

生物质固定燃烧源烟气稀释采样装置设计与试验

姚宗路¹ 吴同杰^{1,2} 赵立欣¹ 丛宏斌¹ 戴辰¹ 郭占斌²

(1. 农业部规划设计研究院农业部农业废弃物能源化利用重点实验室, 北京 100125;
2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 针对现有的稀释通道多级采样装置存在稀释比小、停留时间短和便携性能差等问题,根据生物质成型燃料燃烧排放高温烟气中的大气颗粒物数量和质量分布特点,采用二级稀释、反馈调节和射流的原理,设计了生物质固定燃烧源烟气稀释采样装置。该装置由采样枪、一级稀释系统、二级稀释系统、洁净空气发生系统、撞击采样装置等部分组成。装置加工完成后,采用木质成型燃料开展颗粒物采样试验,试验结果表明,该装置能够模拟固定燃烧源排放烟气进入大气环境中的稀释冷凝过程,稀释比达 30,停留时间 90 s,试验采集得到 8 种不同粒径级别的大气颗粒物,其中粒径在 0.4 ~ 1.1 μm 之间颗粒物占总采集颗粒物的 55.5% ~ 68.1%。研究发现采样装置对空气动力学直径在 1.1 μm 以下的大气颗粒物有较好的采样效果。

关键词: 生物质; 固定燃烧源; 稀释采样装置; 大气颗粒物

中图分类号: X851 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0174-05

Design and Experiment of Flue Gas Dilution Sampler for Biomass
Fixed Combustion Source

Yao Zonglu¹ Wu Tongjie^{1,2} Zhao Lixin¹ Cong Hongbin¹ Dai Chen¹ Guo Zhanbin²

(1. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues,
Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China
2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Aiming at solving the shortcomings of low dilution ratio, short residence time and bad portability of the existing dilution channel sampler, the flue gas dilution sampler for biomass fixed combustion source was developed by using the principle of multistage dilution and jet, according to numbers of atmospheric particulates and characteristics of mass distribution in high temperature flue gas. The sampler consists of five parts: sampling gun, first level dilution system, second level dilution system, clean air making system, impact sampling device and display control system. The proposed sampler has good air-tightness, high dilution ratio, stable heat preservation performance and good control precision. The biomass fixed combustion source of flue gas dilution sampler was applied on the wood molding testing. Test results show that the proposed device could simulate the dilution and condensation process of combustion source flue gas which emissions into the atmosphere environment with dilution ratio of 30 and residence time of 90 s. The atmospheric particulates in eight different particle sizes were obtained, in which the mass of particle size of 0.4 ~ 1.1 μm took 55.5% ~ 68.1% of the total mass of atmospheric particulates. The study found that the proposed sampler has a good effect on the atmospheric particulates with diameter less than 1.1 μm.

Key words: biomass; fixed combustion source; dilute sampler; atmospheric particulate matter

收稿日期: 2015-12-25 修回日期: 2016-01-15
基金项目: 北京市科技新星项目(2131105000413036)
作者简介: 姚宗路(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事生物质能技术与设备开发与利用研究,E-mail: yaozonglu@163.com
通信作者: 郭占斌(1966—),男,教授,博士,主要从事生物质成型设备研究,E-mail: zksxlzal@163.com

引言

生物质能是一种可再生能源,具有可再生性和环境友好性的双重属性,近年来越来越受到人们重视,其消耗量已跃居世界能源消耗总量的第 4 位,仅次于石油、煤炭和天然气^[1-4]。我国 2013 农作物秸秆资源量达到 8.19 亿 t^[5-6],综合利用率为 76%,其他 24% 大部分被焚烧、废弃,其焚烧所释放的颗粒物造成严重空气污染^[7-8]。空气中的颗粒物微粒主要以核模态、积聚模态和粗粒子模态 3 种模态存在,其空气动力学直径在 0.01 ~ 10 μm 之间^[9-11]。目前研究表明不同粒径级别颗粒物对人体和生态环境危害不同,并可能对气候造成不可预知的影响^[12-15]。为了更加清洁高效地利用生物质能源,国内外相关研究机构都将控制生物质燃烧过程中颗粒物的排放列为优先主题^[16],尤其是对不同粒径级别颗粒物危害特性的研究越来越受到关注。由于颗粒物来源自身的差异,尤其是颗粒物的许多组成成分往往存在气相和固相之间的相互转换,不同的固定源采样方法获得的结果常常不具有可比性。当今,国际上对于固定燃烧源所产生的颗粒物多采用稀释通道进行采样^[17-18]。

