

旋流式分离器三维流场测定

凌志光

黄存魁

(上海工程技术大学)

(中国科学院工程热物理所)

提要 在 $\phi 196\text{mm}$ 的实验模型上,用五孔球形探针较详尽地测量一、二次气不同流量比例和不同结构情况下旋流式分离器的三维速度场及压力场。得到了切向速度在分离器中部为准强制涡,外部非喷嘴区为准自由涡和喷嘴区为随半径先降后升的分布形式。在一定的一次气旋流器结构和参数条件下,轴向速度存在滞流和倒流现象。从流场上解释了形成准滞止灰环的原因,此外,初步分析探讨了形成螺旋形灰带等问题。

关键词 气-固分离,旋风器,分离,涡,气-固二相流。

一、引言

旋流式分离器是西德首先发展起来的一种高效分离器,它在流动及分离机理方面与普通旋风分离器和其它分离器有所不同,其特点是两股同旋流方向的气体进入分离箱,从底部进入一次气,从顶部和侧上部进入二次气,这样在一二次气共同作用下形成双层旋转流动结构,流场中的固体粒子在离心力, Magnus 力等作用下,有聚集,形成螺旋形灰带的作用,有利于分离,可以说这种分离器是一种重要的气动式气-固分离器。

旋流式分离器由于其结构和分离机理的独特性,使其具有如下优点:切割粒径(输入粒子 50% 可被分离出去的粒子直径)和极限粒径(输入粒子 100% 可被分离出去的粒子直径)小,实验报导最小可达 0.5μ 和 6μ ,分离效率高,而且,结构简单可靠,有利于在高温、高压大流量情况下工作。随着石油化工和先进的燃煤动力装置的发展以及环保对分离净化要求的提高,其研究正在不断深入。

对旋流式分离器流动及分离机理的研究,主要包括两个方面:一是气体流动规律的研究,二是粒子运动轨迹的研究,而二者又是紧密联系的。就流动规律而言,由于这种分离器内部流场的复杂性——二相、三元、具有粘性和热传导的湍流运动。完整的三维流场计算十分困难,迄今还未见到有关文献报导,现阶段主要通过试验研究来了解其内部流动规律情况。文献[6]通过实验曾发表了沿高度三个不同截面上的切向和轴向速度分布,但由于截面太少,不能完整的了解其内部流动规律。在这种分离器上所观察到的准滞止灰环及螺旋形灰带等现象,未能给出满意的解释。本文通过对这种分离器三维流场的测试,得到了内部流动较详细的结果,在此基础上解释了形成准滞止灰环的原因,并对螺旋形灰带的成因做了初步分析和探讨。

本文于 1987 年 5 月 26 日收到,1988 年 2 月 1 日收到修改稿。

二、实验装置及测试方法

本实验选用直径 $\phi 196\text{mm}$ 的模型器, 用干净空气作为工质, 进行冷态模拟实验. 实验装置主要由供气, 调节, 模型器实验段, 加灰及测量系统组成. 为了较详尽地了解分离器内气体的流动情况及一二次气流量比例变化对整个流场的影响情况, 在实验段顶部和侧上部有十个二次气进气喷嘴, 正面由下而上设有十三个测量位置, 其结构如图 1 所示. 另外, 为了研究一次气旋流器导向叶片及稳流体对流场的影响, 在不同导向叶片和稳流体方案下, 对整个流场进行了测量.

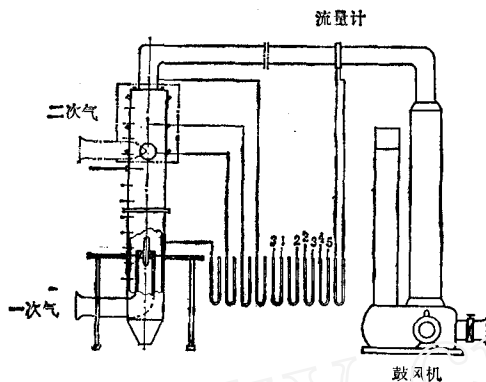


图 1 实验装置

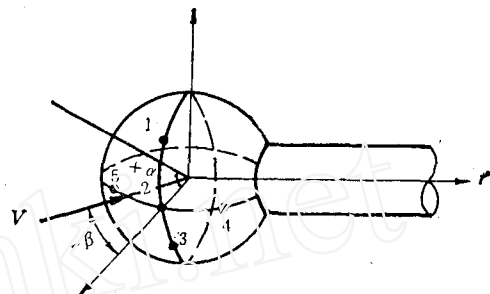


图 2 五孔球形探针

采用五孔球形探针(图 2)测量了三维速度场及压力场, 该探针的探头直径为 5mm , 支杆直径为 6mm , 探针装在精度较高的坐标架和导轨上, 同时由 U 型管和倾斜式微压计联合测量探头所感受的压力 Δh_{4-5} , Δh_{2-3} 和 Δh_{1-6} , 按公式

