

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

基于虚拟撞击原理的固定源 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 采样器的研制

蒋靖坤^{1,2}, 邓建国¹, 段雷^{1,2}, 张强¹, 李振¹, 陈小彤¹, 李兴华³, 郝吉明^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084; 3. 北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100191)

摘要: 目前我国尚无固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 采样标准方法, 现有商业化的固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器在使用中存在明显不足, 因此本研究开发了一种固定源 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器。经实验室标定, 该采样器切割效率曲线优于国际标准 ISO 7708:1995 对采样器的规定, 采样器横截面直径为 74 mm, 满足我国固定源采样口尺寸要求。采样器既可以安装滤膜, 也可以安装滤筒, 适用于不同浓度的烟尘采样。虚拟撞击器的切割点与次流所占比值呈负相关, 比值减小时, 切割点增大。为降低颗粒物损失, 虚拟撞击器喷嘴距收口的距离至少应为喷嘴直径的 1.5~2 倍。

关键词: 固定污染源; 虚拟撞击器; 可吸入颗粒物 (PM_{10}); 细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$); 切割效率

中图分类号: X830.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3639-05 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.10.001

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ Sampling

JIANG Jing-kun^{1,2}, DENG Jian-guo¹, DUAN Lei^{1,2}, ZHANG Qiang¹, LI Zhen¹, CHEN Xiao-tong¹, LI Xing-hua³, HAO Ji-ming^{1,2}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China; 3. School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: China does not have a national standard method for stationary source PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ sampling. Current commercial $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ samplers have some limitations when used in China. In this study, we developed a two stage virtual impactor for sampling $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ from stationary source. Its performance was evaluated using laboratory generated aerosol. Its collection efficiency curve satisfies the requirement of ISO 7708:1995 for $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ samplers. The diameter of this cylindrical virtual impactor is 74mm, smaller than the diameter of the sampling port in most stationary sources in China. Both filter papers and filter thimbles can be used with this impactor which makes it suitable for both low and high dust concentration sampling. The ratio of the minor flowrate to the total flowrate influences the cutoff size (D_{50}) of the virtual impactor. Reducing this ratio will lead to an increase in D_{50} . The distance from the bottom of the accelerating nozzle to the top of the collecting nozzle should be greater than 1.5-2.0 times the diameter of the accelerating nozzle.

Key words: stationary source; virtual impactor; PM_{10} ; $\text{PM}_{2.5}$; collection efficiency

$\text{PM}_{2.5}$ 污染已经成为我国主要的大气环境问题。目前已开展 $\text{PM}_{2.5}$ 监测的城市中多数不能满足我国新的环境空气质量标准的要求 ($\text{PM}_{2.5}$ 日均值 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均值 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[1]。据统计, 我国 1990~2005 年期间排放的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 中约 50% 来自固定污染源^[2]。为使 $\text{PM}_{2.5}$ 达标, 各地需对固定污染源烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 进行监测和控制, 但国内目前尚无固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 采样标准方法。蒋靖坤等^[3] 系统总结了国内外现有固定污染源烟气 $\text{PM}_{2.5}$ 采样方法。目前商业化的 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器多为基于惯性撞击原理的撞击器 (Impactor), 常见的有 Johnas-II $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 双级采样器^[4], 以及多级采样器如低压荷电撞击采样器 (ELPI) 和 Anderson 采样器^[5,6]。由于使用收集板收

集颗粒物, 该类型采样器存在颗粒反弹和再悬浮问题, 致使部分粒径较大的颗粒进入到 $\text{PM}_{2.5}$ 收集级, 容易高估 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。另一种商业化的 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器为双级旋风采样器, 是美国环保署 (USEPA) 建议的方法^[7], 但该采样器在我国的应用有如下两个方面的限制: ①尺寸较大, $\text{PM}_{2.5}$ 旋风级要求采样口尺寸为 100 mm, PM_{10} 旋风尺寸为 150 mm, 而我国固定源采样口通常为 80 mm; ②需要用丙酮清洗, 该采样器需要用丙酮清洗采样管路和集成部件, 后续需要

收稿日期: 2014-03-14; 修订日期: 2014-04-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2013CB228505); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2013AA065101, 2013AA065004)

作者简介: 蒋靖坤 (1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为气溶胶测量和大气颗粒物成因, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

将丙酮蒸干,然后称重. 操作繁琐复杂,在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低时丙酮清洗容易引入较大误差,此外丙酮对人体有毒害作用.

