m/s ,相对湿度 H

为45%,入口粉尘浓度 C_0 为 2 g/m^3 。该条件下滤材厚度对过滤性能的影响见图11。由图11可以看到,在深层过滤阶段,在相同质量负荷下,随着滤材厚度的增加,过滤器的捕集效率增加。这主要是因为随着厚度的增加,由相同孔隙的滤材制成的纤维过滤器捕集面积增大,因此对大粒子的捕集几率增加;而在滤饼过滤阶段,由于此时主要是依靠滤饼来捕集粉尘,在相同的滤速下形成的滤饼孔隙率相差不多,因此出口粉尘质量浓度相差不多。另外,从图中可以看到,随着滤材厚度的变薄,达到过渡阶段所需的粉尘负荷增加,这将严重影响到过滤器运行初期的性能。

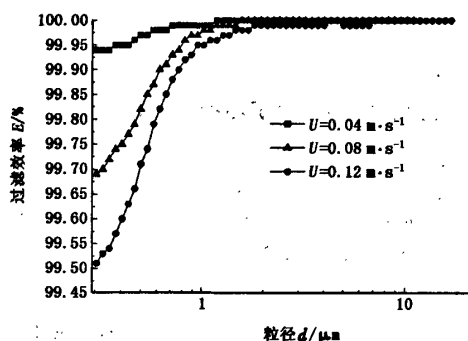


图10 过滤效率随粒径的变化(初始状态下)

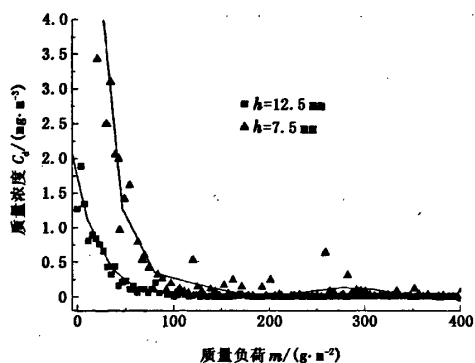


图11 滤材厚度对过滤性能的影响

3 结论

(1)该套实验装置能够满足天然气过滤器的性能检测要求,根据出口粉尘质量浓度、筛上累积百分数以及压降随粉尘负荷的变化规律能够对天然气过滤器的性能进行客观的评价。

(2)纤维过滤器效率和阻力均随粉尘负荷的增加而增加,根据其变化趋势可分为深层过滤和滤饼过滤两个阶段,在滤饼过滤阶段性能趋于稳定。

(3)过滤速度是影响过滤性能的重要参数,高

滤速时纤维过滤器效率较低,且存在大粒子的穿透现象,另外相对湿度、粒径和滤材厚度也对过滤器效率影响很大。

参考文献:

- [1] 李熹,郭益,米力田. 新型过滤器结构分析及改进[J]. 天然气与石油, 2005,23(1):7-10.
LI Xi, GUO Yi, MI Li-tian. Analysis and improvement of new style filter structure [J]. Natural Gas and Oil, 2005,23(1):7-10.
- [2] 刘君侠,彭伟功,向晓东. 纤维面层表面非稳态过滤效率的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2002(3):16-19.
LIU Jun-xia, PENG Wei-gong, XIANG Xiao-dong. New approach for dynamic filtration efficiency of fiber filter [J]. Building Energy and Environment, 2002(3):16-19.
- [3] 付海明,沈恒根. 气溶胶过滤捕集效率的理论研究[J]. 安全与环境学报, 2003,3(5):54-58.
FU Hai-ming, SHEN Heng-gen. Research on aerosol filtration collection efficiency [J]. Journal of Safety and Environment, 2003,3(5):54-58.
- [4] THOMAS D, PENICOT P, CONTAL P, et al. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study [J]. Chemical Engineering Science, 2001,56:3549-3561.
- [5] SONG C B, PARK H S, LEE K W. Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles [J]. Powder Technology, 2006,163:152-159.
- [6] 付海明,沈恒根. 纤维过滤器过滤理论的研究进展[J]. 中国粉体技术, 2003,9(1):41-46.
FU Hai-ming, SHEN Heng-gen. Development of theory about filtration of fibrous filters [J]. China Powder Science and Technology, 2003,9(1):41-46.
- [7] UMHAUER H, BERBNER S, HEMMER G. Optical in situ size and concentration measurement of particles dispersed in gases at temperatures up to 1000 °C [J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2000,17(1):3-15.
- [8] DITTLER A, UMHAUER H F. The influence of conditioning and regeneration on the separation behaviour of rigid surface filters for the separation of particles from gases [J]. Powder Technology, 2001,120:223-231.
- [9] British Standards Institution. EN779. Particulate air filters for general ventilation determination of the filtration performance [S]. London: The Standards Policy and Strategy Committee, 2002.