$$\chi_\beta = \frac{p_4 - p_5}{p_2 - p_3} = \frac{\Delta h_{4-5}}{\Delta h_{2-3}} \quad (1)$$

求出比值 χ_β , 由校准曲线 $\chi_\beta - \beta$ 求出气流角 β , 再由校准曲线 $\chi_V - \beta$, $\chi_D - \beta$, $\alpha_{\text{校}} - \beta$ 分别求出速度系数 χ_V , 压力系数 χ_D 和校准角 $\alpha_{\text{校}}$, 则气流与水平面的夹角为

$$\alpha_{\text{水}} = \alpha_{\text{起}} - \alpha_{\text{测}} + \alpha_{\text{校}} \quad (2)$$

式中 $\alpha_{\text{起}}$ 和 $\alpha_{\text{测}}$ 分别为坐标架起始角和测量角.

气体的总速度及分速度为

$$V = \sqrt{2\gamma\Delta h_{2-3}/(\rho\chi_V)} \quad (3)$$

$$V_r = V \sin(-\beta) \quad (3-a)$$

$$V_\theta = V \cos \beta \cos \alpha_{\text{水}} \quad (3-b)$$

$$V_z = V \cos \beta \sin \alpha_{\text{水}} \quad (3-c)$$

式中 γ 为压力计工作液的重度, $\alpha_{\text{水}}$ 和 β 为图 2 所示的气流角, ρ 为当地气体的密度.

测量位置处气体的静压力为:

$$p_s = p_a + \left[\Delta h_{2-6} - \frac{\chi_D}{\chi_V} \Delta h_{2-3} \right] \cdot \gamma \quad (4)$$

式中 p_0 为大气压力。

三、实验结果及分析讨论

在 $\phi 196\text{mm}$ 的模型分离器上,通过改变一二次气流量比例和模型分离器结构,做了如表 1 所示的速度场及压力场测量,其中只绘出了工况三、五、六、七和九,结果见图 3。

