

## 旋风分离器内断面流量的实验研究

王连泽

(清华大学工程力学系 北京)

彦启森

(清华大学热能工程系)

**摘 要** 实验测定了常规旋风分离器内断面流量沿高度的分布,发现了在排气芯管入口断面附近有近24%的短路流量并提出设法减少这部分短路流量是提高分离效率研究的一个方向.通过对安装不同类型减阻杆后下降流量的测定比较,发现了非全长减阻杆下端固定时有增加减阻杆上方断面下降流量的功能.这将延长含尘气流在分离器内的停留时间,从而提高分离效率.

**关键词** 旋风分离器 短路流量 下降流量 减阻杆 停留时间

**中图分类号** TB657.7

旋风分离器内的断面流量即不同高度断面上的过流量,对上行流来讲为上升流量,对下行流来讲为下降流量,上升流量和下降流量在忽略漏风因素时是应该相等的.为简单起见,将断面上的过流量简称为下降流量.下降流量是旋风分离器一个很重要的性能指标,因为它直接关系着含尘空气在分离器内停留时间的长短,停留时间越长,含尘空气旋转的圈数越多,粉尘被分离的可能性也就越大.所以,下降流量的大小,一般情况下预示着分离效率的高低.因此,研究旋风分离器内沿高度下降流量的分布规律及如何增加断面上的下降流量,是很有实际意义的.

### 1 实验模型及上、下行流区过流量的平衡计算

实验模型为筒体直径  $D = 340\text{mm}$  的 Stairmand 高效型旋风分离器,实验中控制系统处理风量  $L = 0.2317\text{m}^3/\text{s}$ ,测量断面的划分见图1.

每一断面处,无论是上行流区的上升流量,还是下行流区的下降流量均可通过轴向速度对

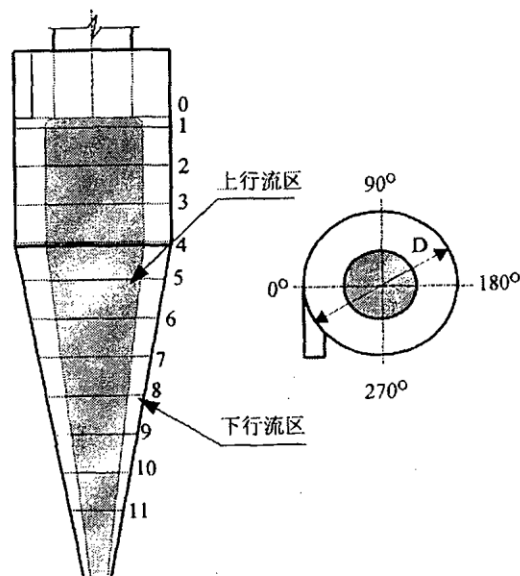


图1 实验模型的断面划分

流面积的积分求得. 因此, 过流量的计算关键是确定轴向速度分布的数学表达式. 以断面 1 为例, 实验所得四方位轴向速度分布的测量计算结果如下表所示.

表 1 常规旋风分离器断面 1 处四方位轴向速度分布数据

| 方位          |                   |             |                   |             |                   |             |                   |
|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| 0°          |                   | 90°         |                   | 180°        |                   | 270°        |                   |
| 半径<br>$r/m$ | 轴向速度<br>$V_z/m/s$ | 半径<br>$r/m$ | 轴向速度<br>$V_z/m/s$ | 半径<br>$r/m$ | 轴向速度<br>$V_z/m/s$ | 半径<br>$r/m$ | 轴向速度<br>$V_z/m/s$ |
| 0.015       | 2.39              | 0.015       | 3.63              | 0.020       | 1.60              | 0.010       | 0.00              |
| 0.020       | 3.19              | 0.025       | 5.38              | 0.030       | 4.47              | 0.020       | 1.11              |
| 0.030       | 5.83              | 0.040       | 8.39              | 0.045       | 9.43              | 0.035       | 2.35              |
| 0.045       | 9.09              | 0.055       | 9.83              | 0.060       | 11.04             | 0.050       | 10.68             |
| 0.060       | 8.27              | 0.070       | 6.22              | 0.075       | 7.88              | 0.065       | 9.49              |
| 0.075       | 3.75              | 0.085       | 3.21              | 0.090       | 4.68              | 0.080       | 5.20              |
| 0.090       | 0.73              | 0.100       | 1.66              | 0.105       | 3.04              | 0.095       | 2.13              |
| 0.105       | -1.41             | 0.115       | -0.97             | 0.120       | 0.48              | 0.110       | 0.59              |
| 0.120       | -4.48             | 0.130       | -3.51             | 0.135       | -1.62             | 0.125       | -1.44             |
| 0.135       | -6.95             | 0.145       | -5.20             | 0.150       | -4.36             | 0.140       | -3.65             |
| 0.150       | -6.45             | 0.160       | 0.43              | 0.160       | -5.39             | 0.155       | -5.05             |
| 0.160       | -0.88             | 0.165       | 1.28              | 0.165       | -5.52             | 0.165       | -5.00             |
| 0.165       | 1.53              |             |                   |             |                   |             |                   |

