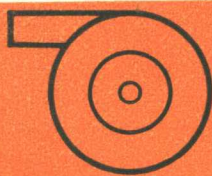
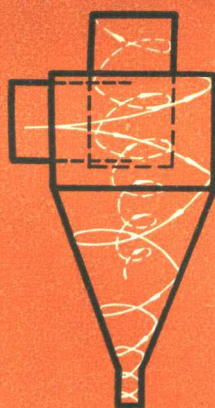


水泥生产中的 气体运动和除尘



中国 建筑 工业 出版 社

本书主要談水泥工厂除尘問題。书中介紹了含尘气体在設備中流动的基本概念和除尘措施；探討了水泥厂窑、磨主机及附屬設備中含尘气体的运动規律；叙述了水泥厂收尘裝置的操作和改进方法；还介紹了含尘气体管路的布置和通风机的操作。此外，还推荐了一些气体动力学的試驗方法和測試工具。

本书可供水泥厂有关技术人員閱讀参考，也可供硅酸盐专业的科研、設計人員和大專院校师生参考。

本书第一、二、三章和附录由王德潤翻譯，第四、五、六章由戚昌民翻譯。

此次重印經戚昌民校閱。

В.И.Сатарин, С.Б.Перля
ДВИЖЕНИЕ И ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ГАЗОВ В
ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
Госстройиздат Москва 1960

* * *

水泥生产中的气体运动和除尘

王德潤 戚昌民 譯

(根据原中国工业出版社紙型重印)

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西外向东路19号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售
北京印刷六厂印刷

*

开本: 850×1168毫米1/32毫米 印张: 9 5/8插頁2 字数: 229千字

1965年6月第一版

1973年5月新一版

1973年5月第一次印刷

印数: 1-11,210册

定价: 1.12元

統一书号: 15040·3048

目 录

第一章 收尘	1
§1 收尘器	1
§2 降尘室	3
§3 旋风收尘器	7
§4 湿式收尘器	20
§5 袋式收尘器	23
§6 电收尘器	30
§7 各种收尘设备效果的比较评价	52
第二章 熟料煅烧窑和迴轉干燥机中气体的运动及除尘	59
§1 湿法生产操作的迴轉窑	59
§2 湿法生产时的废气除尘	88
§3 带料浆蒸发器的湿法操作迴轉窑	102
§4 干法生产的迴轉窑	106
§5 自动化立窑	131
§6 迴轉干燥机中气体的运动	134
第三章 磨細设备中气体的运动和除尘	143
§1 开流式操作磨机	143
§2 圈流式操作磨机	162
第四章 輔助设备的除尘	184
§1 不同物料的揚尘程度	184
§2 采用局部通风除尘的总則	186
§3 料仓的除尘	190
§4 物料傾卸处的除尘	191
§5 斗式提升机的除尘	199
§6 运输机的除尘	201
§7 錘碎机及圓錐破碎机的除尘	203
§8 振动篩的除尘	204
第五章 通风机及排风机的工作	206

IV

§1 概述及工作原理	206
§2 通风机的特性曲线	210
§3 通风机在管路中的工作	219
§4 通风机的稳定与不稳定工作	222
§5 驱动通风机所需的功率	223
§6 气体含尘量对通风机特性曲线的影响	226
§7 通风机的并联和串联	227
§8 通风机的调节	230
§9 通风机的改造	232
第六章 含尘空气的管道(空气管道)	234
§1 管壁厚度	234
§2 管道的倾角及其中含尘气体的运动速度	237
§3 管道的清理和悬挂	240
§4 通风系统中允许的不严密度	241
§5 设备的维护	242
附录 I 确定流体动力系统和收尘器参数的简明规程	247
§1 气体重度	247
§2 气体在管道中的运动	251
§3 局部阻力	256
§4 含尘气体在管道中的运动	267
§5 测定气体的压力和流速的仪器	267
§6 气体流速、流量和压力的测定	274
§7 系统中漏入空气量的测定	277
§8 气体含尘量的测定	277
§9 气体温度的测量	283
附录 II 喷出和吸入流股	283
附录 III 水泥厂最常使用的通风机和排风机的性能	287
附录 IV 通风机转子的平衡	299
参考文献	302

