

滤网对颗粒捕集过程的微观实验

余振辉, 柳静献, 初砚昊, 田 鹏
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 由于滤网具有良好的颗粒捕集性能而被广泛应用于工业或民用领域,但对其微观捕集机理研究尚且有限. 本文通过建立一套显微观测系统真实记录滤网捕集颗粒的全过程,研究其在捕集颗粒过程中的微观表现,分析影响单纤维过滤及滤网网孔架桥堵塞的影响因素. 结果表明随着过滤风速的减小,滤网的未堵塞孔面积与孔总面积之比逐渐降低,且最终会出现一个稳定状态;而随着滤网孔径的减小,该比值逐渐降低. 在实际使用过程中应根据具体使用条件合理选择过滤风速和滤网孔径,对于长时间使用的滤网应及时清灰避免二次污染.

关 键 词: 滤网;捕集机理;显微观测;架桥;网孔堵塞
中图分类号: X 701.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0430-06

Microscopic Experiment of Particle Trapping Process for Filter Screen

YU Zhen-hui, LIU Jing-xian, CHU Yan-hao, TIAN Peng
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: 82003@126.com)

Abstract: Due to its good particles trapping properties, filter screen is widely used in industrial or civil fields. However, the research on its micro-capture mechanism is still limited. In this paper, a set of microscopic observation system was set up to record the whole process of filter screen trapping particles. The microscopic performance of the process of particles trapping was studied. The influencing factors that affect single fiber filtration and mesh bridging blockage were analyzed. The results show that with the increase of filtration velocity, the ratio of unblocked pore area to total pore area gradually decreases, and eventually a stable state will appear. With the increase of mesh number, the ratio gradually decreases. In the actual application, the filtration velocity and filter screen pore size should be properly selected according to the specific conditions of use. The filter screen should be cleaned in time to avoid secondary pollution.

Key words: filter screen; trapping mechanism; microscopic observation; bridging; mesh blockage

随着我国工业化进程的不断向前推进,矿山、电力、建筑、机械等行业产生了大量有毒有害粉尘^[1-2]. 这些工业粉尘以 PM2.5 含量居多且成分极为复杂,多因粉尘自身粒径较小而高度富集铅、铬、镉、砷和细菌病毒等有害物质,这些粉尘在污染环境的同时也对人们的身体健康造成了巨大威胁^[3],根据相关流行病学研究表明,环境中的微细颗粒物与心肺疾病的加重有很大关联^[4-5]. 面对日益恶化的环境条件,人们对过滤净化装置的需求也在逐年增加^[6]. 滤网由于其过滤阻力较小、使用方便、更换成本低等优点普遍应用于空调和空气净化器的初级过滤等方面. 目前国内外对滤网的研究重点主要集中在宏观过滤性能以及滤网堵塞后清灰方法等方面,现有研究成果中对滤

网堵塞成因的微观研究和理论分析较少. Huang 等^[7]用实验的方法研究了 4 种不同种类的气溶胶颗粒在 3 种预处理条件下被单纤维捕集的过程;Alonso 等^[8]研究了静电力对丝网捕集超细颗粒物的影响;黄浩凯等^[9-10]采用计算机模拟的方法对椭圆形纤维捕集微细颗粒物进行了研究,对于研究滤网捕集颗粒物有借鉴作用.

由于滤网是由多根纤维用某种组织结构织造而成,因此其捕集过程相对于单纤维更加复杂. 在本实验中,作者采用控制单一变量的方法对过滤风速和滤网孔径对于微细颗粒物在滤网上的沉积过程进行了微观实验研究,分析了影响滤网堵塞程度的因素,且沉积过程可实时动态观测. 其不仅弥补了国内对于过滤风速及滤网孔径对滤网捕集细颗粒物微观研究的空白,而且相较于模拟研究更加地真实直观,并对滤网的遴选及合理使用有一定的指导意义.