目前国内外固定燃烧源排放烟气中颗粒物采样方法主要有直接采样法和稀释采样法两种,直接采样法 20 世纪 70 年代开始在我国应用,主要应用于对煤燃烧器排放颗粒物的研究中。但因其不能采集烟气中的可凝结颗粒物导致采集数据与实际排放数据不符,无法深入研究固定燃烧源排放特性,在此基础上研究人员利用稀释采样原则开发了稀释采样设备。南开大学采用烟气平衡原理,开发了一款稀释通道多级采样装置,并将其应用于原煤与锅炉型煤燃烧排放颗粒物特性对比试验中^[19-21],但此设备停留时间短、体积大、便携性能差,且智能化水平低;北京大学设计了一款等速追踪固定燃烧源稀释采样系统^[22-23],设备运行过程中气压波动大影响了采样性能,且因其为单通道设计,故采样效率低。目前研发的固定燃烧源采样设备停留时间短、稀释比小、便携性能差且均为对单一粒径范围内的颗粒物进行采样,而对大气悬浮颗粒物 (Atmospheric suspended particulates, TSP) 分级采样方法研究较少,因此目前不能对 TSP 不同粒径级别颗粒物的元素组成和化合物组成及其危害特性开展深入研究。为探明生物质固定燃烧源燃烧排放颗粒物不同粒径级别化合物组成和元素组成,本文研究设计一款稀释比大、停留时间长、自动化水平高、便携性能好的生物质固定燃烧源稀释通道多级采样装置。旨在为生物质固定燃

烧源排放不同粒径级别颗粒物的元素组成和化合物组成及危害特性研究提供新的手段。

1 系统原理与设计

1.1 工作原理

张永亮等^[24]利用低压电子冲击仪研究获取了 3 种不同种类生物质 (玉米秸秆、棉杆、木质颗粒) 成型燃料燃烧排放颗粒物不同粒径级别的质量分布和数量分布特性,研究表明粒径在 10 μm 以下颗粒物质量主要集中在 0.4 ~ 1 μm。针对生物质成型燃料燃烧排放不同粒径级别颗粒物的特点及研究的需要,本装置是模拟烟道中高温烟气排放到环境空气后,其中处于气相和半气相的烟气经过环境空气的稀释冷凝而凝结成颗粒物。

其原理是通过洁净空气发生系统的洁净空气进入射流泵,在等速采样头处产生负压,利用等速采样头处的负压将烟道中的高温烟气抽出与加热保温管洁净空气混合稀释,经混合后的混合气在稀释腔内形成湍流。高温烟气温度降低,其中的气相半气相烟气开始成核,经二级稀释混合气温度接近环境温度,成核后的颗粒物开始成长,混合气进入停留室。在停留室内凝结完全后进入撞击采样装置,迫使颗粒物按不同粒径级别停留在采样滤膜上。与烟道中直接过滤高温烟气中的颗粒物的传统采样方法相比,稀释采样法不仅能够采集到一次颗粒物,同时也能采集到一次凝结颗粒物,捕集到的颗粒物的特征可代表燃烧源排放的全部颗粒物的特征。