第一章 收 尘

本章研究最常用的《干法》收尘器——旋风收尘器、袋式收尘器和电收尘器，以及《湿法》收尘器——洗气塔的操作。

§1 收 尘 器

收尘器的操作，有以下的指标：

a) **气体的净化程度** 在设备中收集的粉尘重量 G_3 和在未经净化时同样数量的气体中所含的粉尘量 G_1 之比称为净化程度 Θ (即收尘器的效率)。

可以下式来求得 Θ ：

$$\Theta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} = \frac{G_3}{G_1} \quad (1-1) \bullet$$

因为 G_1 和 G_2 ——由收尘器所带出的粉尘量——不可能直接测定，所以净化程度不得不根据气体的生成量及其在收尘器前后的含尘量来求得。气体含尘量的测定方法在附录 I §8 中有详细的说明。

b) **分级效果** 气体的净化程度也可用所谓分级效果来说明，即由收集下来的一定大小的颗粒量和气体在入收尘器以前所含的同样大小的颗粒量之比。

在后一情况下，要先求出每一级颗粒入收尘器的重量 G_1 和出收尘器的重量 G_2 ，然后代入公式 (1-1)。

b) **未被收集的物料量** 环境的含尘量决定于被携出的粉尘量。

因此，不仅要知道气体的净化程度 Θ ，而且还要知道用系数 ε 表示的未被收集的粉尘量。

● 阿拉伯字表示公式的序号；罗马字表示章数——原注。

$$\varepsilon = 1 - \vartheta \quad (2-1)$$

如果我們有几个收尘器，其中有一个净化程度 $\vartheta' = 0.9$ ，另一个 $\vartheta'' = 0.95$ ，第三个 $\vartheta''' = 0.99$ ，那么这些收尘器的 ϑ 值可以認為是接近的。但是如果考虑其未被收集顆粒系数，那么第一个 $\varepsilon_1 = 0.1$ ，第二个 $\varepsilon_2 = 0.05$ ，而第三个收尘器的 $\varepsilon_3 = 0.01$ ，因而通过了第一个收尘器未收下的粉尘量比第二个收尘器大一倍，比第三个收尘器大 9 倍。

因此，在确定粉尘顆粒組成时应列入計算的，不是气体净化程度 ϑ ，而是放入大气的粉尘量。

收尘器 根据結構特征和粉尘的沉降原理，可以分为很多类型。

第一类收尘器是利用重力——悬浮在气体中的顆粒在重力作用下落到沉降室中；第二类是利用被分散顆粒的惰性，即在气流方向改变时仍保持其直綫方向运动；第三类是利用扩散力；第四类是气体通过多孔材料被过滤，而粉尘即沉积在过滤元件的壁上。

为了净化气体，还可利用电场作用下所产生的力。

相应的收尘器的分类列于表 1 中。

这些设备的試驗結果、允許的負荷和含尘量等等在后面的表 10 中列出。

收尘器的分类

表 1

A. 基于重力、慣性力和扩散力作用的設備

干法（不用液体）	湿法（使用液体）
1. 降尘室； 2. 慣性收尘器； a) 旋风收尘器； б) 旋轉收尘器； B) 百叶窗式收尘器； r) 捕尘器、捕集器等等	1. 气体与沿其表面 分布的液体相接触的收尘设备； 1) 填料塔式收尘器； 2) 形成液体薄膜的慣性收尘器； a) 旋风收尘器； б) 百叶窗式收尘器； 3) 具有移动的潮湿表面(例如篩子)和池底洗尘的收尘器 1. 气体通过液体层的收尘器； 1) 泡盖式； 2) 网状；

