

# 旋风分离器三维流场的测定

中国科学院力学研究所 柳筠年 贾复

张蝶丽 郝敬尧 王平生 徐纪华

**提要** 在  $\phi 400\text{mm}$  及  $\phi 330\text{mm}$  两个实验模型上,用五孔探针及热线风速仪较详尽地测定了旋风分离器的三维速度场以及湍流强度场。除切向速度分布验证了前人结果外,得到了径向速度非轴对称性,轴向速度分布中心处存在滞流、倒流、湍流强度在中心有单峰分布等结果,并初步考察了二次流引起的上涡环问题。

## 一、前言

旋风分离器是一种重要的气-固、液-固分离装置。它与依靠重力作为主要分离机制的沉降式分离器不同,是使含固体颗粒的气体旋转,固体颗粒受到比气体微团大得多的离心力而达到气-固分离的目的。旋风分离器具有对  $10\mu$  以上的粉体分离效率高,结构简单紧凑,操作维护简便,压力损耗不大等一系列优点,在石油化工、动力、冶金、采矿、建筑、轻工等部门以及很多其他处理粉料的过程中,已成为普遍和重要的分离装置。随着石油化工特别是其中流化技术的发展,以及环境保护问题的日益重要,人们将更深入地开展旋风分离器的研究工作。

旋风分离器虽已有近百年的工业应用历史,但在它出现的前半个世纪里,人们并没有对它的性能、工作机制、设计方法进行多少研究。本世纪30年代以后,锅炉等动力装置的烟气除尘问题推动了旋风分离器的研究逐步展开。但由于旋风分离器的工作过程是一种极复杂的三维、湍流、两相运动,理论及实验研究都十分困难;同时也由于长期以来人们对它的基本的力学过程研究不够,致使旋风分离器的设计、操作迄今仍带有十分浓厚的经验性质。

旋风分离器内气-固两相运动的研究应当包括:(1)气流运动规律;(2)气流挟带的固体颗粒的运动规律;(3)固体颗粒群在运动过程中产生的碰撞、凝聚、粘附、静电效应等特性。其中气流运动规律是整个问题的前提和重要组成部分。事实上,目前工业设计中应用的各种各样旋风器计算方法,无非是以不同的流场模式为基础。文献[1—3]对前人关于旋风分离器的研究工作作了比较详尽的总结。近年来也出现了一些从流体力学角度分析的理论工作<sup>[4-6]</sup>;但是诚如文献[1]所指出的,为了搞清楚旋风分离器工作过程而作的努力,已产生了若干相互矛盾的理论,然而由于实验结果的不完全,我们还不可能鉴定与评价它们。文献[1]出现十余年后的今天,关于旋风分离器的研究成果,还是以在理论计算方法上尤其在流场实验测定方面的残缺不全和相互不一致为特点的。流动图形中的一些基本问题,例如速度分布特别是径向速度分布规律,环形区流场中是存在 Van Tangeren 双涡旋,抑是存在 Forster 单涡旋或 Ter Linden 半涡旋,湍流情况等等,仍然存在不同的

说法,迄今悬而未决。

本文提出了旋风分离器模型的三维流场测定结果。特别注意到对上述前人工作中没有得到澄清的问题的研究,例如对环形区的涡旋,径向速度非轴对称性,上行旋转核心流中还有一层近水平旋转的滞流层,以及湍流度在核心有单峰形分布等问题进行了讨论。

## 二、实验装置及测试方法

为使流场测试具有较好的代表性,本实验装置选择  $\phi 400$  和  $\phi 830$  两种尺寸作为模型(图 1)。主要以  $\phi 400$  模型为例,对模型各重要部位,如筒体、锥体及灰斗部分,在图 1 上的  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  四个方位处设有测量孔,从顶部至灰斗沿轴向共十六个水平位置可进行流场的详细测量( $\phi 830$  模型测孔略有减少)。 $\phi 400$  模型的进口风速为 22—24m/s 及 16m/s,  $\phi 830$  模型进口风速为 19.5m/s 及 11.8m/s。为考察出口管的影响,  $\phi 400$  模型选用缩口  $de = 0.443D$ ,  $de = 0.373D$  及直管  $de = 0.443D$  三种;而  $\phi 830$  则只有前两种出口管。旁室开口面积与进口面积之比,  $\phi 400$  为 10%,  $\phi 830$  为 7.85%。

采用五孔球形探针(图 2)测量三维速度场(图 3)及压力场,在图 3 坐标系内空间速度  $\mathbf{V}$  在切向、轴向、径向的分量分别为:

$$V_T = V \cos \alpha \cdot \cos \beta, \quad V_H = V \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad V_R = V \sin \beta \quad (2.1)$$