1.2 整机结构与参数

稀释通道多级采样装置结构如图 1 所示,其主要结构包括等速采样头、采样枪、一级稀释系统、二

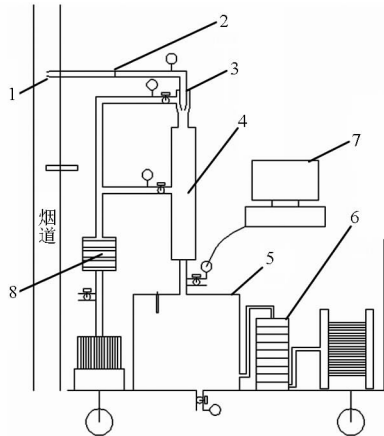


图 1 稀释通道多级采样装置结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of dilute channel multi-stage sampler

- 1. 等速采样头 2. 采样枪 3. 一次稀释系统 4. 二次稀释系统
- 5. 暂存箱 6. 撞击采样装置 7. 控制系统 8. 洁净空气发生系统

级稀释系统、洁净空气发生系统、暂存箱、撞击采样装置和控制系统等。

固定源稀释通道多级采样装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/mm	1 500×800×1 200
稀释比	10~30
保温温度/℃	0~250
采样流量/(L·min ⁻¹)	28.3
单级颗粒物采样范围/μm	0.4~9.8
采样级别	8
单级采样量/μm	≤1.0

1.3 关键部件设计

1.3.1 等速采样头

采样装置要保证烟气和清洁空气稀释混合均匀,并提供一段混合时间以模拟烟气排放到大气中的冷凝、成核、凝聚等过程,同时装置应便于携带和运输。综合考虑各装置间的参数关系,各参数计算式为

$$d_0 = \sqrt{\frac{V_0}{60\pi v_s}} \tag{1}$$

$$L_c \geq 10D_c \tag{2}$$

$$t_s = \frac{V_c + V_z}{V_0 + V_j} \tag{3}$$

- 式中 d_0 ——采样头直径,取 11 mm
 V_0 ——烟道烟气吸入量,取 2.85 L/min
 v_s ——采样头处烟气流速,取 0.5 m/s
 L_c ——稀释腔长度,取 1 000 mm
 D_c ——稀释腔直径,取 100 mm
 t_s ——烟气停留时间,取 90 s
 V_c ——稀释腔体积,取 7.85 L
 V_z ——暂存箱体积,取 125 L
 V_j ——洁净空气用量,取 85.5 L/min

设计选用空压机稳压流量为 100 L/min,设计稀释比最大为 30,最大烟气吸入流量为 3 L/min,依据射流泵所能产生的不同负压和不同直径采样嘴(3、5、7、9、11 mm)计算得到不同的采样流速 v_s 。

1.3.2 射流泵

射流泵的工作原理是利用高速工作流体卷吸低速流体来实现增压过程,结构简单,工作可靠,且无运动部件,特别适合于水下、放射和易燃易爆等特殊场合。射流泵的主要组成部分包括喷嘴、吸入室、喉管及扩散管。根据喷嘴结构,射流泵主要分为中心射流泵和环形射流泵 2 种^[25]。本装置采集烟道中的烟气进行稀释,射流泵因为没有活动部件所以能

较好地满足采样试验要求,装置采用环形射流泵的设计,经过洁净空气发生模块产生高速流动的稀释空气,通过外环喷嘴进入射流泵,高速气体在吸入室内因管径变化形成负压带动中心喷嘴内的烟气进入采样枪,混合气体经喉管进入稀释腔体形成湍流,射流泵是决定整个稀释采样装置性能的重要部件,国内外一些学者对射流泵进行的大量研究结果表明几何参数对射流泵性能影响很大,而喉嘴距 L_c 是其中关键参数之一^[26-28]。射流泵结构示意图如图 2,主要参数如下: $L_c = 12$ mm;喷嘴直径 $d = 12$ mm;喉管长 $L_k = 70$ mm;喷嘴厚度 $t = 2$ mm;喷嘴收缩角 $\alpha = 15^\circ$;喉管直径 $D_0 = 26$ mm。