(下转第97页)

- [2] 陈文静,苏显渝,曹益平,等. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. 中国激光,2004,31(6):740-744.
CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, et al. New method to eliminate extension of zero component in FTP[J]. Chinese Journal of Lasers,2004,31(6):740-744.
- [3] SU Xian-yu, CHEN Wen-jing. Fourier transform profilometry:a review [J]. Optics & Lasers Engineering, 2001,35(5):263-284.
- [4] LI Jian, SU Xian-yu, GUO Lu-rong. Improved Fourier transform profilometry of the automatic measurement of three-dimensional object shapes[J]. Opt Eng,1990,29(12):1439-1444.
- [5] 陈文静,苏显渝,谭松新. Fourier变换轮廓术中对测量系统的基本要求[J]. 光电子·激光,1999,10(6):535-539.
CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, TAN Song-xin. Basic requirement for measurement system in FTP[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,1999,10(6):535-539.
- [6] 陈文静,苏显渝,苏礼坤,等. 利用灰度图提高 Fourier变换轮廓术的测量精度[J]. 光电工程,2000,27(3):55-59.
CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, SU Li-kun, et al. Improvement for measuring accuracy of Fourier transform profilometry with gray image[J]. Opto-electronic Engineering,2000,27(3):55-59.
- [7] 黄尚廉,江毅. 提高傅里叶变换轮廓法测量三维物体轮廓陡峭度的方法[J]. 仪器仪表学报,1995,16(2):113-118.
HUANG Shang-lian, JIANG Yi. The method to improve the measurable steepness of Fourier transform profilometry for the 3D measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,1995,16(2):113-118.
- [8] 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社,1999:321-335.
- [9] 苏显渝,谭松新,向利群,等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. 光学学报,1998,18(9):1228-1233.
SU Xian-yu, TAN Song-xin, XIANG Li-qun, et al. Complex object shape measurement using FTP method [J]. Acta Optica Sinica,1998,18(9):1228-1233.
- [10] 步鹏,陈文静,苏显渝. 滤波窗的选择对傅里叶变换轮廓术测量精度的影响[J]. 激光杂志,2003,24(4):43-45.
BU Peng, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Analysis on measuring accuracy of Fourier transform profilometry due to different filtering window[J]. Laser Journal,2003,24(4):43-45.
- [11] 潘泉,张磊,孟晋丽,等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005:2-16.
(编辑 沈玉英)

(上接第91页)

- [10] American National Standards Institute. ASHRAE 52.2. Method of testing general ventilation air cleaning devices for removal efficiency by particle size [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc, 1996.
- [11] 戴天翼. 我国过滤材料的标准亟待起草与颁发[J]. 产业用纺织品,2003,21(9):25-26.
DAI Tian-yi. Domestic standard of filter media awaiting drafting and issue [J]. Technical Textiles, 21(9):25-26.
- [12] 梁政,杨志,邓雄,等. 在役天然气分离除尘设备性能评价[J]. 天然气工业,2006,26(11):144-147.
LIANG Zheng, YANG Zhi, DENG Xiong, et al. Performance evaluation of natural gas separation and dedusting facility in service [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(11):144-147.
- [13] CHOI J H, HA S J, JANG H J. Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter [J]. Powder Technology, 2004,140:106-115.
- [14] 岑可法,倪明江,严建华,等. 气固分离理论及技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,1999.
(编辑 沈玉英)