$V$  为速度绝对值,  $\alpha, \beta$  为图 2 所示角度。

速度  $V$ , 静压  $P_s$  可由五孔探针在 2, 4 孔处从压力计水柱高  $h_i (i = 2, 4)$  按下式求得:

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma(h_2 - h_4)}{\rho(k_2 - k_4)}} \quad (2.2)$$

$$P_s = P_a + \left[ h_2 - k_2 \frac{(h_2 - h_4)}{(k_2 - k_4)} \right] \quad (2.3)$$

其中  $k_i$  为第  $i$  孔压力恢复系数,由五孔探针在标定时确定;  $P_a$  为当地大气压;  $\gamma$  为压力计液体重度;  $\rho$  为气体密度,按当地温度及大气压修正,  $\rho = 0.0474P_a / (273 + t)$  ( $t$  为气体温度)。 $\alpha$  角由固定于探针上的旋转支架测定;  $\beta$  角由  $k_\beta - \beta$  标定曲线确定,其中

$$k_\beta(\beta) = \frac{k_1 - k_3}{k_2 - k_4} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_4} \quad (2.4)$$

湍流度用恒温式热线风速仪测量。本工作仅进行了湍流强度场的测量,热线探头形式及测试方框图示于图 4。由于测量采用的探头形式,其感受量为径向与切向平均速度及它们的脉动速度。

## 三、实验结果及分析讨论

本试验旋风分离器模型采用出口管为缩口  $de = 0.443D$  的(简称为原型),改变出口管及工况时均与原型的三维速度场比较。

$\phi 400$  模型的原型的进口风速为 22—24m/s 的三维速度场分布,分别以  $0^\circ - 180^\circ, 90^\circ - 270^\circ$  方位的切向速度  $V_T$ , 轴向速度  $V_H$ , 径向速度  $V_R$  作图,示于图 5—10;  $0^\circ - 180^\circ$  方位静压  $P_s$  及全压  $P_T$  分布见图 11;  $0^\circ - 180^\circ$  及  $90^\circ - 270^\circ$  方位的湍流度分布见图 12 及

表 1 流场测试内容一览表

序号	旋风本体 直径(mm)	出口管形状	进口风速 (m/s)	截面 方位	截 面 位 置 编 号 <sup>1)</sup>	截面总数
1	φ400	缩口 $d_e = 0.443D$	22—24	0°	0, 1*, 4*, 6*, 7*, 8, 9, 10*, 11*, 12*, 13, 14, 15	13
	φ400	缩口 $d_e = 0.443D$	22—24	90°	1*, 4*, 6*, 7*, 8, 10*, 12*	7
	φ400	缩口 $d_e = 0.443D$	22—24	180°	0, 1*, 2*, 3*, 4*, 5*, 6*, 7*, 8, 9, 10*, 11*, 12*, 13, 14, 15	16
	φ400	缩口 $d_e = 0.443D$	22—24	270°	4*, 6*, 7*, 8, 10*, 11*, 12*	7
2	φ400	缩口 $d_e = 0.443D$	16	180°	1, 3, 6, 7, 9, 10, 11	6
3	φ400	直管 $d_e = 0.443D$	22—24	180°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12	10
4	φ400	缩口 $d_e = 0.373D$	22—24	180°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12	10
5	φ830	缩口 $d_e = 0.443D$	19.48	90°	1, 4, 6, 8, 10	5
				180°	0, 1, 3, 4, 6, 8, 9, 10	8
				270°	1, 4, 6, 8, 10	5
6	φ830	缩口 $d_e = 0.443D$	11.8	180°	0, 1, 3, 4, 6, 8, 9, 10	8
7	φ830	缩口 $d_e = 0.373D$	17.57	180°	0, 1, 4, 6, 8, 9, 10	7
						102

1) 有\*的截面位置作了湍流度测量。

图 13.  $\phi 830$  模型的实验结果将在以下讨论中涉及。全部测试内容见表 1。

现对上述测量结果初步分析讨论如下:

**1. 切向速度分布** 气流切向速度是固体颗粒离心力的提供者, 其速度分布在旋风分离器流场中最有规律, 是人们讨论得最多的部分。Shepherd 和 Lapple<sup>[1]</sup>, Linden<sup>[7]</sup>, Stairmand<sup>[8]</sup> 等人的工作得到下列基本一致的看法: 切向速度分布由核心部分的刚性旋转以及外部沿半径负幂次律  $V_T = K/R^n$  的所谓准自由涡两部分组成。其后许多作者的工作均是根据他们自己的资料提出其推荐的  $n$  值及涡核半径。

