

空气过滤

C. N. 戴维斯 著

原子能出版社

86.652
822

空 气 过 滤

G. N. 戴维斯 著

黄 日 广 译

陈 家 镛 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书以纤维型过滤器为主要对象，系统地概括和讨论了有关空气过滤的理论问题。书中还引用了大量实验资料，内容较新也较精炼。

全书共分十一章，内容包括：纤维过滤器的历史，早期过滤理论，现代过滤理论，静电力的影响，过滤器的阻力、阻塞现象，滤膜，旋转撞击过滤器。

本书可供从事空气净化，尤其是“超净”方面工作的科研及技术人员参考。

空 气 过 滤

C. N. 戴维斯 著

黄 日 广 译

陈 家 镛 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $6\frac{7}{8}$ · 字数 151 千字

1979 年 11 月北京第一版 · 1979 年 11 月北京第一次印刷

印数 001—10500 · 定价：0.95 元

统一书号：15175·161

符 号 表

a	气溶胶粒子半径
b	哈佩尔和库韦巴拉气流单元边界圆半径与滤膜中孔边界圆半径
c	滤料的填充密度 = 纤维的体积分数 = 纤维的总体积/滤料的体积
$\bar{c}$	气体分子的平均速度
d_s	粒子的停滞距离
e	单位电荷
g	重力加速度
h	滤料厚度
h_E	通过过滤层细孔的流线长度
i	过滤器内相同的过滤介质层的数目
k	玻尔兹曼常数
l	与气流横交的圆柱长度; 滤料纤维长度
m	粒子质量
m_{hg}	纤维过滤器内滤料细孔的几何平均水力学半径
n_0	进入过滤器的气溶胶浓度或在离开纤维一定距离处的气溶胶浓度
n	离开过滤器的气溶胶浓度, 或一个粒子所带的单位电荷数目
p	气体压力
q	$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}$
r	矢径
s	在平行纤维片内纤维中心之间距离等于纤维直径的倍数
t	时间
u_r, u_θ	微粒速度在某处的径向、切向分量
v	过滤器内平均空气速度
v_g	粒子由于重力的下落速度

- v_r, v_θ 气流速度在某处的径向、切向分量
- w 滤料重量
- x 平行圆柱间的中心距
- y 流线在纤维上游处的纵坐标
- A 气流通过的过滤面积
- A_p 滤膜微孔的平均面积
- C 孤立圆柱单位长度上的电荷
- E 过滤器内单根纤维的过滤效率或滤膜内单个微孔的过滤效率
- E' 孤立纤维的过滤效率
- 给 E 和 E' 加上下标以后表示由某种过滤机制所引起的效率：
 E_R 截留； E_{RI} 截留加粒子惯性； E_I 粒子惯性； E_D 扩散； E_{DR} 扩散加截留； E_G^+ 气流向上时的重力沉淀； E_G^- 气流向下时的重力沉淀； E'_c 粒子带电； E'_C 圆柱带电； E'_{Cc} 粒子和圆柱都带电； E'_F 圆柱在静电场中，仅有感应电荷； E'_{Fc} 、 E'_{FC} 、 E'_{FCc} 圆柱在静电场中，且粒子带电 (c) 或圆柱带电 (C)，或二者都带电 (Cc)； E'_{FD} 圆柱在静电场中，且有粒子扩散。
- F 坎宁安滑流因子
- I 电场强度
- I_0 电场强度，用伏/厘米表示
- K 镜象力参数
- L 在单位滤料体积内全部纤维的总长度
- M 单位纤维长度的质量
- N 在单位滤料体积内沉淀的粒子数；在单位面积内所划的线的条数或纤维根数
- N_p 在滤膜的单位面积内的微孔数；纤维型滤料单位面积内多边形数目或微孔数目
- N_A 在单位面积的滤料内沉淀的粒子数
- P 过滤器的百分透过率
- Q 通过过滤器的流速
- R 纤维半径；滤膜内毛细管半径