近年来,为了克服传统撞击器存在的 $\text{PM}_{2.5}$ 高估问题,虚拟撞击原理已被用于大气环境颗粒物采样,也有研究报道了基于该原理设计的烟尘采样器^[8~10]. 但是,这些虚拟撞击采样器同样由于尺寸较大,不适合于我国固定源采样口,且测量高浓度烟气时滤膜很容易过载. 为了克服上述问题,笔者研制了一种适用于我国固定源 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 采样的双击虚拟撞击器,并利用实验室发生的标准气溶胶对其切割效率和颗粒物损失进行了评估.

1 虚拟撞击原理

虚拟撞击分级采样的原理与传统的惯性分级采样相似,都是利用不同粒径颗粒物的惯性不同进行分级. 但是虚拟撞击采样器没有集尘板,取而代之的是收尘嘴. 如图 1 所示,虚拟惯性撞击采样器由上下同轴的两个喷嘴构成. 上喷嘴为加速喷嘴,下喷嘴为收口. 当气流进入喷嘴后被加速,高速的气流然后一分为二,其中一部分气流,约占总气流的 90%,发生 90°变向,进入下一级,该部分气流称为主流;另一部分气流,约占总气流的 10%,直接进入收口,该部分气流称为次流. 粒径小的颗粒物,惯性小,容易跟随气流一起运动;而粒径大的颗粒物惯性大,容易脱离变向气流. 因此,在虚拟撞击采样器中粒径小的颗粒物随着气流一分为二,大部分随主流进入下一级,小部分随次流进入收口. 而粒径大的颗粒物脱离主流,随次流进入收口. 颗粒物的这

种按惯性分离的性质可用一个参数来表征,即斯托克斯数(Stk). 小粒径的颗粒物 Stk 小,大粒径的颗粒物 Stk 大. 如果某一粒径的颗粒物有 50% 随主流进入下一级,另外的 50% 随次流进入收口,则称该粒径为切割粒径(D_{50}),对应的斯托克斯数为 Stk_{50} . D_{50} 和 Stk_{50} 的关系满足如下斯托克斯公式,受流体的性质和采样器几何参数影响^[11~13]. 虚拟撞击器主要的几何参数包括喷嘴直径 D_0 、收口直径 D_1 、喷嘴距收口的距离 S 、喷嘴长度 L 、收口顶端圆角 R 和喷嘴与收口同轴度 δ .

$$D_{50} = \sqrt{\frac{9\pi\eta D_0^3 \cdot \text{Stk}_{50}}{4C_p\rho Q}} \tag{1}$$

2 虚拟撞击采样器的设计与加工

以直径不超过我国固定源采样口的常用尺寸 (80 mm) 为原则进行了 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器的设计. 首先假设 Stk_{50} , 确定切割点 D_{50} 为 2.5 μm 或 10 μm , 然后根据斯托克斯公式 (1) 确定采样流量 Q 和喷嘴直径 D_0 . 理论和实验结果表明收口直径 D_1 约为 D_0 的 1.3 ~ 1.4 倍时颗粒物损失最小^[14,15], 基于此比例确定了 D_1 的大小. 本设计采用的基本参数如表 1 所示. 实物图和示意图如图 2 所示, 采样器分为三级, 分别收集 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5-10}$ 和 $\text{PM}_{>10}$. 喷嘴与收口均匀地分布在直径为 10 ~ 30 mm 的圆上, 喷嘴分别与收口对应, 在加工过程中采用一体化加工, 保证了二者同轴. 在收口的下部特别设计了锥状凸出, 可以放置滤筒, 适用于高浓度烟气的采样; 低浓度时可以放置滤膜. 采样器的气体管路全部内嵌于采样器内部, 采样器外径为 74 mm, 适用于我国固定源采样口.