本实验结果证明, 对切向速度分布规律, 前人的结果是一个较好的近似。根据  $\phi 400$  及  $\phi 830$  模型 4 个方位, 多个水平位置, 两种入口风速, 三种出口管的大量实测结果, 我们推荐, 在准自由涡区,

$$\frac{V_T}{V_0} = K \left( \frac{D}{R_p} \right)^n \quad (3.1)$$

$D$  为旋风分离器内壁(筒体或锥体)的直径,  $V_0$  为进口风速,  $R_p$  为考察点半径。我们推荐  $n = 0.55-0.65$ ,  $K = 0.8-1.2$ 。

根据切向速度分布图, 可以确定其最大值位置——所谓强制涡核的半径。 $\phi 400$  模型的涡核区示于图 14。可以明显看出, 涡核上宽下窄, 类似倒锥形, 锥角约  $7^\circ$ , 且沿轴线略有弯曲, 其半径与湍流速度测量中的峰值区也很相符, 这说明旋风分离器内高湍流度区就是切向速度类似于刚性转动的强制涡旋区。

**2. 径向速度** 径向速度是影响分离的重要因素。这可从所谓极限粒径的表达式看出。假设固粒在气流中运动, Stokes 阻力公式成立, 则有极限粒径

$$d_{crit} = \sqrt{\frac{18\mu_G V_R R}{(\rho_p - \rho_G) V_T^2}} \quad (3.2)$$

其中  $\mu_G$  为气体粘性系数;  $\rho_p$ ,  $\rho_G$  分别为固粒及气体密度。按式(3.2), 径向速度的平方根正比于极限粒径, 径向速度大的地方分离能力低。径向速度虽重要但很难测量, 已有的流场报告往往缺少  $V_R$  的分布, 少数  $V_R$  分布测量结果也往往互相矛盾<sup>[7,9]</sup>。流场中  $V_R$  一般较  $V_T$  小一个量级。从图 9, 10 中可以看出准自由涡区的  $V_R$  约为  $\pm 1-5\text{m/s}$ ,  $\beta$  在  $0^\circ - \pm 5^\circ$  之间, 因而相应要求测量精确才能得到。实验中曾用三种探针形式彼此验证五孔球形探针的测量结果, 得到的  $\beta$  角基本一致, 因而认为结果是可靠的。

我们的径向速度分布与前人结果不同, 其最大特点是非轴对称性。如图 9, 10 所示,  $0^\circ-180^\circ$  方位,  $90^\circ-270^\circ$  方位同一截面位置处  $V_R$  的符号及数值均作有规律分布, 但并非轴对称。在  $\phi 830$  模型中同样得到证实(图 15)。这与文献[7,9,10]的结果, 以及所有前人有关径向速度的假设不同。如文献[10]假设径向速度在出口管半径构成的元柱面上大小相等, 一律指向轴线( $V_R$  为正值), 这与本实验结果有较大出入。由于切向进气形式所造成的非轴对称性在整个流场中明显存在, 这一因素不能忽视。

**3. 关于双层旋转流动结构** 自从 Shepherd 和 Lapple 的实验工作<sup>[1]</sup>以后, 旋风分离器存在外层下行及内层上行的双层旋转流动结构的定性图形得到一致公认。在本实验中同样得到证实, 见图 7, 8 中轴向速度分布(上行  $V_H$  为正值, 下行为负值)及图 16 中  $\phi 830$  的典型曲线。进一步分析发现, 在旋风出口管以下各水平截面上(即 3 号截面以下), 靠近

旋风中心轴线附近  $V_H$  均有一波谷形分布,最低点接近于 0,个别截面出现负值.这与文献[7]的结果,尤其与文献[11]的结果不同,它们的  $V_H$  分布未出现明显的波谷形分布.这一结果表明,在内层的上旋流中,即在所谓强制涡核中心处,还存在一层上行极缓慢、基本上作水平旋转的气流,个别地方会出现倒流(即  $V_H$  为负值的下行流).这一现象甚至延伸到本体外的出口管上部,这是由于在强旋转下造成了轴向逆压梯度,这个逆压梯度引起核心部分的轴向滞流,甚至倒流现象所致.