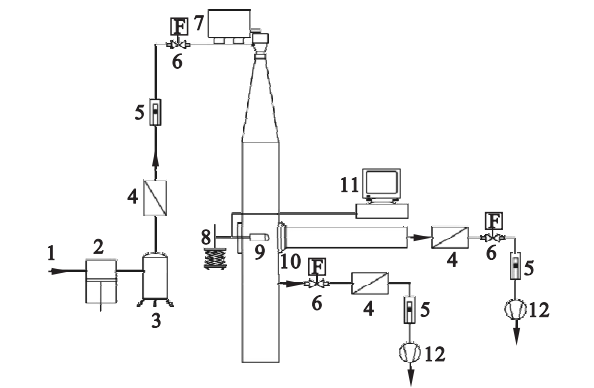
1 实 验

1.1 实验装置和步骤

图 1 为本实验装置的原理图. 气流先经垂直管路向下运动,之后一部分经由上部水平管路抵达实验观测位置,经过滤网后被真空泵抽出排放至大气中. 滤网被牢牢固定在水平管路的夹具中,距滤网前端 20 mm 处居中架设有高分辨率显微镜(AM413, Dino - Lite, 中国),显微镜与计算机相连实时记录实验过程,方便日后数据的调用. 空气经过压缩机压缩之后形成高压气体,存储在气罐中待用,从储气罐出来的高压空气经由管路连接到高效过滤器,通过阀门和转子流量计来控制管路中的气体流量. 发尘器可根据人为设定的转数以恒定速率发出实验用粉尘,高压空气与实验用粉尘在喷吹孔相接触,形成稳定的气溶胶. 气溶胶经过滤网捕集之后,通过高效过滤器净化,调节阀门和转子流量计控制整个断面的平均风速. 为了避免喷吹气流对于本实验结果的影响,在设备下方布置有一条附加管路,通过阀门和转子流量计控制气体流量,由真空泵负责提供动力,由高效过滤器过滤掉气溶胶颗粒避免污染环境. 每次实验结束后都会用洁净的压缩空气清理滤网,以便继续实验.

本实验中发尘器的发生量为 1.16 g/min,喷吹流量为 2.5 m³/h,上方水平管路与附加管路的流量总和为 3 m³/h,通过调节与水平管路相连的阀门来得到所需的实验风速,流量计读数为

0.07,0.29,0.58 m³/h 时分别对应滤网所在截面的平均风速为 0.1,0.4,0.8 m/s. 环境温度为 14.8 ℃,相对湿度为 28% RH.



1—空气;2—压缩机;3—储气罐;4—高效过滤器;5—转子流量计;6—阀门;7—发尘器;8—调节支架;9—显微镜;10—滤网;11—计算机;12—真空泵.

图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

1.2 粉尘和滤网

本实验中所用的粉尘为高纯度氧化铝,其比电阻为 $2 \times 10^9 \Omega/\text{m}$. 图 2 为其粒度分布图,其中粒径为 4.339 μm ,为单峰分布且较为集中.

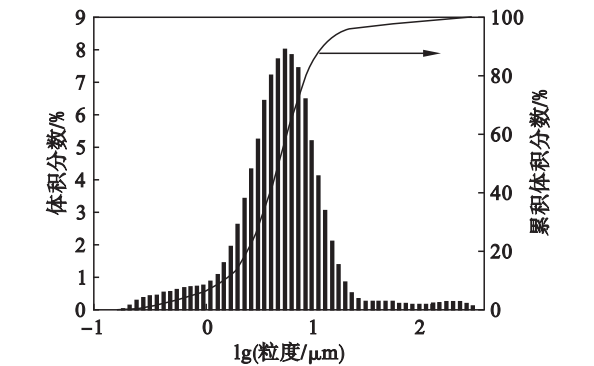


图 2 实验所用粉尘的粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of particles used in this experiment

图 3 为本实验中所用粉尘的电镜图. 实验所用氧化铝粉尘为片状,且出现部分团聚现象. 图 4 为本实验中所用滤网的原图和相应的放大图. 实验所用滤网为商用锦纶网,孔径分别为 0.85, 0.25 和 0.15 mm.

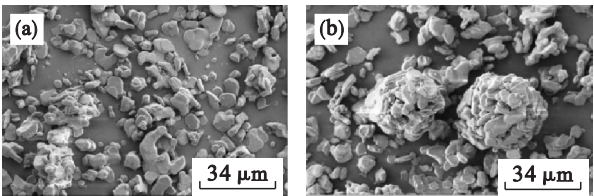


图 3 实验所用粉尘的电镜图

Fig. 3 SEM for particles used in this experiment

(a)—片状;(b)—团聚.