B. 基于过滤作用的设备

过滤器

- 1) 由散粒状物料制成 (块状、砂状的);
- 2) 由纤维状材料制成,
 - a) 装填式 (棉花、金属丝等等);
 - b) 成层的 (纸板的、织物的);
- 3) 由多孔材料制成的 (陶瓷或多孔金属)。

B. 电力净化气体的设备

管式电除尘器;

板式电除尘器 (具有垂直或水平的气体通道)。

附注: 所有这些设备均可在悬浮颗粒预先用声波的、超声波的、静电的或紊流的凝聚剂, 使其变大以后再进行工作, 但也可在不用凝聚剂时工作。

§ 2 降 尘 室

为了使含尘气体能用极小的速度流动, 所以降尘室的截面积就应很大。此时最大的颗粒就沉在降尘室的底部 (图 1), 并周期地或连续不断地被卸出。

在计算最有效地收集一定级配颗粒的降尘室时, 应使离降尘室地面 H 处的尘粒, 在其沿室长 l 所经历的时间内落到降尘室底部为依据。

图 2 表示颗粒飞翔速度 v_y 与其尺寸和比重的关系。

颗粒在静止的气体中由于重力的作用而下沉的速度称为飞翔速度, 常常也称之为颗粒的沉降速度。

如果飞翔速度为 v_y 米/秒, 而气流沿降尘室的流动速度为 v_x 米/秒, 则颗粒在降尘室中停留的时间

$$t'' = \frac{H}{v_y} \leq \frac{l}{v_x} \quad (3-I)$$

当每分钟被净化气体的体积为 q 米³, 在宽度为 b 米的降尘室中停留时间

$$t'' = \frac{lHb}{q} \text{ 秒} \quad (4-I)$$

使二者相等起来, 則

$$\frac{lHb}{q} = \frac{H}{v_q}$$

故得 $q = lbv_q$ 。可知降尘室每秒生产能力正比于降尘室的截面积和顆粒的沉降(飞翔)速度。

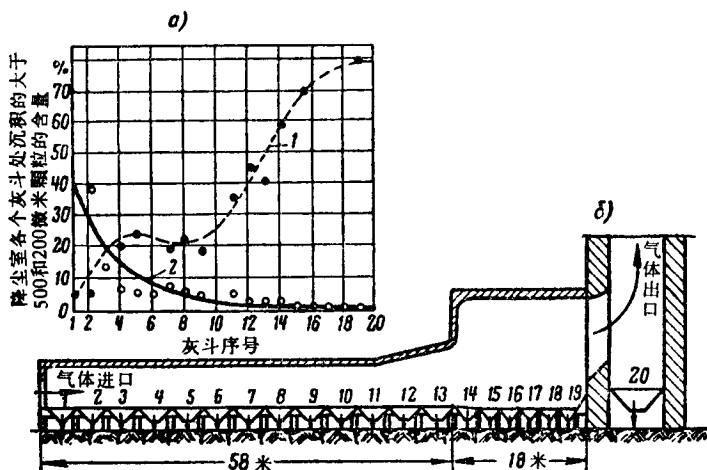


图1 降尘室各个灰斗处沉积的粉尘图 (a) 和降尘室的縱剖面图 (b)

1—小于20微米顆粒的百分含量;

2—小于500微米顆粒的百分含量

由式 (4-I) 可以看出, 除尘程度愈高气体在降尘室中停留时间就愈长, 所以要使气体净化程度高, 降尘室就应该很长。例如欲使迴轉窑出来的气体中, 大于20微米的顆粒能被收集, 则气道长度必需在500米以上, 为了要使气体运动速度每秒只有几厘米, 气道的截面积不应小于500米²。如图1所示的尺寸, 即使气道截面約为50米²也只有尺寸在0.2毫米左右的顆粒, 才能沉降