**4. 上灰环问题** 早在 30 年代, Van Tangeren 提出在出口管与旋风外壁构成的环形区域里,存在着二次流造成的呈封闭状的一对涡环<sup>[1]</sup>.如图 17(a)所示; Wellman<sup>[12]</sup> 则提出如图 17(b)所示的双涡环模型; Forster 提出有如图 17(c)所示的单涡环<sup>[7]</sup>,但都没有得到实验证实.这些作者都认为,环形区域的涡环会使含尘气体在该区域发生循环,致使部分粉尘徘徊于出口管附近,以至逃逸,大大降低了分离效率.这些说法似乎从他们的实验中观察到的顶盖附近常有一层悬浮灰环及工业装置的顶盖易磨损等现象得到支持.

从我们  $\phi 400$  模型的环形区三维速度分布情况看,其轴向速度全是下行的(见图 7),所以 Van Tangeren, Forster, Linden 等人提出的各种涡环似都不存在.至少说明二次流引起的涡旋影响是微小的.而该区域流动的最大特点是轴向速度非常小,气流在接近水平的平面内运动.含尘气体在该区的停留时间较其他部位长得多.这同样可以解释上灰环的存在及顶盖易磨损现象.与此同时,沿出口管外壁处下行轴向速度明显增大,可以解释沿出口管逃逸的所谓短路现象.

但从  $\phi 830$  模型中,环形区的上行轴向速度明显存在( $V_H$  分布见图 18),构成了该区域的涡旋.为进一步考察涡旋的存在,我们计算该区域的流函数  $\phi$  的分布:

$$\phi = \int_{r_a}^{r_b} 2\pi r V_H dr / Q_1 \quad (3.3)$$

$r_a, r_b$  为所考察环形区间两端距中心线的距离,  $Q_1$  为入口风量.连接环形区等  $\phi$  线而得到的流线形状示于图 19,从图 19 看来,由于旋风器的结构形式及尺寸的不同, Forster 的单涡模式流线方向与我们测试结果是不相符的.另外,根据本实验结果可以看出, Wellman 的双涡模式同样由于非轴对称性影响而只能部分地存在.至于  $\phi 400$  与  $\phi 830$  模型上环形区域流动情况的不同,可能是由于模型尺寸及操作条件不同引起,这需要进一步研究.这也说明旋风分离器的放大规律不能从简单的几何放大来取得.

**5. 湍流度** 前人对旋风分离器内湍流的研究更为不足,文献[13,14]利用热线风速仪测量了一种类似于旋风分离器模型的湍流度及部分脉动速度,文献[13]没有测量最有兴趣的涡核部分.由于本实验采用的探针形式及安装姿态,测量到的主要是切向和径向湍流强度;轴向平均及脉动速度感受量均小得多.图 12 及 13 的湍流度分布表明,气流入口处( $0^\circ$  方位 4 号截面)湍流度很低,在 1.5% 以下;转过  $90^\circ$  方位,湍流度增加至 3—4%;湍流强度场呈明显的有规律的单峰形式,峰值出现在中心线附近,并在不同水平截面上具有同样的规律,出口管下的 4 号截面处其最大值可达 35%.中心处湍流度剧增是由于脉动速度加大及平均速度减小所致.在湍流度增高的区域(出口管下),湍流扩散造成的粉尘短路逃逸也是最严重的.大体上看,随筒体轴向高度的减小,湍流度略有减小,高湍流度区的范围也逐渐减小.