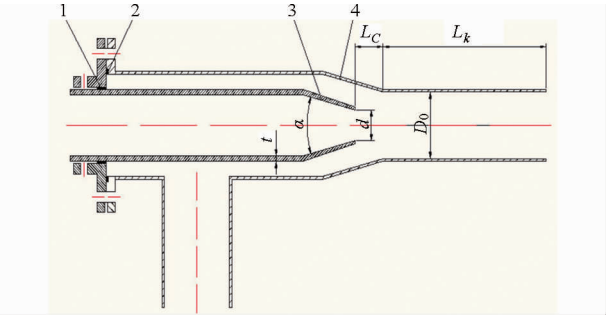


图 2 射流泵结构示意图

Fig.2 Structural diagram of jet pump

1. 中心密封圈 2. 外圆密封圈 3. 喷嘴 4. 吸入室

1.3.3 其他部件设计

为实现稀释采样装置的精确控制,本套装置采用 PID(Proportion integration differentiation)控制,控制系统的设计主要包括逻辑控制器、人机交互系统(触摸屏)、温湿度传感器、流量传感器、流量控制器。逻辑控制器采用自行设计开发的程序,可以实现各传感器的数据采集、读写和存储,稀释通道多级采样装置的运行参数设置,采样流量和保温温度的反馈控制。设备并行安装了流量控制阀、温度调节阀、气压调节阀等手动控制阀门,如自动控制控制出现问题可转换至手动控制方式,保证设备能持续稳定可靠的运行。因为生物质成型燃料本身含水率为 8%~14%,所以生物质成型燃料燃烧排放烟气相对湿度在 55%~65%之间,在开展烟气中颗粒物收集时,烟气冷凝过程中水蒸气和颗粒物一起被冷却,液化后的水蒸气同颗粒物一起附着在颗粒物采集滤膜表面从而干扰颗粒物的采样试验。为降低稀释烟气中的水蒸气含量,本装置在洁净空气发生装置中加装了空气干燥装置,将稀释气含水率降低到 10%左右,本装置的稀释比为 30,稀释后的混合烟气相对湿度降低为 11.45%~11.77%,降低含水率后的烟气可防止其中水蒸气在滤膜上液化。

对比朱玲等^[29]开发的固定源稀释通道采样器,

稀释比提升 100% ,停留时间延长 50% ,采用闭环控制,控制精度大幅提升,且设备能够实现颗粒物的分析采样,采样效率高。

2 采样试验

2.1 试验设计与仪器

稀释通道多级采样装置加工调试完成后,对设备性能进行试验验证。首先对稀释通道多级采样设备气密性开展试验验证,加压 0.2 MPa 保持 5 min,系统压力降均值小于 5% ,装置的气密性能良好;其次试验验证设备的保温性能,调节加热温度分别为 150、180、210、240℃ 保持 30 min,通过温度传感器监测发现温度波动小于 0.5% ,说明保温性能良好;稀释通道的采样流量波动小于 2% ,采样性能良好。最后对设备稀释比调节范围进行试验验证,调节洁净空气的注入量检测不同等速采样头下的烟气采集量,进而确定稀释比的调节范围。

为验证稀释通道多级采样装置的采样效果,以及初步探究不同稀释比对采样效果的影响,安排了 5 组试验,试验在农业部规划设计研究院开发的生物质燃烧试验平台上完成,燃烧设备为上进料式燃烧器,如图 3 所示,额定功率为 60 kW^[30]。破渣清灰机构安装在燃烧内筒中,解决了生物质成型燃料在燃烧过程中的燃料推进、搅拌、破渣以及灰渣排出等问题。试验采集颗粒物参照 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》进行,采样装置使用玻璃纤维滤膜开展颗粒物采样试验,采样前将滤膜静置于干燥器中 2 h,采样完成后取出采样滤膜静置于干燥器中 2 h 后,使用精度为 0.001 mg 赛多利斯天平称量采样滤膜质量。