R_p	纤维过滤器内有效孔半径
S	颗粒床中颗粒的总表面积；或过滤器中纤维的总表面积
T	绝对温度
V	过滤器入口处的气流表观速度 $= Q/A$
W	过滤器的阻力 $= \Delta p/Q$
X	单位圆柱长度上的阻滞力
X'	单位孤立圆柱上的阻滞力
α	兰米尔数字因子；滤膜参数
β	气溶胶粒子的迁移率；滤膜参数
γ	过滤指数；无量纲常数
Δ_p	过滤器二端的压力降
∇	气溶胶粒子的扩散系数
δ	扩散层厚度
ϵ	圆柱的介电常数；实际过滤器的不均匀因子
ϵ	粒子的介电常数
ζ	流体在固体表面上的滑流系数
ζ'	ζ/R
η	气体粘度
θ	极坐标的极角
κ	Kozeny 常数
λ	气体分子的平均自由程
ν	气体的动力学粘度 $= \eta/\sigma$ ，或气溶胶浓度
Π	二平行圆柱间的电位差
ρ_f	纤维密度
ρ_F	滤料密度——纤维质量/滤料体积
ρ	粒子密度
σ	气体密度
ψ	气流函数

引 言

“空气过滤”一词的含义，是指空气中的污染粒子接近完全被去除。它比“空气净化”又进了一步，空气净化适用于许多工业过程中对污染空气的处理要求不太严格的场合。用旋风除尘器、洗涤器、沉降槽、油网、装填粒状物或别种形状材料(如拉希环)的过滤器及静电除尘器，可满足“空气净化”的要求。许多空气净化装置太庞大而对直径小于10微米左右的粒子又显得无效。通过巧妙的设计，特别是先把粒子加湿，然后经粒子惯性分离器撞击分离，或者充分利用旋风除尘器，即用一系列小直径管子组成的旋风除尘器，对除去1微米以上的粒子可能有好的效率。若利用小型静电除尘器，还可达到更高的除尘效率。

当需要从相当大流量的空气中以95%以上的效率除去直径0.1—1微米的粒子时，目前还没有更好的方法可以代替纤维过滤。对小流量并且阻力大小无关紧要的场合，可以使用滤膜，它阻挡粒子的效率很高。滤膜的过滤机制在某些方面与纤维过滤器相似，后者是由固体圆柱构成，空气从圆柱周围通过；而滤膜是由固体物质包围的圆柱形微孔构成的。已在应用的100%开孔聚氨酯或聚乙烯泡沫多孔塑料过滤器尤其适用于高流速的场合，多孔材料的微孔半径最小约为50微米，其效率比最好的纤维过滤器要低。

过滤器用在两个方面：一是纯化含有粒状物的污染空气；二是把空气中的粒子作为样品取下来。第一种情况下要用的是空气，第二种情况下要用的是粒子。“纯化”可处理大量空气，用于工业过程的防护或家畜保护，也可处理小量空

气，如用于防毒面具配代者的个人防护。在这二种情况下均使用纤维过滤器。过滤器用于取样时，必须能够对沉积物进行称重，并能够将沉积物从过滤层上分离出来。天然纤维因吸收空气中的水气而给称重带来麻烦，并且易和沉积物发生化学反应，常使沉积物固定在纤维上而不能分离。最初利用可溶解的过滤器来解决气溶胶取样问题；用糖、水杨酸或萘作这种过滤器，适用于收集小样品。细玻璃纤维和塑料合成纤维出现以后，使得定量取样准确得多了。滤膜对各种粒度大小的气溶胶粒子都有很高的阻留效率，这对取样是很有好处的。滤膜可溶解并可作成透明的，这就无需处理粒子沉积物就能在显微镜下观察。