表 1 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器的基本参数

Table 1 Parameters of $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ two stage virtual impactor

参数	PM_{10} 级	$\text{PM}_{2.5}$ 级
喷嘴数/个	4	6
加速喷嘴直径 D_0/mm	4.62	1.50
收集收口直径 D_1/mm	6.20	2.00
喷嘴距收口的距离 S/mm	7	3
入口总流量 $Q_0/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	9.8	9.0
次流流量 $Q_{\text{minor}}/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	0.8	0.9
斯托克斯数 Stk_{50}	0.32	0.37
喷嘴处雷诺数 (25℃ 空气)	682	1 297

3 虚拟撞击采样器的标定

3.1 标定系统

利用实验室搭建的标定系统对虚拟撞击采样器进行了标定. 标定系统包括振动孔气溶胶发生器

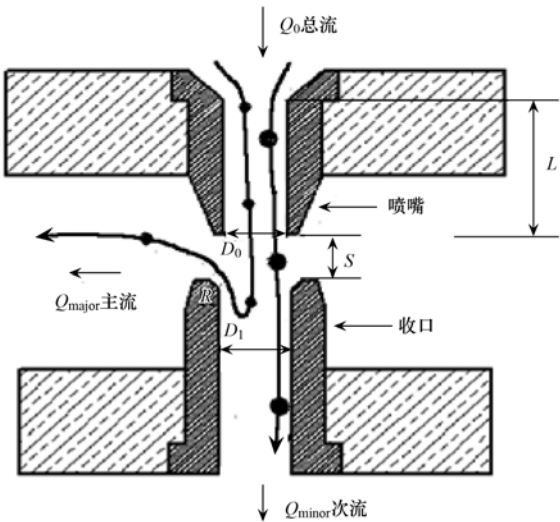
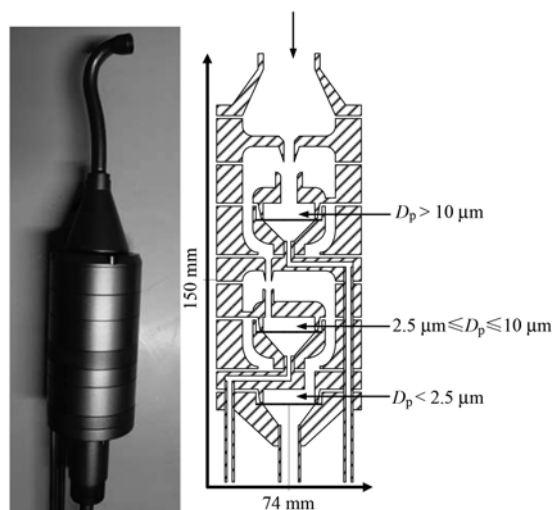


图 1 虚拟撞击采样器示意
Fig. 1 Schematics of virtual impactor

图2 PM₁₀/PM_{2.5} 双级虚拟撞击采样器Fig. 2 PM₁₀/PM_{2.5} two stage virtual impactor

(VOAG, TSI 3450)、零空气发生器、干燥室和空气动力学粒径谱仪 (APS, TSI 3321)。用 VOAG 产生含有荧光素铵的液滴, 然后用零空气进行干燥, 最后形成单分散的固体荧光素铵颗粒。固定 VOAG 的振动频率, 调整荧光素铵溶液浓度可获得不同粒径大小的单分散颗粒, 即 1~20 μm。用尼龙滤膜收集发生的单分散荧光素铵颗粒, 然后用荧光显微镜 (Leica, DM6000B) 观察其形状, 确认其为球形。用 APS 实时监测颗粒物的单分散性。实验前先用聚苯乙烯小球 (PSL) 对 APS 进行了标定, 测得 1、2 和 2.5 μm 的 PSL 小球的峰值分别为 1.05、1.98 和 2.46 μm, 表明 APS 满足测试要求。