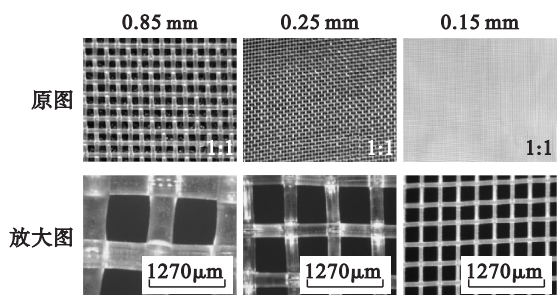


图 4 实验所用的滤网

Fig. 4 Filter screen used in this experiment

2 结果与讨论

图 5 为三种不同孔径的滤网在三种不同过滤风速下捕集细颗粒物的过程,每个过程都是在某一滤网上游发尘总量一定时截取得到,过滤风速分别为 0.1, 0.4, 0.8 m/s.

由图可知,滤网在过滤气流中的微细颗粒物的表现与单纤维过滤有相同点也有不同点. 相同点在于:

1) 滤网捕集细颗粒物过程大致可分为三个过程:①纤维捕集;②粉尘和纤维联合捕集;③粉尘捕集. 颗粒会被纤维机械捕集而沉积于纤维表面,随着实验的进行,纤维上的粉尘层不断增厚压实形成滤饼. 且在低风速下滤饼比较蓬松,在高风速下滤饼比较密实. 通常粒径大于 $0.5 \mu\text{m}$ 的粉尘以惯性和重力沉降为主导,而对于粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的粉尘以布朗扩散为主导,再加上拦截效应,本实验所用粉尘在这 4 种捕集机理联合作用下运动到纤维表面,依靠范德华力与纤维结合在一起^[11-12]. 由实验结果可知,在低风速下更容易形成粉尘树枝结构,该结构链较长且多分叉,在气流曳力的作用下会随风摆动继续参与粉尘捕集,在此过程中有的很难生成树枝状结构,粉尘只能被一层一层的压实形成致密的滤饼,进而捕集后续的粉尘.

2) 在低风速下会首先在滤网网孔边缘长出细小的粉尘树枝,随后粉尘树枝捕集粉尘逐渐长大并形成分叉,其作为滤网的一部分一起参与到粉尘的捕集当中来. 0.1 m/s 风速下可以观察到明显的树枝结构,而在 $0.4, 0.8 \text{ m/s}$ 风速下很少或几乎没有,且随着滤网孔径的不断减小,树枝结构越明显. 这可能是由于在低风速下颗粒物受到的气流曳力较小,而当气流中的粉尘与纤维或已被纤维捕集的粉尘近距离接触时由于范德华力的作用,导致两者发生结合,细小的树枝状结构随风流摆动参与粉尘捕集,且由于已被纤维捕集的粉

尘会产生“遮挡效应”,导致后续颗粒难以被纤维表面直接捕集,增大了树枝结构捕集粉尘的概率,粉尘树枝得以“生长”. 在高风速下,颗粒受到较大的气流曳力,被纤维捕集的颗粒由于范德华力附着于纤维表面,粉尘树枝形成初期由于紧贴纤维表面无法自由摆动,抑制了树枝结构的生长,从而在纤维表面形成粉尘层,随着后续粒子被已沉积粒子不断捕集,粉尘层不断被压实. 随着滤网孔径的减小,其对应的纤维直径也减小,纤维的比表面积逐渐增大,为颗粒物的捕集提供有力的附着条件.

3) 在粉尘树枝生长的过程中,有些树枝会发生断裂被吹向滤网下游,有些树枝会发生绕转沉积于纤维或粉尘层表面,有时粉尘层也会发生局部的滑移现象. 这可能是由于粉尘与纤维之间或粉尘与粉尘之间的结合强度较低导致的,而颗粒的形状和直径会对链的强度产生影响^[7],当过网风速较大或气流不稳定时,树枝受到的气流曳力增大或紊乱,树枝会发生摇摆,当链的强度不足以支撑整个树枝摆动时就会发生断裂或绕转沉积于纤维或粉尘层表面.