对上表中轴向速度分布进行四方位平均, 结果如图 2 中散点所示, 将轴向速度相对半径分布的平均数据进行多项式拟合, 得分布表达式为

$$V_z = 5.67108 \times 10^7 \cdot r^6 - 3.04708 \times 10^7 \cdot r^5 + 6.33889 \times 10^6 \cdot r^4 - 609267r^3 + 22966.6r^2 - 28.6704r - 1.91616 \quad (1)$$

将该表达式计算结果一并绘入图 2, 如实线所示.

因此, 从图 2 可知上升流量

$$L_u = \int_{0.0116}^{0.1082} 2\pi r V_z dr \quad (2)$$

下降流量

$$L_d = - \left( \int_0^{0.0116} 2\pi r V_z dr + \int_{0.1082}^{0.17} 2\pi r V_z dr \right) \quad (3)$$

将式(1)代入式(2)和式(3)得上、下行流区过流量分别为

$$\begin{aligned} L_u &= 0.1821 \\ L_d &= 0.1713 \end{aligned} \quad (4)$$

虽然根据质量守恒定律, 上、下行流区过流量应该相等, 但从上述计算结果可见, 由于实验过程中存在的误差以及公式拟合时的误差, 积分所得的上、下行流区过流量并不相同, 其差别的大小反映了误差的大小. 此时上、下行流区过流量的相对误差.

$$\Delta L = \frac{L_u - L_d}{L_u} = \frac{0.1821 - 0.1713}{0.1821} = 5.9\%$$

由于该相对误差不大,说明了实验结果的准确性.以后将上、下行流区过流量的平均值

$$L = \frac{L_u + L_d}{2} = 0.1767(\text{m}^3/\text{s})$$

做为该断面的下降流量.

## 2 断面1以上短路流量的验算

从上述上、下行流区过流量的计算已经知道,断面1处的下降流量为  $0.1767\text{m}^3/\text{s}$ . 因此时旋风分离器的处理流量为  $0.2317\text{m}^3/\text{s}$ . 所以,其差值  $0.055\text{m}^3/\text{s}$  便是断面1以上从下行流区向心流入上行流区的空气流量. 这部分流量占分离器处理风量的23.7%.

在分离器排气芯管入口断面0至断面1仅30mm的高度范围(占分离器总高度1360mm的2.2%)内,就有占总处理风量23.7%的空气进入上行流而被排出分离器,这无疑说明在分离器入口和排气芯管入口附近存在很大的短路流量(下文中将断面1以上部分进入上行流区的流量统称为短路流量). 尽管这部分含尘空气并不是象管流那样直接从分离器入口流到排气芯管入口,要经过一定角度的旋转运动,但可想而知,含尘空气在分离器内这样短的停留时间,不可能给粉尘提供足够的分离能力. 因此,作者认为,旋风分离器入口附近很大的短路流量是限制分离效率提高的一个主要因素. 设法减少这部分短路流量,将是提高旋风分离器效率的一个研究方向.

旋风分离器的短路流量理论上还可以通过径向速度对排气芯管入口断面0至断面1的芯管假想延长管壁面积的积分求得. 为此,将每一断面处,排气芯管半径  $r = 0.085\text{m}$  时的径向速度进行四个方位的平均,然后将径向速度对高度(这里以测量断面编号代替)的分布进行多项式拟合,其结果如图3所示.

由图3可知芯管入口断面0与断面1之间径向速度的轴向分布,为简便起见,短路流量按平均速度计算:

$$\text{平均径向速度 } \bar{V}_r = \frac{3.0 + 3.5}{2} = 3.25 \text{ m/s}$$

$$\text{流通面积 } S = 2\pi rh = 2\pi \times 0.085 \times 0.03 = 0.01602 \text{ m}^2$$

$$\text{所以短路流量 } L_s = \bar{V}_r S = 0.0521 \text{ m}^3/\text{s}$$

这里按径向速度计算所得的短路流量  $0.0521\text{m}^3/\text{s}$  比前面按轴向速度计算所得的短路流量  $0.055\text{m}^3/\text{s}$  小5.3%. 原因是按径向速度计算短路流量时,没有考虑排气芯管与筒壁之间环形空间的二次流问题. 作者从测量所得的全流场轴向速度的分布可明显看出排气芯管外壁附近向下的轴向速度增大,这部分流体沿芯管外壁向下流到芯管入口断面迅速短路排出分离器. 因此,实际情况