下来。装在迴轉窑后的降尘室，其长度为5~15米时，在最好的情况下也仅仅只能保证粗达150~350微米以上的颗粒能够沉降下来。

由于从迴轉窑内出来的气流速度，在降尘室中几乎要完全被抵消（降低），而由降尘室出去的气体又必须重新恢复到原来的速度，故降尘室的流体阻力系数是相当大的（ $\zeta = 1$ ）。在温度为250~300°C的气体在降尘室进口和出口（到烟道中去）的流速约为12~16米/秒时，降尘室的总阻力就达10~12公斤/米²。虽然降尘室的收尘率低（ $\eta = 0.1 \sim 0.15$ ），相对阻力又比较大，但迴轉窑还是要装降尘室，这是由于在窑的迴轉部分和固定部分之间，必须有一个过渡地区，并且在这个地区将由窑内携出的粉尘状或浆滴状的大颗粒收集下来。

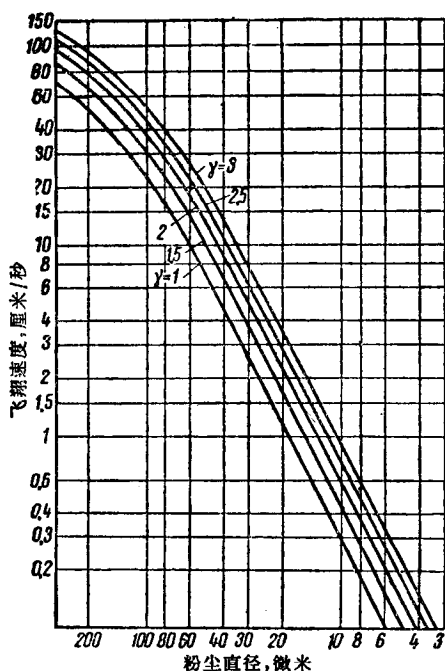


图2 容重为1~3克/厘米³粉尘的飞翔速度图

在新建工厂中，迴轉窑的降尘室尺寸很小（图3）。气体入烟囱的连通管没有了，气体出降尘室2后向排风机1流动，在这种条件下，过剩空气和烟气很少漏进或漏出。

只有用高温废气自然通风的旧式迴轉窑，降尘室的尺寸才很大，为了改进粉尘在这种降尘室中沉降，要装一些特殊的挡板使气流改变几次方向。

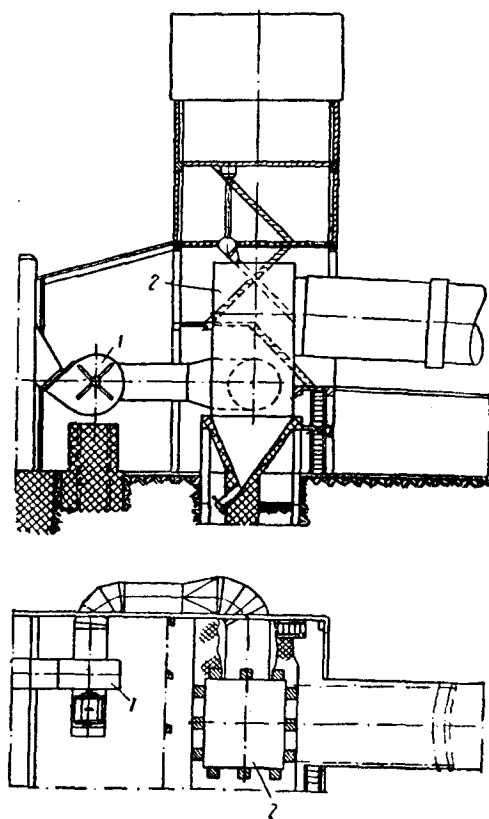


图3 由迴轉窑到排风机的过渡区流程图

§3 旋风收尘器

旋风收尘器（图4）是应用最广的收尘器。

旋风收尘器的作用原理如下：含尘气体沿切线方向进入旋风收尘器的圆柱体部分1，并在其中成螺旋线运动，其离心力为：

$$P = \frac{mu^2}{r} \quad (5-I)$$

式中 m 表示粉粒的质量，在离心力的影响下，粉粒被向外抛出，落入边缘区中（此处的气流速度比收尘器中心的气流速度要小几百倍）并在其中沉降，然后沿旋风收尘壁落到锥体5中。