与单纤维捕集粉尘过程的不同点在于:

1) 细颗粒物在滤网上沉积是从网孔边缘逐渐向网孔中心进行,当粉尘发散不均匀时会有大颗粒的粉尘絮团存在,被小孔径的滤网捕集时会直接堵塞网孔,造成滤网阻力快速升高,对于分散比较均匀的粉尘,网孔会逐渐向内缩小,且对于小孔径的滤网,网孔会完全阻塞或仅留下很小面积的过流孔洞,而大孔径的滤网则很难完全堵塞. 在高风速下网孔堵塞边缘比较整齐,低风速下由于粉尘树枝的存在而凹凸不齐,这种结构有利于继续捕集粉尘.

2) 滤网网孔大面积堵塞后部分网孔会发生破裂,吹落的粉尘会运动到滤网下游. 这是由于当网孔大面积堵塞时,滤网的过滤阻力快速升高,粉尘层在风压作用下发生破裂,进而降低过滤阻力.

图 6 为孔径 0.15 mm 滤网在 0.1 m/s 风速下粉尘树枝发生架桥的过程,由图可以看出当在滤网网孔内有多个树枝同时生长时,部分树枝会发生架桥连接在一起,构成 1 条完整的树枝链,进而成为滤网过滤的一部分,参与到颗粒物的捕集. 这种特殊结构的产生可能是由于气流曳力的影响,使粉尘树枝在摆动的过程中与其临近的树枝发生粘连,在范德华力的作用下形成较牢固的架桥结构.