图 3 现场采样图
Fig.3 Scene sampling figure

2.2 试验参数

结合燃烧器运行工况选择燃烧器常态化运行功率即 42 kW/h 开展试验,通过前期使用此燃烧器开展的试验对燃烧器效率和排放烟气检测分析表明,燃烧器运行过程中过量空气系数为 2.5 时燃烧效率及排放综合指标较优^[31]。为验证不同稀释比情况下稀释通道多级采样装置的采样效果,试验选择 5 种不同稀释比开展试验,因撞击采样装置为定流量采样,故依据烟气稀释引起混合烟气浓度变化关系计算出不同稀释比条件下的采样时间,保证在此时间段内进入撞击器中混合烟气换算成未经稀释烟气体积相等。具体参数如表 2 所示。所用木质颗粒燃料特性如表 3 所示。

表 2 试验参数设计
Tab.2 Parameters design

试验组别	运行功率/ kW	过量空气 系数	稀释比	采样时间/ min
1	42	2.5	10	120.0
2	42	2.5	15	174.5
3	42	2.5	20	229.0
4	42	2.5	25	283.5
5	42	2.5	30	2 338.0

表 3 木质颗粒燃料特性
Tab.3 Properties of wood pellet fuel

原料	工业分析(质量分数)/%				元素分析(质量分数)/%				低位发热量*/ (kJ·kg ⁻¹)
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	S	
木质	8.61	1.81	76.03	13.53	47.90	6.56	0.54	0.54	18 480

* 热值为收到基检测热值。

2.3 结果分析

对每组试验平行开展 3 次,试验采集颗粒物结果见表 4,试验成功获取了 8 种不同粒径级别的大气颗粒物,试验结果证明此款稀释通道多级采样装置能够达到设计目标。对试验数据进行分析发现 8 种粒径级别颗粒物质量分布呈现单峰分布,粒径分布集中在 0.4~1.1 μm 之间,占比达到 55.5%~68.1% ,此结果与张永亮等^[24]开展的生物质成型燃料燃烧排放颗粒物质量分布特性相当,能够很好地

表 4 颗粒物采集结果

Tab.4 Particles collection results					%
粒径分布/μm	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组
9.0~10.0	0.189	0.106	0.234	0.146	0.332
5.8~9.0	0.146	0.201	0.122	0.236	0.198
4.7~5.8	0.075	0.193	0.174	0.165	0.068
3.3~4.7	0.265	0.328	0.299	0.235	0.204
2.1~3.3	0.179	0.382	0.358	0.2	0.238
1.1~2.1	0.662	1.833	1.347	0.705	1.366
0.7~1.1	1.114	2.793	1.985	0.99	1.973
0.4~0.7	2.124	4.19	1.411	1.961	1.027

应用于生物质固定燃烧源排放大气颗粒物的多级稀释采样研究中,依据设备采样条件此设备能够很好地应用于生物质、煤和煤与生物质混合燃烧等固定燃烧源排放大气颗粒物的采样研究之中。

3 结 论

(1)采用二级稀释和射流原理设计制造了适用于我国生物质固定燃烧源采样工作的稀释通道多级采样装置。该装置由采样枪、一级稀释系统、二级稀

释系统、洁净空气发生系统、撞击采样装置等部分组成,能提供 10 ~ 30 倍稀释比、90 s 的停留时间。

(2)试验结果表明,采用本装置能够采集到 8 种不同粒径级别的颗粒物,其中粒径在 0.4 ~ 1.1 μm 之间的颗粒物占总采集颗粒物的 55.5% ~ 68.1%,试验表明该装置对细颗粒物的采集效果较好。可广泛应用于生物质固定燃烧源排放颗粒物采样研究工作中。