目 录

第一章 纤维过滤器的历史	1
第二章 早期的过滤理论	6
一 研究方法	6
二 纤维型滤料的单根纤维表示法	7
三 机械过滤的早期理论	11
四 兰米尔理论	22
五 粒子惯性	28
六 孤立纤维理论	32
第三章 过滤器的阻力	34
一 粘性流和层状惯性流	34
二 气流通过纤维时的空气动力学滑流	36
三 因次分析	39
四 阻力的理论计算	42
五 理论与实验的对比	49
六 低压下的过滤器阻力	50
第四章 现代的过滤理论	57
一 惯性沉淀的正确性和最大穿透力粒子的存在	57
二 库韦巴拉流场	63
三 截留	66
四 有惯性粒子的截留效应	70
五 布朗运动和扩散	81
六 过滤器总的机械过滤效率	90
七 重力的影响	94
八 温度的影响	96

九 压力的影响	98
第五章 过滤器中的静电力	100
一 静电力的大小与利用方法	100
二 粒子上的电荷	101
三 粒子电荷对非带电过滤器过滤效率的影响	103
四 电场中的孤立圆柱理论	111
1 带电的粒子	112
2 未带电粒子	114
3 电场中孤立纤维上的扩散沉淀	116
4 强电场力	122
五 在电场中的过滤器实验, 双向过滤器	126
六 纤维带电的过滤器	131
第六章 滤膜	136
一 滤膜类型	136
二 滤膜过滤机制	137
第七章 旋转撞击过滤器	144
第八章 微孔理论	147
一 微孔分布和气流通道的	147
二 压力降和孔隙率	148
三 过滤器的透过率和孔隙率	150
四 微孔结构的几何学理论	151
五 由几何学理论计算压力降	153
六 由一系列微孔组合成的过滤器的过滤理论	154
第九章 过滤器的阻塞现象	156
一 过滤器内沉积物的形成	156
二 阻力升高	159
三 过滤效率的升高	161
第十章 粒子在过滤表面上的附着	164
一 粒子在纤维上的附着实验	164

二 在过滤器内粒子粘附在纤维上的意义	167
三 对过滤器的实验工作	171
第十一章 总结	175
参考文献	181
内容索引	193
作者索引	202

第一章 纤维过滤器的历史

空气过滤器的发展已有近二千年的历史了。在好几个世纪里，工人们用几层布捂住鼻子和嘴，来防止灰尘吸入。木炭，作为一种气体吸附剂于 1854 年开始在一个医院里使用，而利用木炭来净化水已有好几个世纪了。1871 年，奥利弗 (Oliver) 用麻丝制作了过滤器；大约在同一时间里玻璃棉也用在过滤器上。1905 年，埃斯马奇 (Esmarch) 进行了过滤面具对于雾状悬浮体中的细菌的过滤效果的实验。

过滤面具是在十九世纪专为消防人员发明的。1868 年，著名物理学家丁德尔 (Tyndall) 和英国首都消防队队长合作，研制出一种用于过滤含粒状物空气的过滤面具，它有三层填充密实的棉毛，每二层之间由石灰、木炭和浸泡了甘油的羊毛层隔开。

1915 年德国首先大规模使用化学武器，这大大刺激了防毒面具的研制工作。在那次战争中首次使用了氯气和光气，对付这些毒气的办法是用一个装有活性炭的容器把它们吸收下来，该容器挂在使用者胸前，用波纹管把容器和面罩连接起来，供使用者配戴。

这时还研究了透过这种气体过滤器的办法。根据丁德尔的研究工作知道：空气中微细粒子在通过粗的粒状木炭时不能像气体那样被过滤掉。这就促使德国人企图用砷烟雾气溶胶来穿透木炭过滤器。他们用猛烈爆炸的方法来弥散有机砷：有机砷放在玻璃瓶内，瓶的外面是烈性炸药。这种方法弥散