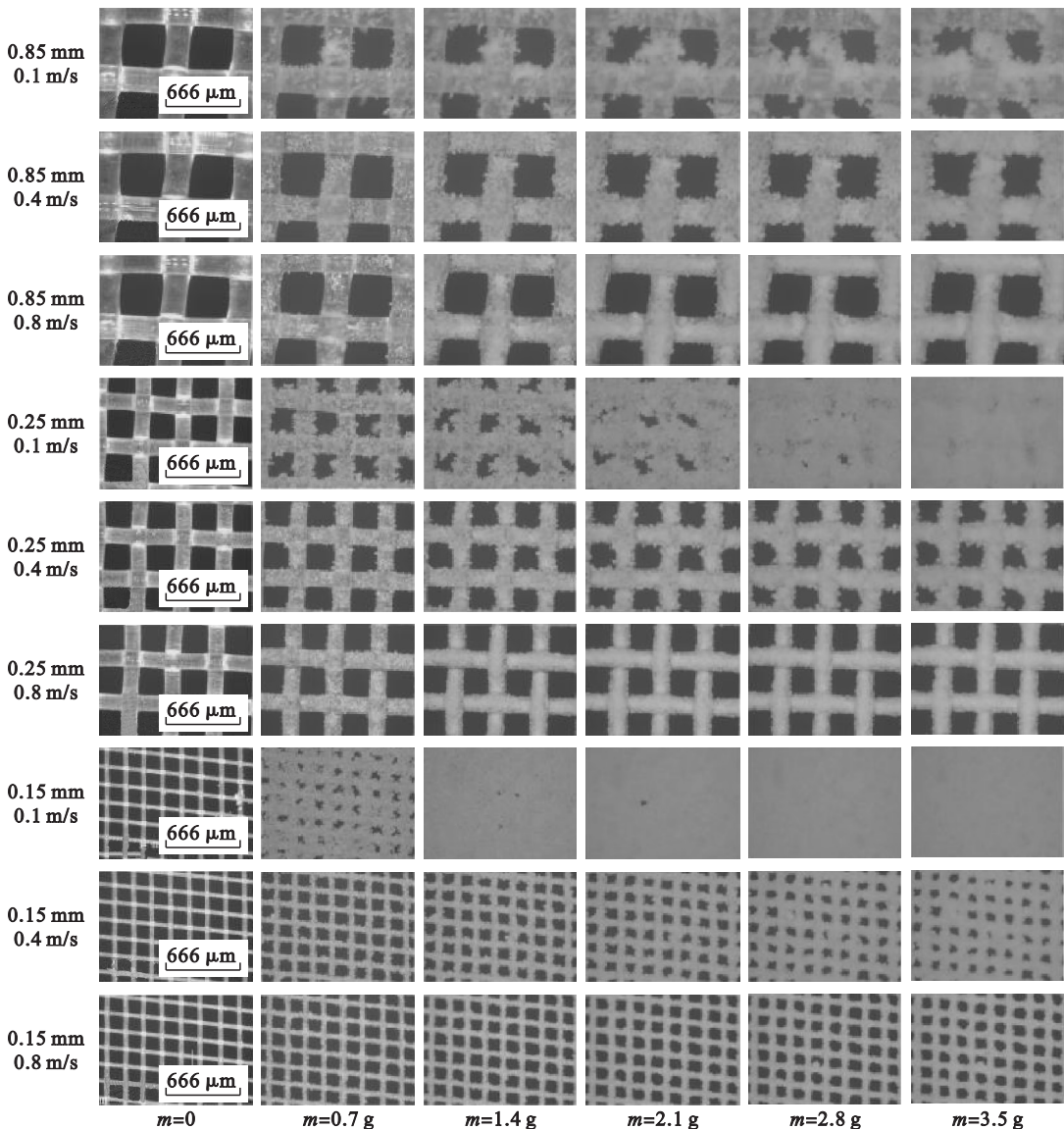


图 5 滤网捕集细颗粒的过程
Fig. 5 Process of filter screen to capture fine particles

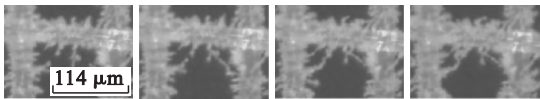


图 6 粉尘树枝架桥过程
Fig. 6 Process of dendrite bridging

2.1 过滤风速对粉尘沉积的实验结果分析

图 7 为相同孔径的滤网在不同过滤风速下捕集细颗粒物时网孔堵塞情况. 由图可知, 3 种孔径滤网的未堵塞孔面积与孔总面积之比都随着滤网上游发生总量的增加而逐渐减小, 且在相同孔径下随着过滤风速的增大, 滤网的未堵塞孔面积与孔总面积之比逐渐减小. 在 0.4, 0.8 m/s 风速下这个比值下降速率较低, 而在 0.1 m/s 风速下这个比值下降速率很高, 最终会出现一个稳定状态, 随着滤网孔径的减小, 这个稳定状态出现地越早.

这是由于随着滤网上游发生总量增加, 被滤网所捕集到的粉尘数量也在不断增加, 无论是多少孔径的滤网, 网孔都会或多或少被粉尘所填充, 网孔逐渐向内缩小渐渐被粉尘堵塞, 从而未堵塞孔面积逐渐减小, 在孔总面积一定的情况下, 这个比值就会逐渐降低. 在高风速下粉尘所受的风流曳力较大, 大粒径粉尘由于惯性和重力沉降机理更倾向于在滤网纤维上生成致密的粉尘层, 而小粒径粉尘则较容易从网孔透过, 这样网孔就很难发生堵塞, 这个比值就会较大; 而在低风速下纤维上会更容易形成粉尘树枝结构, 这种结构可以看作是一种“替代纤维”, 在一定程度上提高了滤网的填充密度, 有利于捕集从大网孔透过的粉尘, 从而更易堵塞网孔, 这个比值就会下降得很快.

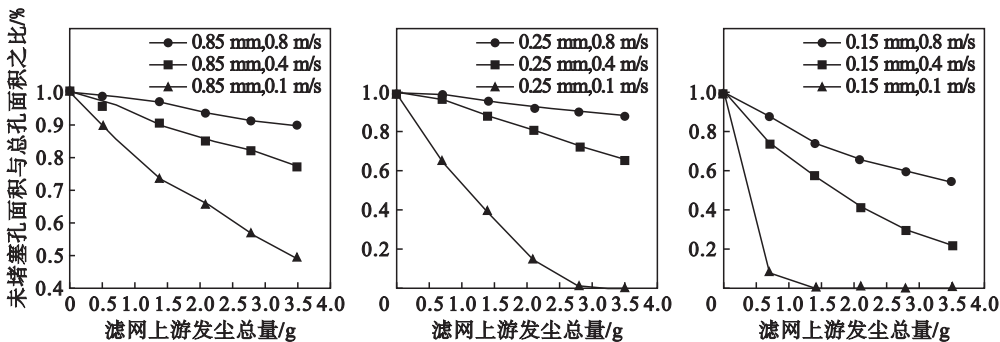


图 7 过滤风速对滤网网孔堵塞的影响
Fig. 7 Effect of filtering velocity on filter screen mesh blockage