本结果比文献[14]的结果更有规律性。没有观察到文献[14]所述的底部湍流度最高及湍流度在壁面及中心达到的相同高度的双峰值现象。我们认为本实验结果似更合理。

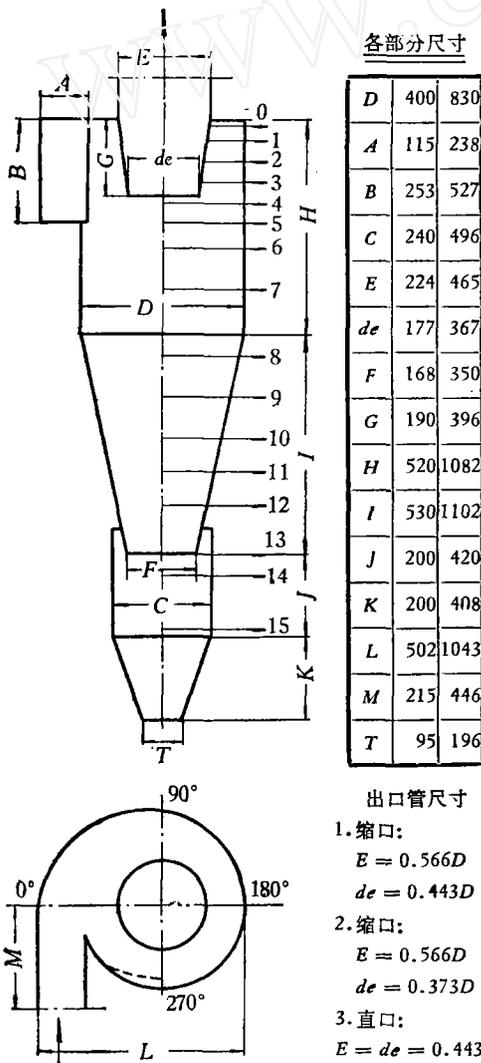


图 1 旋风分离器本体图

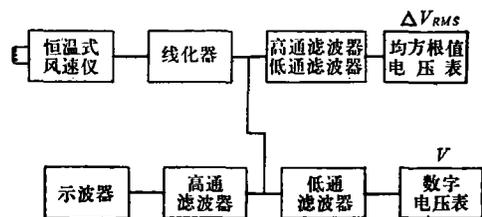
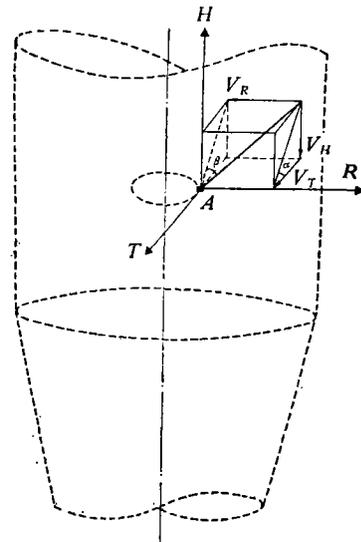
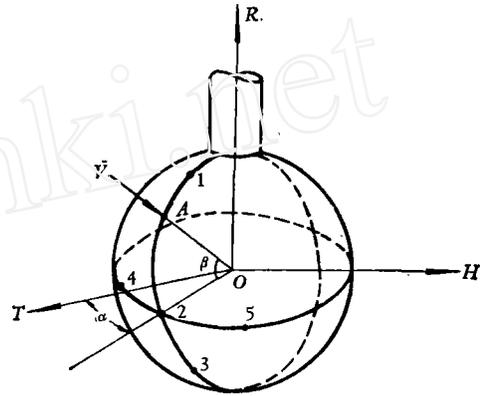