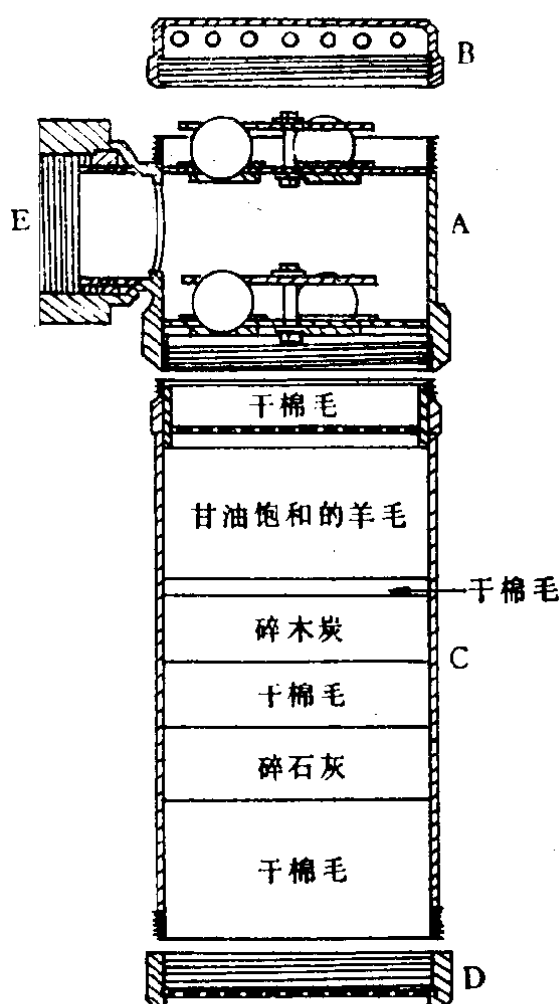


图 1 丁德尔为消防员制作的过滤器

效果仍很差，产生的粒子非常少且太大。这种“透过方法”的研究促成了粒子过滤器的出现，这种过滤器装在军用气体防毒面具的前面。这是 1918 年第一次世界大战末的情况。此后又继续研究用热方法更有效地产生砷烟雾：发展了一种使用焰火混合物的热发生器，它可以产生出含有大量有害物粒子的气溶胶，其粒子直径在 0.2—0.5 微米之间。这种大小的粒子能很有效地透过纤维过滤器，吸入人体后可引起严重的呼吸道病症。在两次世界大战

之间的一段时间里，改进粒子过滤器的研制工作受到很大的压力。当时，试验了各种纤维材料，但大多数国家对过滤器的基本原理并无许多理解。科学地研究过滤问题的最初尝试还是在德国进行的，德国人奥尔布雷克特 (Albrecht)^[3] 和考夫曼 (Kaufmann)^[4] 利用纤维垫开始探讨气溶胶过滤机制的理论，有关他们的工作将在研究过滤理论的第二章中予以讨论。

1939 年，即第二次世界大战爆发时，砷烟雾的粒子弥散和军用防毒面具中粒子过滤器的过滤作用都更加有效了。那时人们担心敌方用热发生器进行袭击，如果敌方把它从飞

机上向城市里投下，就会在城市里引起恐慌。这便促使一种廉价的防毒面具的出现，这种面具当时被大量地生产，并发给广大居民。此种面具附有一个用羊毛和石棉纤维混合制作的粒子过滤器，它装在活性炭气体过滤器的前面。

两次战争之间，曾对作成软垫、毡或纸型式的各种纤维材料进行了试验。当时出现了许多关于用各种物质浸渍纤维的专利，这表现出当时人们对过滤作用模型完全缺乏了解。由实验发现，如果用织品梳刷机把石棉纤维的天然“团”梳开，则石棉纤维有很高的过滤效率。单用石棉纤维不能作成高效率的过滤器，但假如在羊毛内混入 20% 的石棉，便可得到极好的过滤垫，而且几乎它的全部过滤作用是由石棉纤维承担的。这样，不久就制成了加入石棉纤维的过滤纸，用较软和厚一点的这种过滤纸制成了非常有效的过滤器。纸过滤器有一个很大的优点，即在一个给定体积的容器内，装上打褶的纸可大大增加过滤面积，这样就有可能同时获得高过滤效率和低气流阻力。

用较少量的石棉纤维可获得很高的过滤效率，其原因是当石棉的天然“团”被拆开时，纤维是很细的。石棉结晶可被无数次地从纵向劈开，而含石棉的过滤材料的效率与石棉被劈开的程度成正比。