已除去粉尘的气体被抽到排出管4中去。在圆周速度 u 不变的情况下，旋风收尘器半径 r 愈小，离心力 P 就愈大，因此，应使气体尽可能在小直径的旋风收尘器中进行净化，以便能较好地捕集小颗粒的粉尘。

旋风收尘器按高度和直径比的不同，进出口的下部形式的不同而有多多种的结构型式。图5系苏联制造和使用的一些主要的旋风收尘器，其尺寸以直径表示。

图5a为气体净化科学研究所（НИИОГаз）的旋风收尘器，其主要尺寸如表2。

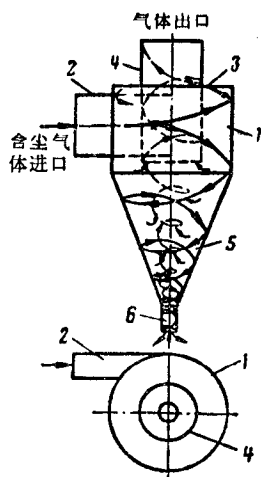


图4 气体和粉尘在旋风收尘器中的运动示意图

- | | |
|---------|---------|
| 1—柱体部分； | 2—进口管； |
| 3—上端顶盖； | 4—出口管； |
| 5—锥体； | 6—粉尘卸料处 |

气体净化科学研究所的旋风收尘器的尺寸

表 2

指 标	尺 寸 符 号	旋 风 收 尘 器 型 号			
		ЦН-15	ЦН-15y	ЦН-24	ЦН-11
旋风收尘器顶盖和进气管的倾角, 度	α	15	15	24	11
旋风收尘器内径, 毫米	D	40~800	200~800	400~1000	40~800
进口管高度, 内部尺寸	a	$0.66 D$	$0.66 D$	$1.11 D$	$0.48 D$
带法兰盘的排气管高度	h_T	$1.74 D$	$1.5 D$	$2.11 D$	$1.56 D$
旋风收尘器圆柱体高度	h_{II}	$2.26 D$	$1.51 D$	$2.11 D$	$2.08 D$
旋风收尘器锥体高度	h_K	$2 D$	$1.5 D$	$1.75 D$	$2 D$
排气管外部高度	h_B	$0.3 D$	$0.3 D$	$0.4 D$	$0.3 D$
旋风收尘器总高	H	$4.56 D$	$3.31 D$	$4.25 D$	$4.38 D$
流体阻力系数	ζ	105	110	60	180

适用于所有旋风收尘器

排气管外径	d	$0.6 D$
排气管壁厚	δ	$0.2\sqrt{D}$
排灰孔内径	d_1	$0.3\sim 0.4 D$
旋风收尘器的入口管道宽度 (内部尺寸)	b	$0.2 D$
入口管道的进口处宽度	b_1	$0.26 D$
入口管长度	l	$0.6 D$
旋风收尘器的平均直径	$\frac{D+d}{2} = D_{cp}$	$0.8 D$
法兰安装高度	$h_{\Phi II}$	$0.24\sim 0.32 D$

这类旋风收尘器的净化程度较高, 因而在各企业中被广泛应用, 它们的缺点是:

a) 下部孔眼直径很小, 使出料困难;