图 4 热线探头及测试系统方框图

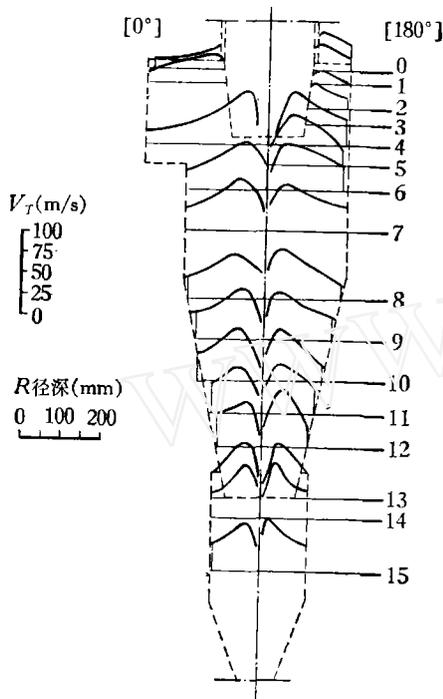


图5 0—180°方位切向速度  $V_T$  分布

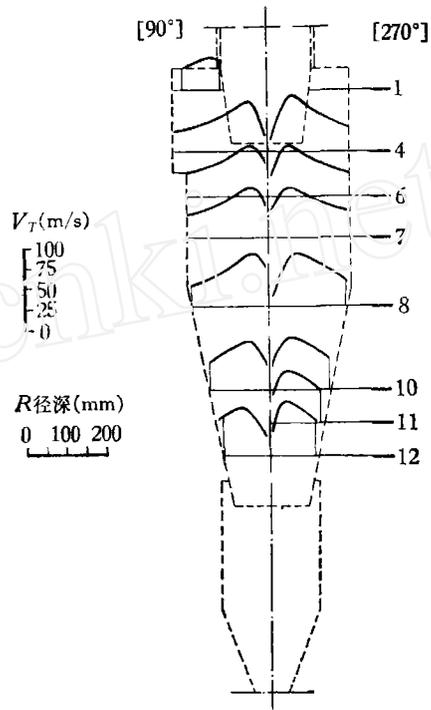


图6 90—270°方位切向速度  $V_T$  分布

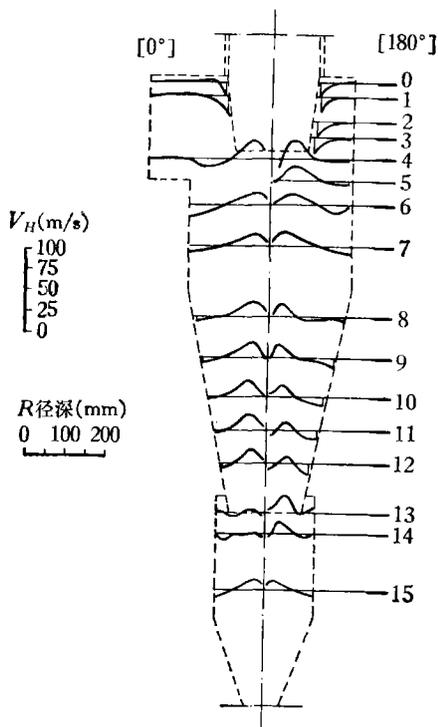


图7 0—180°方位轴向速度  $V_H$  分布

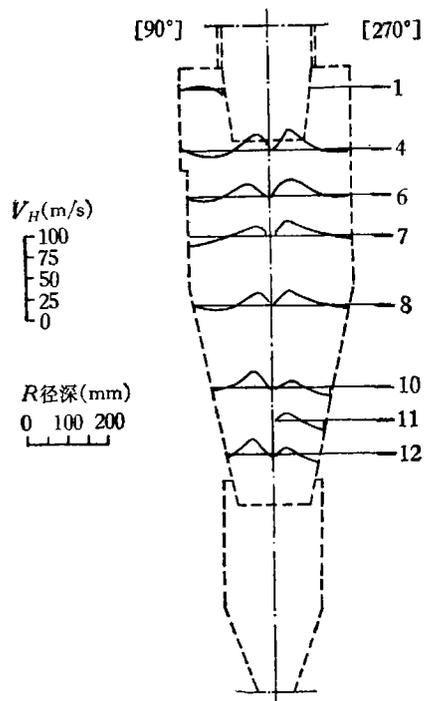


图8 90—270°方位轴向速度  $V_H$  分布

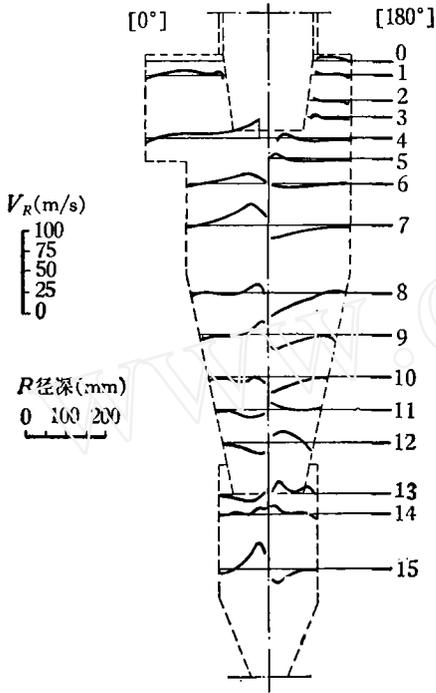


图 9 0—180° 方位径向速度  $V_R$  分布

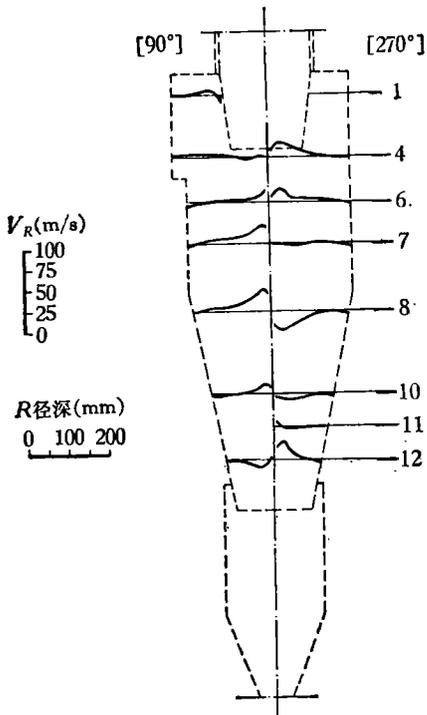


图 10 90—270° 方位径向速度  $V_R$  分布

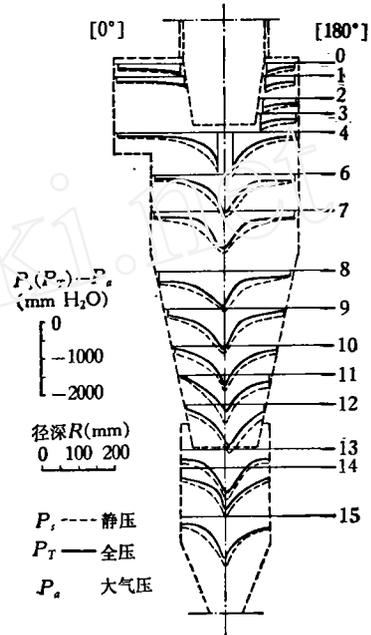


图 11 0—180° 方位静压  $P_s$  及全压  $P_T$  分布

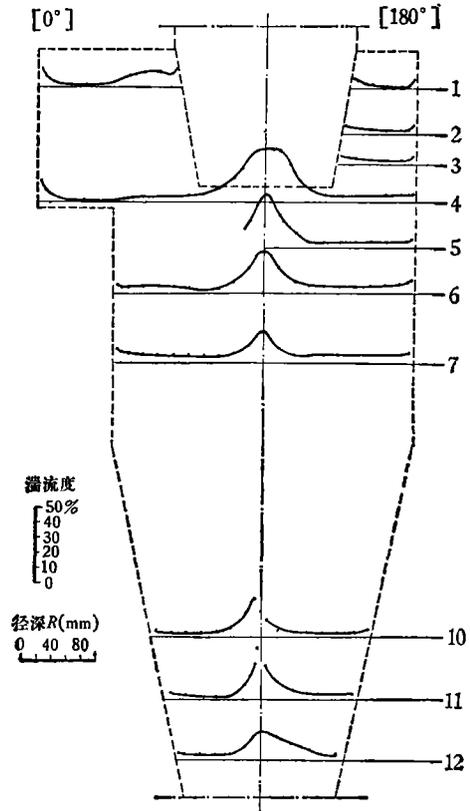


图 12 0—180° 方位湍流度分布

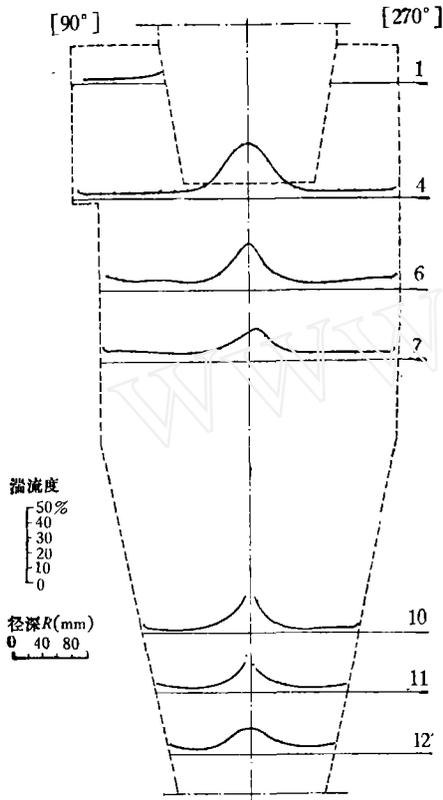


图 13 90—270° 方位湍流速度分布

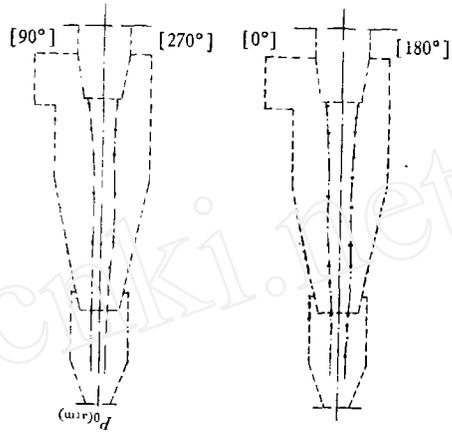