1930 年出现了汉森 (Hansen) 树脂过滤器。在纤维型空气过滤器领域内汉森树脂过滤器的使用后来占据了优势地位，其部分原因是本身具有优越之处，另外也因为当时已经知道了吸入石棉纤维的危害性。碎石棉可从过滤器脱离出来而被过滤面具的佩戴者吸入，这种危险性阻碍了石棉在空气过滤中的应用，因为人们已确信，非常少量的石棉纤维就可引起肺癌。那时，虽然含石棉的面具尚未在佩戴者中引起石

棉肺和肺癌，但生产这种面具的作业与其它石棉作业一样，已经确定无疑地在操作工人中引起了上述病症。

汉森过滤器的作用和电的作用有关。电场是由1微米大小的树脂粒子产生的，树脂粒子是撒在作成疏松垫子的稍粗一点的纤维(如羊毛)表面上的。如果在这种垫内不撒树脂，那么它就是一个效率很差的低阻力过滤器。树脂对过滤器的阻力无明显影响，但它使过滤器变为无论是对带电或不带电的待过滤粒子都有很高的效率。如果使这种撒有树脂的垫内的空气强电离，引起树脂粒子放电，或因垫与含有机溶剂的浓雾接触，树脂粒子被溶解而破坏了垫的过滤性能，都会使这种过滤垫失去高的过滤效率。但在通常的应用中，这类情况未必发生。此种过滤器的发展工作在几个国家里继续进行。1933年，丹麦、荷兰、法国和意大利把这种过滤器用在军用防毒面具上，而英国在1943年首次应用了这种过滤器，为的是改善居民用防毒面具的过滤效率。自从上次战争后，树脂过滤器已在工农业中得到广泛的应用。

从空气过滤器的最近发展来看，防止过滤器的边缘漏气和改善装配工作，比它自身的固有过滤效率更为重要，因为后者在过滤器性能方面不再是一个限制因素。个人用的防毒面具的面罩边缘存在漏气现象，特别是在佩戴者活动时更明显，这样，便促进了软垫型面罩和有机动设备的防毒面具的研制工作。有机动设备的防毒面具在工作时，由泵把空气通过过滤器注入面罩，在呼吸循环的各个阶段，面罩内均维持正压，这就防止了面罩的漏气现象。

对各种过滤器的需要日益增加，这些过滤器不仅用于对人的防护，也用在机械、微电子学、生物学设备的制造和应用方面；核子工业需要各种高效率的过滤器包括在把气体废

物排放到大气中之前，从气流中除去放射性粒子的庞大的过滤装置。

有关 1948 年以前纤维过滤器的发展历史，戴维斯^[2]已作过详细叙述。

第二章 早期的过滤理论

一 研究方法

纤维过滤器的滤料是由大量的纤维构成。纤维的取向通常并不是任意的，较多的取向是纤维与气流方向横交，这取决于过滤纸的制造方法或纤维垫的纤维在梳刷机上的梳刷情况。但在和气流垂直的薄层内纤维取向可以是任意的。供研究用的手工制作的滤料，可由一连串平行薄层构成。每一薄层由单层平行纤维组成，而后面的薄层的安排一般有二种方法：一是使整个过滤器内的全部纤维都互相平行，二是相继旋转一定角度，形成所谓扇形模型。

制造滤料的优良技术在于保证纤维尽可能均匀地分开，并使纤维受到上层纤维遮蔽的程度最小，一种优良的实际滤料应接近“扇形模型”。

滤料的数学模型可用不同方法构成。一种方法是把过滤器看作是一系列平行的毛细管，毛细管尺寸可从实际滤料的空气阻力计算求得；另一种方法是把气流阻力看作是由流场中存在一个某长度的圆柱障碍物引起，这是单根纤维的表示法；第三种方法是把滤料看作一个微孔系统，然后把微孔看作圆形来进行计算，此圆的大小与实际过滤器内的连续过滤层中的微孔相当。还要考虑到微孔从一层到另一层的路径弯曲度。

滤膜可用管模型来表示，而纤维滤料用单根纤维和微孔