б) 高度与直径比值较大因而很笨重, 而且要安装在较高的位置上。

气体的净化程度以及含尘气体在允许的流体阻力下单位时间内通过旋风收尘器的量, 是表现收尘器操作状况及决定其产量的主要指标。

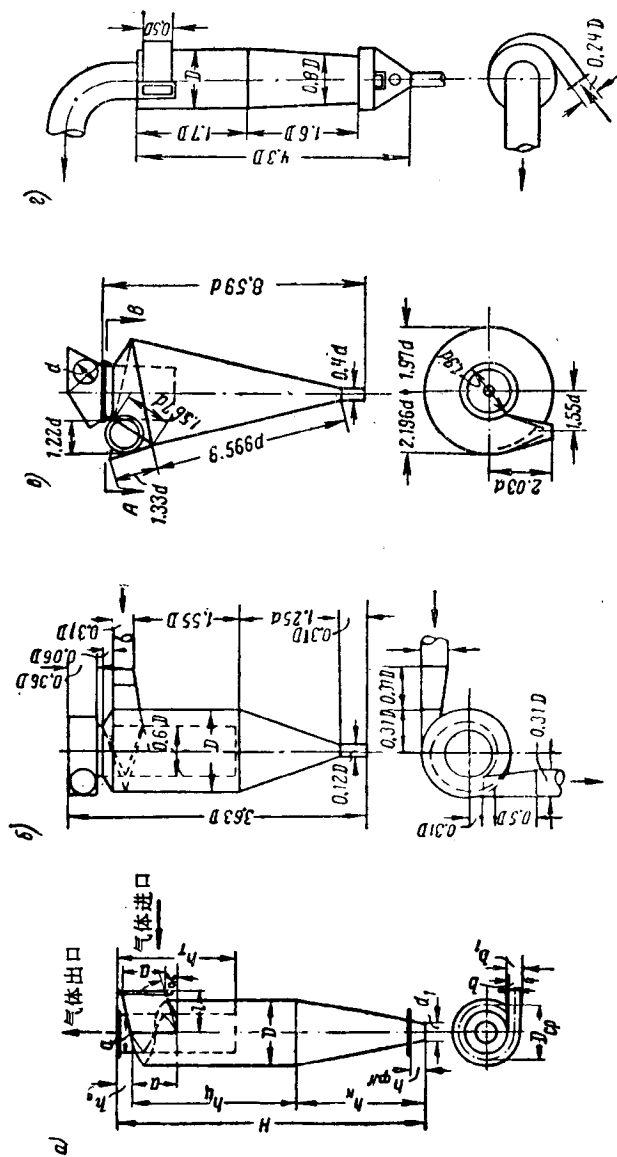


图 5 旋风收尘器及其相对尺寸图

а—НИИОгаз型; б—ЛИОТ 型; в—СИОТ 型; г—Крейзеля 型
 说明, 在 НИИОгаз、ЛИОТ 和 Крейзеля 型旋风收尘器图上的各部分尺寸, 用圆柱直径 (D) 的分数表
 示, 而在 СИОТ 型图上, 用进口管直径 (d) 的分数表示。

旋风收尘器的形状对它的净化程度是有影响的。气体沿 15° 的角度向下并以切线方向进入。将旋风收尘器的圆筒部分长度增大到 $3D$ 以上，并同时增加锥体部分的长度 ($l > 2D$) 时，在其它条件相同时，可以收集到更细的颗粒。旋风收尘器入口速度在 $12 \sim 24$ 米/秒范围内，其净化程度几乎保持不变。当速度超过 $24 \sim 30$ 米/秒，细颗粒收集得很少，而器壁的磨损显著加大。南方水泥设计院所进行的试验证明，除尘效率受很多因素的影响，尤其是净化气体和粉尘的物理状态（粉尘的湿含量、粘结性、温度等）。如像分散度很高而粘结性很小的粉尘（小于 10 微米的颗粒含量在 $30 \sim 40\%$ 以上并且湿含量为 1% ），气体在旋风收尘器内将净化得很不好。但如细颗粒量不变（都是 $5 \sim 30$ 微米），物料含 $5 \sim 10\%$ 水份，那么颗粒在通过旋风收尘器时互相粘结成比较大的颗粒，结果这些大颗粒被猛烈地打击在器壁上，而使气体净化情况改善。有这样情况，含很干燥的细粉气体在旋风收尘器中的净化程度 $\eta = 0.15$ ，同样的气体但其水份含量稍有提高，其净化程度 $\eta = 0.8 \sim 0.85$ 。但对除尘设备的操作与物料物理状态和水份含量的关系，还研究得不够。