参 考 文 献

- 1 姚宗路,赵立欣,Ronnback M,等.生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J].农业机械学报,2010,41(10):97-102.
YAO Zonglu, ZHAO Lixin, RONNBACK M, et al. Comparison on characterization effect of biomass pellet fuel on combustion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 97-102. (in Chinese)
- 2 姚向君,田宜水.生物质能资源清洁转化利用技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- 3 毕于运,高春雨,王亚静,等.中国秸秆资源量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.
BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Yajing, et al. Estimation of straw resources in China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 211-217. (in Chinese)
- 4 姚宗路,崔军,赵立欣,等.瑞典生物质颗粒燃料产业发展现状与经验[J].可再生能源,2010,28(6):26-32.
- 5 罗娟,侯书林,赵立欣,等.生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展[J].可再生能源,2009,27(6):90-95.
- 6 田宜水,孟海波.农作物秸秆开发利用技术[M].北京:化学工业出版社,2008.
- 7 农业部新闻办公室.全国农作物秸秆资源调查与评价报告[J].农业工程技术:新能源产业,2011(2):1-5.
- 8 朱建春,李荣华,杨香云,等.近30年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(4):139-145.
ZHU Jianchun, LI Ronghua, YANG Xiangyun, et al. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in 30 years in China [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science, 2012, 40(4): 139-145. (in Chinese)
- 9 GB 3095—2012 大气环境质量标准[S]. 2012.
- 10 霍雨佳. PM_{2.5}对人体健康的危害[J].生命与灾害,2011(12):15.
- 11 刘岩磊,孙岚,张英鸽.粒径小于2.5微米可吸入颗粒物的危害[J].国外医学:药学分册,2011,38(6):428-431.
- 12 SIPPULA O. Particle emissions from small wood-fired district heating units[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(6): 2974-2982.
- 13 GU Jixia, BAI Zhipeng, LI Weifang, et al. Chemical composition of PM_{2.5} during winter in Tianjin, China[J]. Particuology, 2011, 9(3): 215-221.
- 14 YANG D, QI S, DEVI N, et al. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} and PM₁₀ in Tanggu District, Tianjin Binhai New Area, China[J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(3): 324-330.
- 15 THOMAS N. Aerosols from biomass combustion [C] // Zurich: International Seminar on Aerosol from Biomass Combustion, International Energy Agency, 2001.
- 16 U. S. Environment Protection Agency. Particulate matter (PM)-in-stack filtration [S]. EMTIC. Washington, D. C: National Center for Environmental Assessment, EPA, 1996-08-16.
- 17 孔少飞,白志鹏,陆炳,等.固定源排放颗粒物采样方法的研究[J].环境科学与技术,2011,34(12):88-93.
- 18 GE Su, BAI Zhipeng, LIV Wei, et al. Boiler briquette coal versus raw coal: part I—stack gas emissions [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, 51(4): 524-533.
- 19 ZHANG Ji, GE Su, BAI Zhipeng. The boiler briquette coal versus raw coal: part II—energy greenhouse gas and air quality implications[J]. Journal of Air & Waste Management Association, 2001, 51(4): 534-541.
- 20 白志鹏,朱坦,葛苏,等.烟道气稀释混合多通道分级采样装置:中国,03258297.8[P]. 2004-08-04.
- 21 周楠,曾立民,于雪娜,等.固定源稀释通道的设计和外墙测试研究[J].环境科学学报,2006,26(5):764-772.
ZHOU Nan, ZENG Limin, YU Xuena, et al. The design and field test of a dilution tunnel for stationary sources[J]. Acta Scientiae Circum Stantiae, 2006, 26(5): 764-772. (in Chinese)
- 22 李兴华,段雷,郝吉明,等.固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用[J].环境科学学报,2008,28(3):456-463
LI Xinghua, DUAN Lei, HAO Jiming, et al. Design and application of a dilution stack sampling system for measuring particulate matter from stationary combustion sources[J]. Acta Scientiae Circum Stantiae, 2008, 28(3): 456-463. (in Chinese)
- 23 肖龙洲,龙新平.吸入室角度对环形射流泵空化性能的影响[J].浙江大学学报,2015,49(1):123-130.
- 24 张永亮,赵立欣,姚宗路,等.生物质固体成型燃料燃烧颗粒物的数量和质量分布特性[J].农业工程学报,2013,29(19):185-192.
ZHANG Yongliang, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Distribution characteristics of number and mass for particulate emission of biomass solid fuel combustion [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 185-192. (in Chinese)

Proceedings of SPIE 7976, 2011: 1 – 10.