将双级虚拟撞击采样器置于干燥室中进行标定。用石英膜分别收集 PM₁₀ 级与 PM_{2.5} 级主流和次流中荧光素铵颗粒, 同时收集采样器内表面损失的荧光素铵颗粒, 然后用高纯水将滤膜上和损失的荧光素铵洗入不同的烧杯中, 用荧光分光光度计 (HITACHI, F7000) 测定荧光素铵的含量, 其中主流中荧光素铵的量记为 M_1 , 次流中的记为 M_2 , 损失的记为 M_3 , 则 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 级切割效率 (η_1) 和损失 (η_2) 可分别按公式 (2) 和 (3) 计算:

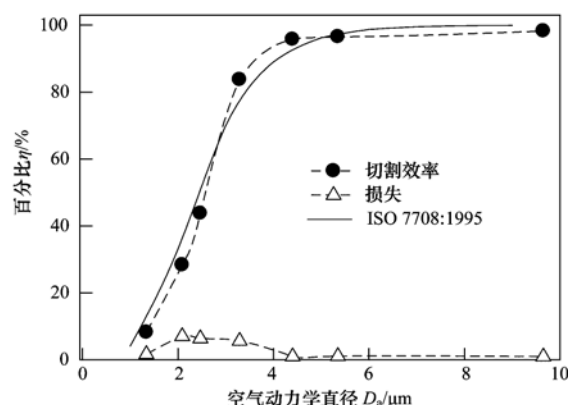
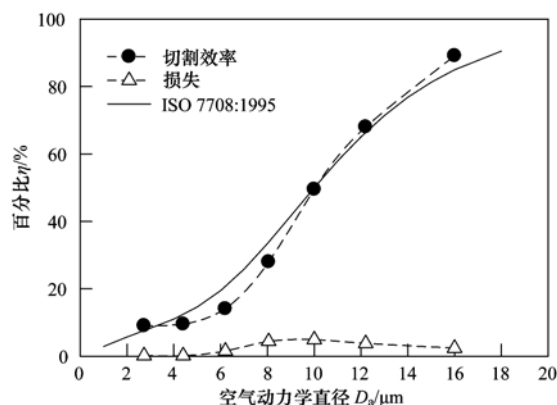
$$\eta_1 = \frac{M_2}{M_1 + M_2 + M_3} \quad (2)$$

$$\eta_2 = \frac{M_3}{M_1 + M_2 + M_3} \quad (3)$$

3.2 标定结果

如图 3 和 4 所示, 虚拟撞击采样器 PM₁₀ 级和 PM_{2.5} 级的切割效率曲线均优于国际标准 ISO 7708:1995^[16] 中规定的 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器切割效率 (本研

究开发的采样器切割效率曲线更陡)。两级对应的实际切割粒径分别为 2.49 μm 和 10.0 μm, 相应的 Stk_{50} 分别为 0.32 和 0.37。虚拟撞击采样器的切割效率曲线不同于传统撞击采样器, 由于次流携带一部分粒径小的颗粒物 (又称为“小颗粒物污染”), 随着空气动力学直径 D_a 变小, 切割效率曲线不是趋于 0, 而是趋于次流所占的比值。但由于小颗粒物的质量较小, 其对计算 PM_{2.5} 质量浓度的影响可以忽略不计。从 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的损失结果可知, 虚拟撞击器的颗粒物损失在切割点附近达到最大。在清洗采样器内表面时发现颗粒物损失主要发生在喷嘴所在的基面和收口顶端, 为此在收口顶端加工半径为 R 的圆角以及增加喷嘴的长度, 可有效降低颗粒物的损失, 因为这样主流在收口顶端可以平滑过渡, 而且不会撞到喷嘴所在的基面。采样器 PM_{2.5} 级的损失不超过 7%, PM₁₀ 级的损失不超过 5%, 符合国际标准 ISO 13271:2012 中对于虚拟撞击采样器的要求^[17]。