空气经出料口漏入，对其净化程度有很大的影响。事实上大量直径为 15 微米以上的已经沉积下来的颗粒，在截面 6 中（参看图 4）气体流速为 0.5 米/秒的情况下，又会被吹到管道 4 中去。南方水泥设计院专门的研究证明：甚至旋风收尘器内漏气（经截面 6）量只有入旋风收尘器前气体流量的 3% 时，总的净化程度会从 $\eta = 0.85 \sim 0.88$ 降到 $\eta = 0.5$ 。甚至在管 6 的漏气量达总流量 8% 时，净化程度可以降到零。正因为如此，必须特别注意所有的旋风收尘器的灰斗和取样孔的密封，不致因看来似乎很少的漏气而破坏收尘器的操作。有一个厂在试验过程中证实，起先 НИИОГаз 型旋风收尘器收尘的情况很坏 ($\eta < 0.1$)，直到将焊缝和接头处小孔漏气的问题解决以后，克服了漏气，细粘土颗粒净化程度才达 $\eta = 0.88 \sim 0.89$ 。

所以在旋风收尘器在投入生产以前以及在操作过程中，必须

在正压下检查其严密性并及时消除漏气（参看第七章 § 5）。

旋风收尘器在正压下操作比在负压下好些，但是在这种情况下，通风机就得抽吸未净化的气体，这是很不理想的，因为这样将会加快其磨损。

应该看到，尤其是粘土和水泥粉其中含有 21~26 % 小于 10 微米颗粒时，只有在使用的情况很好，消除漏气等等的情况下，旋风收尘器的总除尘率才能达到 $\eta = 0.88$ 以上。

在图 6 中示出了 В. В. 庫契魯克 (Кучерук) 提供的且与我們試驗結果相符的，关于在 600 毫米直径的 НИИОГаз 型，1.4 米直径的 ЛИОТ 型旋风收尘器及 Лурги 型复式旋风收尘器中的分級净化程度。横座标表示颗粒大小，縱座标表示这一尺寸颗粒的净化程度。

在 НИИОГаз 型旋风收尘器中，3~4 微米的颗粒有 40~60 % 可被收集，5~10 微米颗粒的净化程度达 70~89 %，带有 20 微米粉尘的空气，净化程度可达 80~99 %，而更大的颗粒——50 微米则达 83~100 %。在 А. С. 謝連科 (Серенко) 和 С. Б. 佩尔利 (Перли) 所做的实验中，80~200 微米的颗粒可以完全被收集下来。

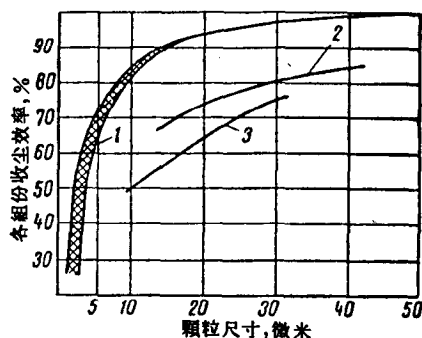


图 6 旋风收尘器工作效率

1—НИИОГаз 型旋风收尘器(在出料孔处漏气量小于 1 %)；2—Лурги 型复式旋风收尘器(在出料孔处漏气量约 1 %)；3—ЛИОТ 型旋风收尘器(在出料孔处漏气量达 4 %)