9 ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003 – 2006) [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(3): 1 – 21.

10 WISSLER M, MAZZA E. Modeling of a prestrained circular actuator made of dielectric elastomer [J]. Sensor and Actuator A, 2005, 120(1): 184 – 192.

11 桂凤利, 刘世清, 李陆化, 等. 纵-径耦合型超声功率合成振动系统的研究[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版, 2015, 38(1): 52 – 57.

GUI F L, LIU S Q, LI L H, et al. Longitudinal-radial coupling research of synthetic power ultrasonic vibration system [J]. Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences, 2015, 38(1): 52 – 57. (in Chinese)

12 林桂娟, 宋德朝, 陈明, 等. 电话性聚合物的力学性能及发电应用[J]. 同济大学学报, 2011, 39(6): 909 – 910.

LIN G J, SONG D C, CHEN M, et al. Mechanical property and power generation application research on dielectric electro active polymer [J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(6): 909 – 910. (in Chinese)

13 WISSLER M, MAZZA E. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(6): 1396 – 1402.

14 朱银龙, 王华明, 周宏平. 介电型电话性聚合物能量收集方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 362 – 367.

ZHU Y L, WANG H M, ZHOU H P. Energy harvesting of dielectric electroactive polymer transducer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 362 – 367. (in Chinese)

15 陈明, 林桂娟, 宋德朝. 基于电话性聚合物的微型发电机研究[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2415 – 2416.

CHEN M, LIN G J, SONG D C. Micro-power generator on dielectric electroactive polymer [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2415 – 2416. (in Chinese)

16 PIERRE C, GUYOMAR D, GUIFFARD B, et al. Modeling and experimentation on an electrostrictive polymer composite for energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(4): 774 – 784.

17 E S J, CAO J B. Research on strain characteristic and power generation mechanism of electroactive acrylic elastomer [J]. Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011, 36(3): 267 – 278.

18 FEDERICO C, GABRIELE F, CARLO G. Enabling variable-stiffness hand rehabilitation orthoses with dielectric elastomer transducers [J]. Medical Engineering and Physics, 2014, 36(2): 205 – 211.

~~~~~

(上接第 178 页)

25 胡湘韩, 阚瑞清. 喷射泵技术及其应用[M]. 哈尔滨:黑龙江科技出版社, 1990.

26 杨燕勤, 安志强, 经树栋. 喷射器流场的数值模拟研究 [J]. 西南大学学报:自然科学版, 2006, 32(2): 1 – 4.

27 孙殿雨, 颜廷俊. 喷射泵气蚀现象试验分析[J]. 石油机械, 1997, 25(8): 1 – 4.

SUN Dianyue, YAN Tingjun. Test of cavitation of jet pump[J]. Petroleum Machinery, 1997, 25(8): 1 – 4. (in Chinese)

28 江勇, 陈娟, 任亚龙, 等. 海底管道挖沟机射流泵参数确定方法[J]. 油气储运, 2013, 32(5): 504 – 507.

29 朱玲, 田秀华, 王同建. 固定源烟气颗粒物稀释采样器的设计及应用[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(6): 51 – 54.

30 张学敏, 张永亮, 姚宗路, 等. 不同进料方式燃烧器对生物质燃料颗粒物排放特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 200 – 207.

ZHANG Xuemin, ZHANG Yongliang, YAO Zonglu, et al. Effect of burner with different feeding modes on emission characteristics of biomass molding fuel particle [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 200 – 207. (in Chinese)

31 姚宗路, 吴同杰, 赵立欣, 等. 生物质成型燃料燃烧挥发性有机物排放特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 235 – 240.

YAO Zonglu, WU Tongjie, ZHAO Lixin, et al. Emission characteristic of VOCs form biomass molding fuel combustion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 235 – 240. (in Chinese)