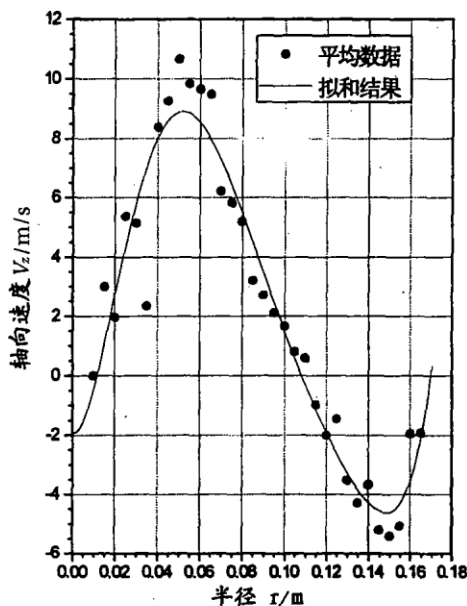


图2 常规旋风分离器内断面1处轴向速度分布

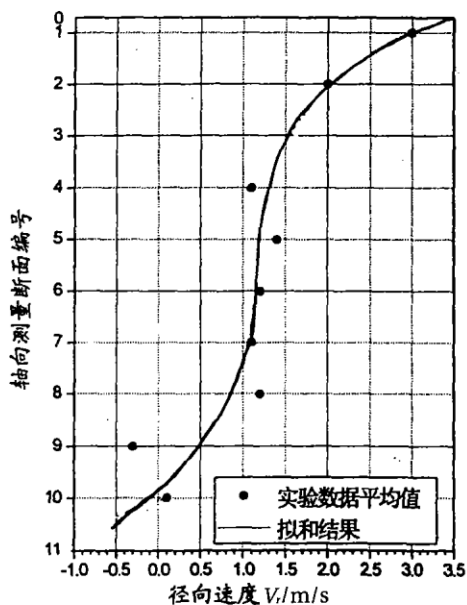


图3 常规旋风分离器内径向速度在轴向的分布



(续表 2)

| 模型    | 项目                         | 断面     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       |                            | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     |
| 1     | $L_u(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1637 | 0.1433 | 0.1308 | 0.1104 | 0.0947 | 0.0759 | 0.0643 | 0.0598 | 0.0465 | 0.0321 | 0.0255 |
|       | $L_d(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1613 | 0.1521 | 0.1391 | 0.1200 | 0.0986 | 0.0837 | 0.0740 | 0.0619 | 0.0454 | 0.0296 | 0.0201 |
|       | $L(\text{m}^3/\text{s})$   | 0.1625 | 0.1477 | 0.1350 | 0.1152 | 0.0967 | 0.0798 | 0.0692 | 0.0609 | 0.0460 | 0.0308 | 0.0228 |
|       | $L'(\text{m}^3/\text{s})$  |        |        |        |        |        | 0.2340 |        |        |        |        |        |
|       | $L/L'(\%)$                 | 69.4   | 63.1   | 57.7   | 49.2   | 41.3   | 34.1   | 29.6   | 26.0   | 19.6   | 13.2   | 9.7    |
|       | $L_s(\%)$                  |        |        |        |        |        | 30.6   |        |        |        |        |        |
| 4     | $L_u(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1733 | 0.1454 | 0.1338 | 0.1129 | 0.0995 | 0.0886 | 0.0763 | 0.0698 | 0.0569 | 0.0427 | 0.0415 |
|       | $L_d(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1634 | 0.1518 | 0.1464 | 0.1283 | 0.1029 | 0.0939 | 0.0816 | 0.0714 | 0.0603 | 0.0457 | 0.0379 |
|       | $L(\text{m}^3/\text{s})$   | 0.1684 | 0.1468 | 0.1401 | 0.1206 | 0.1044 | 0.0913 | 0.0790 | 0.0706 | 0.0586 | 0.0442 | 0.0397 |
|       | $L'(\text{m}^3/\text{s})$  |        |        |        |        |        | 0.2315 |        |        |        |        |        |
|       | $L/L'(\%)$                 | 72.7   | 64.2   | 60.5   | 52.1   | 45.1   | 39.4   | 34.1   | 30.5   | 25.3   | 19.1   | 17.1   |
|       | $L_s(\%)$                  |        |        |        |        |        | 27.3   |        |        |        |        |        |
| $H_1$ | $L_u(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1906 | 0.1760 | 0.1694 | 0.1641 | 0.1542 | 0.1375 | 0.1191 | 0.1090 | 0.0883 | 0.0558 | 0.0407 |
|       | $L_d(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1823 | 0.1733 | 0.1618 | 0.1570 | 0.1422 | 0.1305 | 0.1168 | 0.1133 | 0.0830 | 0.0549 | 0.0398 |
|       | $L(\text{m}^3/\text{s})$   | 0.1865 | 0.1747 | 0.1656 | 0.1601 | 0.1482 | 0.1340 | 0.1180 | 0.1112 | 0.0857 | 0.0554 | 0.0403 |
|       | $L'(\text{m}^3/\text{s})$  |        |        |        |        |        | 0.2270 |        |        |        |        |        |
|       | $L/L'(\%)$                 | 82.1   | 76.9   | 73.0   | 70.7   | 65.3   | 59.0   | 52.0   | 49.0   | 37.7   | 24.4   | 17.7   |
|       | $L_s(\%)$                  |        |        |        |        |        | 17.9   |        |        |        |        |        |
| $H_2$ | $L_u(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1921 | 0.1171 | 0.1756 | 0.1674 | 0.1593 | 0.1236 | 0.0954 | 0.0794 | 0.0625 | 0.0443 | 0.0339 |
|       | $L_d(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.1900 | 0.1864 | 0.1790 | 0.1691 | 0.1668 | 0.1280 | 0.0987 | 0.0808 | 0.0664 | 0.0444 | 0.0367 |
|       | $L(\text{m}^3/\text{s})$   | 0.1911 | 0.1818 | 0.1773 | 0.1683 | 0.1631 | 0.1258 | 0.0966 | 0.0801 | 0.0645 | 0.0444 | 0.0353 |
|       | $L'(\text{m}^3/\text{s})$  |        |        |        |        |        | 0.2280 |        |        |        |        |        |
|       | $L/L'(\%)$                 | 83.8   | 79.7   | 77.8   | 73.8   | 71.5   | 55.2   | 42.4   | 35.1   | 28.3   | 19.5   | 15.5   |
|       | $L_s(\%)$                  |        |        |        |        |        | 16.2   |        |        |        |        |        |