图 14 涡核区示意图

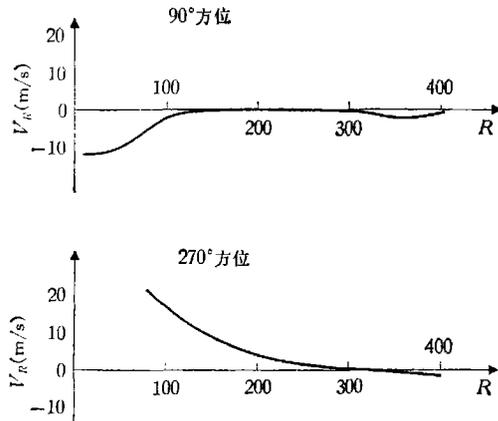


图 15  $\phi 830$  模型 6 号截面 90° 和 270° 方位径向速度  $V_R$  分布

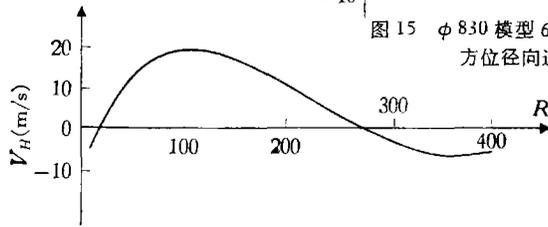


图 16  $\phi 830$  模型 4 号截面 180° 方位  $V_H$  分布

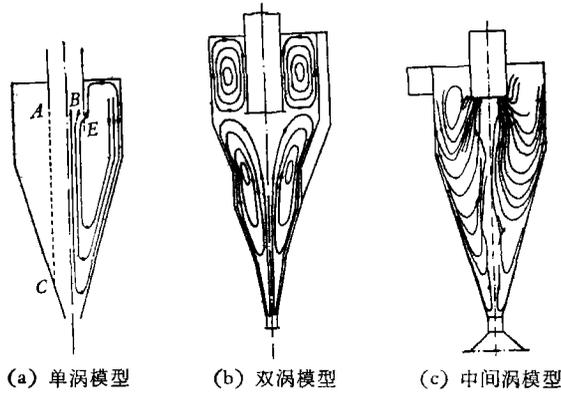
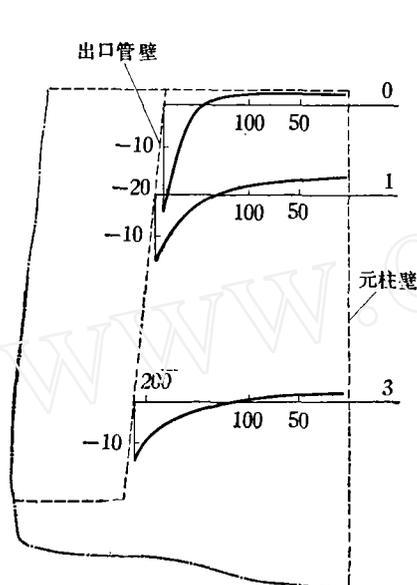
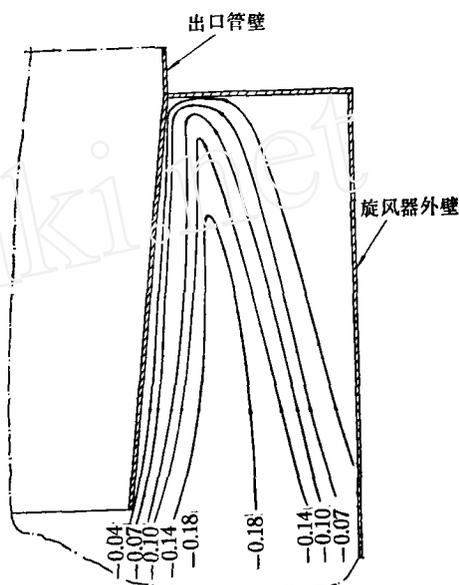


图 17 旋风分离器中的涡

图 18  $\phi 830$  模型  $180^\circ$  方位上灰环处  $V_H$  分布图 19  $\phi 830$  模型环形区流线示意图

## 参 考 文 献

- [1] Jackson, R., *B. C. U. R. A. Bull*, 24(1962).
- [2] Strauss, W., *Industrial Gas Cleaning*, Pergamon Press (1975).
- [3] 井伊谷钢一, 集尘装置の性能 (1976).
- [4] Smith, J. L., *Trans. ASME, Ser. D*, 84(1962), 609.
- [5] Crown, C. T. & Pratt, D. T., *Computers and Fluids*, 2(1974), 249.
- [6] Bloor, M. J. G. & Ingham, D. B., *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 53(1975), 1.
- [7] Ter Linden, A. J., *Proc. Inst. Mech. Engng.*, 160(1949), 233.
- [8] Stairmand, C. J., *Trans. Inst. Chem. Engng.*, 29(1951), 356.
- [9] 木村典夫、长谷川善哉、赤松俊城, 粉体工学研究会志, 9(1972), 392.
- [10] Muschelknautz, E., *Chemie-Ingeneur-Technik* (1967), 531.
- [11] Kelsall, D. F., *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 30(1952), 87.
- [12] Wellman, F., *Feuerungstechnik*, 26(1938), 137.
- [13] Schowalter, W. R. & Johnstone, H. F., *A. I. Ch. E. Journal*, 6, 4(1960), 648.
- [14] Jiři Hejma, *Staub-Reinhalt Luft*, 31(1971), 290.