图3 PM_{2.5} 级的切割效率曲线和不同粒径颗粒物的损失Fig. 3 Collection efficiency of PM_{2.5} stage and loss of different sized particles图4 PM₁₀ 级的切割效率曲线和不同粒径颗粒物的损失Fig. 4 Collection efficiency of PM₁₀ stage and loss of different sized particles

4 虚拟撞击采样器基本参数对切割效率的影响

4.1 次流比

Marple 等^[14,18,19]的模拟计算发现虚拟撞击器 Stk_{50} 的理论值只取决于次流与主流的比值(次流比),而撞击器的几何参数可通过影响颗粒物的损失进而影响 Stk_{50} 的真实值. 本研究固定了 VOAG 产生颗粒物的粒径 ($2.48 \mu m$), 总流量保持在 $9 L \cdot min^{-1}$, 改变次流比研究了其对切割点的影响. 结果如图 5 所示, 随着次流比变小, $2.48 \mu m$ 颗粒物的切割效率下降, 其损失变化不大. 基于斯托克斯公式推算, Stk_{50} 的值将增大. 此结果与报道的结果相符^[20~25].

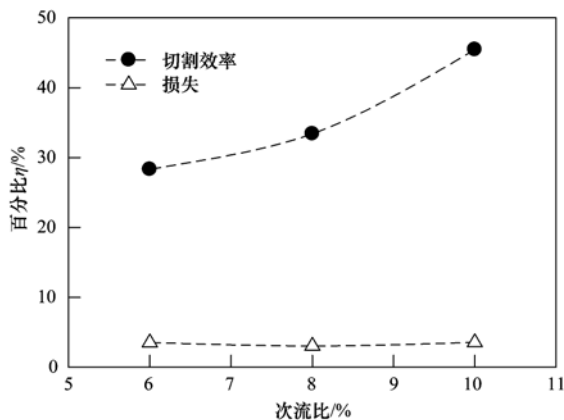


图 5 次流比对固定粒径颗粒物的切割效率和损失的影响

Fig. 5 Collection efficiency and loss as a function of the minor to major flow ratio

4.2 喷嘴距收口的距离

固定 $PM_{2.5}$ 级采样流量和其他几何参数, 调整喷嘴到收口的距离(分别取 2、2.5 和 3 mm), 按上述方法确定切割效率曲线, 结果如图 6 所示. 当距离为 2 mm 时颗粒物损失严重, 切割效率曲线严重右移. 但是当距离大于等于 2.5 mm 时切割效率曲线没有明显的差别. 这说明喷嘴距收口的距离应大于一定的数值, 对于本研究中的虚拟撞击器, 距离至少应为喷嘴直径的 1.5 ~ 2 倍.

5 结论

(1) 研制了一种适用于我国固定源 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 采样的双级虚拟撞击采样器, 该采样器的切割效率曲线优于国际标准 ISO 7708:1995 对采样器的规定, 采样器横截面直径为 74 mm, 满足我国固定源采样口尺寸要求. 采样器既可以安装滤膜, 也可以安装滤筒, 适用于不同浓度的烟尘测量.

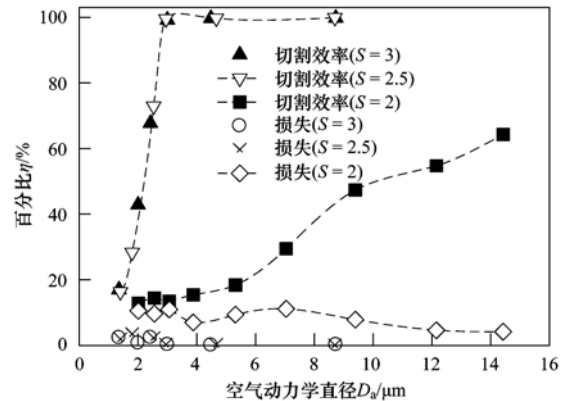


图 6 喷嘴距收口的距离对切割效率和损失的影响

Fig. 6 Collection efficiency and loss as a function of the distance from the accelerating nozzle to the collecting nozzle

(2) 虚拟撞击器的切割粒径与次流比呈负相关; 为降低颗粒物的损失, 虚拟撞击器喷嘴距收口的距离至少应为喷嘴直径的 1.5 ~ 2 倍.