当出料孔处漏气量达 4 % 时（参看图 6 中曲线 3），不仅总的净化程度降低，分級净化系数也降低了，而且主要是恶化了小于 20~25 微米颗粒的净化情况。

粉尘浓度高时可提高净化程度，粉尘浓度由 5~10 克/米³增

到 100~300 克/米³，净化程度提高了 5~6 %。

因此在比較旋风收尘器的净化程度时，應該考虑到，高含尘量（300~500克/米³）时尽管净化效率較高（ $\eta=0.88\sim0.9$ ），然而净化程度不是改善而是下降，在此种情况下比含尘量 5~7 克/米³ 时低 5~7 %。

根据南方水泥設計院的資料，在水泥厂实际生产中，由于旋风收尘器密封被破坏以及沒有及时照管的結果，总的净化程度很少超过 $\eta=0.65$ 。

旋风收尘器的尺寸，也影响到除尘效率。

从要求得到高的净化程度出发，苏联有些专门机关（如全苏气体净化科学研究所、气体净化設計院等等）建議尽可能使用直径小的一不大于 800~1100 毫米的旋风收尘器。根据我們的数据，这对用于卫生工程排风时的气体净化是完全合适的。但是从水泥厂实际操作中証明，由于旋风收尘器及其联接管道的清扫有困难，因此当净化高含尘量的工业气体时，只是在内部装一块可以拆卸的衬板，而不希望装直径小于 1100 毫米、錐体下部的孔径小于 200 毫米的旋风收尘器。为了净化出水泥磨、窑等的气体，南方水泥設計院在自己的設計中，主要还是使用了直径大的旋风收尘器，因为净化程度降低有限，而且可以从使用方便得到补偿●。近年来旋风收尘器仅仅只用来作为气体初步净化和沉降比較大的顆粒，其除尘效率降低 3~5 % 甚至更多，也是被允許的。更細（小）的粉尘是在袋式收尘器和电收尘器中捕集的。

通过旋风收尘器的含尘空气量，决定于气体在入口管中的流速或者决定于在旋风收尘器中的平均流速。而旋风收尘器的結構特点又能影响到设备本身的流体阻力。

气体在旋风收尘器中的平均流速

● 直径 1100 毫米以上的旋风收尘器效率降低到 50~70 %，因此采用这种旋风收尘器不能認為是合理的。——原注。

$$v_c = \frac{Q}{3600 \frac{\pi D^2}{4}} \text{ 米/秒} \quad (6-I)$$

v_c 与由上而下均匀地沿着直径为 D 的旋风收尘器筒体平行流动的气体流量 Q 米³/小时相对应。

旋风收尘器的流体阻力，可以按下式求得：

$$P = \frac{\zeta \gamma v_c^2}{2g} \text{ 公斤/米}^2 \quad (7-I)$$

阻力系数 ζ 相应于旋风收尘器圆柱体部分的假想流速：

ЛИОТ $\zeta = 293$

НИИОГаз ЦН-15 $\zeta = 105$

“ ЦН-15y $\zeta = 110$

“ ЦН-24 $\zeta = 60$

“ ЦН-11 $\zeta = 180$

锥形СИОТ $\zeta = 595$

波里鳩斯 (Полизинус) $\zeta = 480$

НИИОГаз 和 ЛИОТ^① 型旋风收尘器在流体阻力 表 3
为 55~75 公斤/米² 时其直径与产量的关系

旋风收尘器型式	参 数										
НИИОГаз	旋风收尘器直径毫米	400	450	500	550	600	650	700	750	800	1100
	在流体阻力为75公斤/米 ² 时之产量，标米 ³ /小时	1690	2140	2648	3200	3810	4460	5180	5950	6760	12800
ЛИОТ	旋风收尘器直径毫米	552	762	960	1111	1226	1326	1441	1596	1761	1886
	在流体阻力为50~55公斤/米 ² 时之产量，标米 ³ /小时	1500	3000	4500	6000	7500	8500	10000	12500	15000	17500

① 由表可见 ЛИОТ 型旋风收尘器较不经济——原编者注。