2.2 滤网孔径对粉尘沉积的实验结果分析

图 8 为不同孔径的滤网在相同过滤风速下捕集细颗粒时网孔堵塞情况. 由图可知,在相同过滤风速下随着滤网孔径的减小,未堵塞孔面积与孔总面积之比逐渐降低,且在小孔径滤网下这个比值下降速率明显高于大孔径滤网. 在较低过滤风速下,孔径 0.85 mm 与 0.25 mm 滤网的未堵塞孔面积与孔总面积之比随着滤网上游发尘总量的增加而差距明显,而较高风速下则差距逐渐减小,甚至变化趋于一致. 这是由于小孔径滤网的孔总面积大,网孔数量多,每个网孔的面积小,在捕集颗粒物时更易堵塞. 对于较大的粉尘絮团会直接被小网孔拦截,而对于大面积的网孔只能依靠纤维

来捕集,且在低风速下滤网表面更易形成粉尘树枝结构,这又间接增强了其捕集颗粒物的能力,加速了网孔的堵塞进程,使这个比值很快达到稳定状态. 由于孔径 0.25 mm 滤网的纤维直径要明显小于 0.85 mm,其在低风速下生成的少量树枝结构会加剧网孔的堵塞,且这个程度是随着滤网上游发尘总量的增加而越来越明显,而在较高风速下两者捕集粉尘主要靠纤维本身和压实的粉尘层. 这种方式捕尘能力十分有限,粉尘会不断在网孔边缘堆积压实,而不会填补网孔内部,造成网孔难以堵塞,导致这个比值随滤网上游发尘总量的增加而变化不明显.

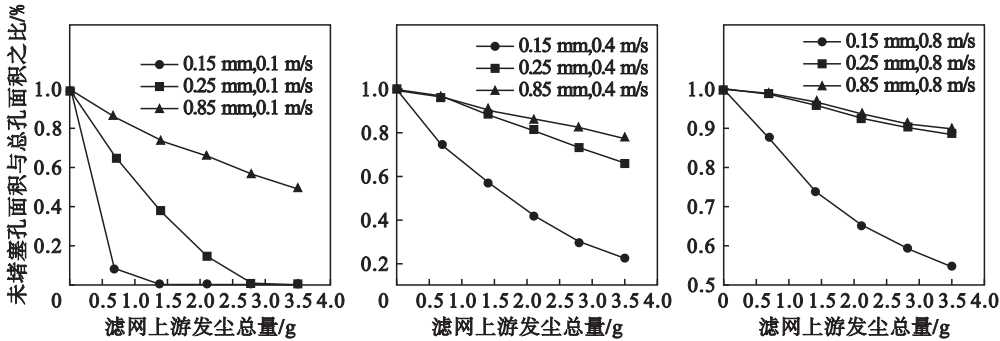


图 8 孔径对滤网网孔堵塞的影响
Fig. 8 Effect of pore size on filter screen mesh blockage

3 结 论

- 1) 滤网捕集粉尘大致可分为三个过程:①纤维捕集;②粉尘和纤维联合捕集;③粉尘捕集. 颗粒会被纤维捕集而沉积于纤维表面形成滤饼,其在低风速下比较蓬松,高风速下比较致密.
- 2) 0.1 m/s 风速下可以观察到明显的树枝结构,而在 0.4 m/s 和 0.8 m/s 风速下很少或几乎没有,且随着纤维直径的不断减小,树枝结构越明显,其生长过程中树枝会发生断裂或绕转,粉尘层

- 会局部的滑移,粉尘树枝会发生架桥现象以提高自身稳定性.
 - 3) 粉尘在滤网上沉积是从边缘向网孔中心进行,网孔大面积堵塞后部分网孔会发生破裂.
 - 4) 在相同孔径下随着过滤风速的减小,三种孔径滤网的未堵塞孔面积与孔总面积之比逐渐降低,且最终会出现一个稳定状态.
 - 5) 在相同过滤风速下随着滤网孔径的减小,未堵塞孔面积与孔总面积之比逐渐降低,且在小孔径滤网下这个比值下降速率明显高于大孔径滤网.
- (下转第 446 页)