致谢: 感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所桂华侨博士提供 VOAG 支持.

参考文献:

- [1] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [2] Lei Y, Zhang Q, He K B, *et al.* Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990- 2005 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(3): 931-954.
- [3] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 固定污染源排气中 $PM_{2.5}$ 采样方法综述[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 2018-2024.
- [4] John A C, Kuhlbusch T A J, Fissan H, *et al.* Development of a $PM_{10}/PM_{2.5}$ cascade impactor and in-stack measurements[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2003, **37**(9): 694-702.
- [5] 刘光铨, 王炎生, 陈明兰, 等. WY-1 型烟道用冲击式尘粒分级仪的研制[J]. *环境工程*, 1985, **5**(1): 17-24.
- [6] 原永涛, 魏玉珍, 张滨渭, 等. 多级冲击采样器用于发电厂烟道飞灰采样的探讨[J]. *热力发电*, 2012, **39**(5): 77-81.
- [7] USEPA Method 201a and 202. Methods for measurement of filterable PM_{10} and $PM_{2.5}$ and measurement of condensable particulate matter emissions from stationary sources[S]. 2010.
- [8] Wada M, Tsukada M, Kondo A, *et al.* Separation characteristics of a multi-stage VIS impactor for $PM_{10}/PM_{2.5}$ mass concentration measurement in a stack of a stationary source[J]. *Journal of the Society of Powder Technology*, 2009, **46**(6): 467-475.
- [9] Szymanski W S, Liu B Y H. An airborne particle sampler for the space shuttle[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1989, **20**(8): 1569-1572.
- [10] Wang D B, Kam W, Cheung K, *et al.* Development of a two-stage virtual impactor system for high concentration enrichment of ultrafine, $PM_{2.5}$, and coarse particulate matter[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2013, **47**(3): 231-238.
- [11] Friedlander S K. Smoke, dust, and haze: fundamentals of aerosol dynamics [M]. (2nd ed.). New York: Oxford

- University Press, 2000. 94-124.
- [12] Hinds W C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles (2nd ed.) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999. 117-136.
- [13] Kulkarni P, Baron P A, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011. 129-151.
- [14] Marple V A, Chien C M. Virtual Impactors: A theoretical study [J]. Environmental Science and Technology, 1980, **14** (8): 976-985.
- [15] Loo B W, Cork C P. Development of high efficiency virtual impactors [J]. Aerosol Science and Technology, 1988, **9** (3): 167-176.
- [16] ISO 7708: 1995. Air quality-Particle size fraction definitions for health-related sampling [S].
- [17] ISO 13271: 2012. Stationary source emissions-Determination of $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in flue gas-Measurement at higher concentrations by use of virtual impactors [S].
- [18] Marple V A. History of impactors-the first 110 years [J]. Aerosol Science and Technology, 2004, **38** (3): 247-292.
- [19] Marple V A, Willeke K. Impactor design [J]. Atmospheric Environment, 1976, **12**: 891-896.
- [20] Novick V J, Alvarez J L. Design of a multistage virtual impactor [J]. Aerosol Science and Technology, 1987, **6** (1): 63-70.
- [21] Xu X. A Study of Virtual Impactor [D]. Minneapolis: University of Minnesota, 1991. 98-150.
- [22] Chen B T, Yeh H C. An improved virtual impactor: design and performance [J]. Journal of Aerosol Science, 1987, **18** (2): 203-214.
- [23] Chen B T, Yeh H C, Cheng Y S. Performance of a modified virtual impactor [J]. Aerosol Science and Technology, 1986, **5** (3): 369-376.
- [24] Chen B T, Yeh H C, Cheng Y S. A novel virtual impactor: Calibration and use [J]. Journal of Aerosol Science, 1985, **16** (4): 343-354.
- [25] Ding Y M, Koutrakis P. Development of a dichotomous slit nozzle virtual impactor [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, **31** (12): 1421-1431.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行