## 4 结论

由于常规旋风分离器排气芯管入口断面附近存在高达 24% 的短路流量, 这将严重影响整体分离效果. 如何减少这部分短路流量, 将是提高分离效率的一个研究方向. 非全长减阻杆减阻效果虽然不如全长减阻杆好, 但由于其减小了常规旋风分离器的短路流量及使断面下降流量增加、使旋风分离器的分离效率提高将更具实际意义.

## 参 考 文 献

- 1 侯晖昌. 减阻力学. 北京: 科学出版社, 1987
- 2 庄礼贤等. 流体力学. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1991
- 3 王连泽, 彦启森. 旋风分离器减阻杆对流场的影响. 粉体技术, 1996, 2(4): 11
- 4 王连泽, 彦启森, 叶龙. 旋风分离器压力损失及减阻杆的研究. 力学与实践, 1998, 20(4): 32
- 5 王连泽, 彦启森. 旋风分离器减阻杆结构及减阻前后流场的测定与分析. 实验力学, 1998, 13(4): 469
- 6 王连泽, 彦启森. 三维旋转流场特征与压力损失关系的研究. 工程力学, 1998, 15(4): 43

## An experimental investigation on the flow rate at different heights of cyclone

Wang Lianze

(Dept. of Eng. Mechanics, Tsinghua University)

Yan Qisen

(Dept. of Thermal Eng., Tsinghua University)

**Abstract** The distribution of flow rate on different heights of cyclone with and without Repds is presented. It is found that about 24 percent of total flow rate near the exit of normal cyclone is short circuited. Because the short Repds can increase the flow rate in different heights of cyclone, it is reasonable to consider that this kind of Repds can increase the separation efficiency of cyclone while reducing the pressure drop.

**Key words** cyclone short circuit flow rate repds retention period

---

### 科技教育信息

#### 我院成立“浙江威联科技教育交流中心”

##### 欢迎各界人士前来咨询及合作

“浙江威联科技教育交流中心”是一家由省教委、省科委批准、杭州应用工程技术学院主办的对德科技和教育交流咨询服务机构。其主要业务包括国际合作项目咨询服务、国际科技经济信息咨询服务、组织国内外博览会参展和考察、贸易及技术伙伴介绍、自费留学及国际教育信息咨询服务等。该机构经国家教育部、公安部严格审核,首批获准开展自费留学咨询服务业务。现面向全省招收大中专、高中毕业生自费赴德留学。威联中心将以热情、严谨、高效、和可靠为中心的服务宗旨,为广大高中生、大学生提供留学渠道和咨询服务。为中德双方企业寻找合作伙伴和代理提供优质咨询服务。

(威联中心)