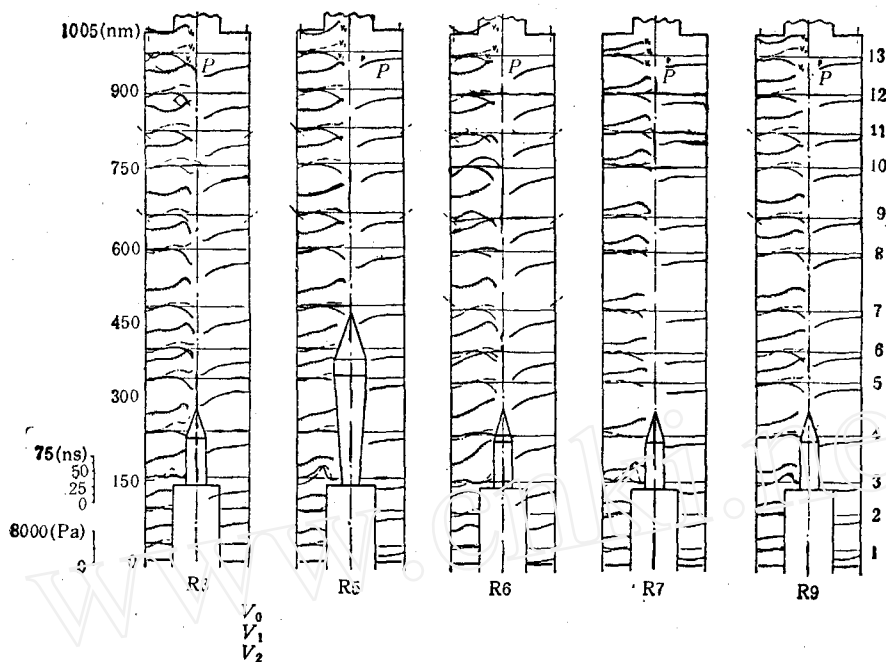


图3 试验工况三、五、六、七、九测量如切向、径向轴向速度与压力分布

1. 切向速度分布

气体的切向速度是固体粒子离心力的提供者,其分布较为重要。在分离器的中心,切向速度应近似为零,由其和靠近中心部的实验结果及速度分布的连续性得中心部分的切向速度分布为 $V_\theta = Cr^n$, 本实验的 n 值为 0.6—1.0, 这就是人们所称的准强制涡, 它和文献[1], [8] 的实验结果是一致的。准强制的外部, 切向速度随输入条件和轴向位置不同而不同, 下面将其分为三种情况: (a) 一二次气共有, (b) 只有二次气, (c) 只有一次气来讨论。对于 (a)、(b) 两种情况, 切向速度分布形式基本相同, 都为准自由涡, 即 $V_\theta = Cr^{-n}$, 本实验 $n = 0.15 \sim 0.5$ 。对于情况 (a), 将模型分离器分为上下两部分, 上部称为喷嘴区, 下部称为非喷嘴区。在喷嘴区, 由于气体通过喷嘴高速喷入, 大大加强了外层的旋转动能, 靠近壁面附近的气体, 其切向速度不但不减小, 反而增加, 这与普通旋风分离器外层切向速度分布是不同的。下部非喷嘴区, 由于壁面的阻力及湍流引起的能量交换和能量消耗, 进入这一区域的二次气能量大为减小, 切向速度分布与普通旋风分离器基本相同, 为沿半径减小的准自由满分布。

2. 轴向速度

旋流式分离器的轴向速度(规定向上为正)分布为外层下行而中心部上行的双旋转流动结构,但是,当二次气流量与总流量之比($Q_2/Q_{\text{总}}$)小于某一临界值时,由于壁面阻力等作用,下行气体在某截面就会终止,靠近壁面处的气体轴向速度变为零或正值,本实验发现 $Q_2/Q_{\text{总}}=1/3$ 时,截面 4 附近出现正的轴向速度,如图 4 所示. 当 $Q_2/Q_{\text{总}}$ 超过临界值时,此现象消失. 下行和上行的分界点 ($V_z = 0$),一般在

$$\frac{2}{3} R_0 - \frac{4}{5} R_0$$

之间. 在上行区,当旋流器叶片为叶片 1 (见表 1 备注)时,旋流器出口附近出现如图 4 所示的倒流现象,由这一现象可知,此时旋流器出口附近存在二次涡流.

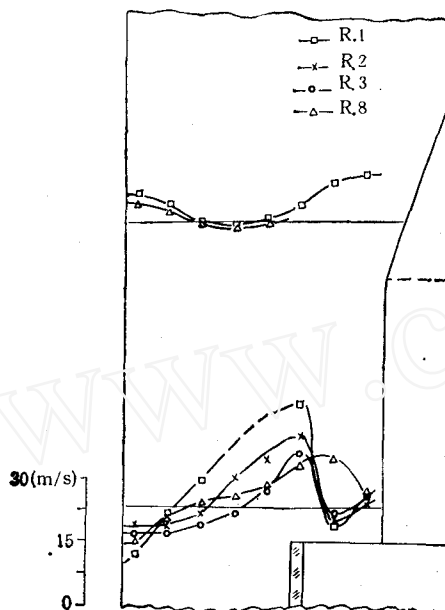


图 4 不同试验工况下测量截面

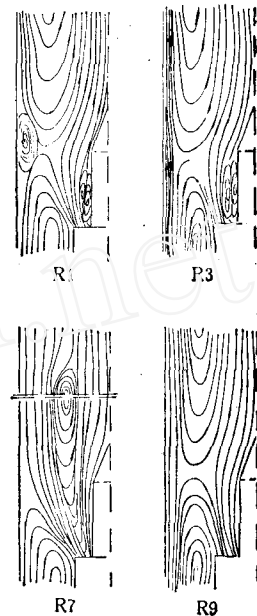


图 5 试验工况一、三、七、九的流线图

国内近年改进、研制的无一次气旋流式分离器,全部气体由顶、侧上部的两排喷嘴喷入,其结构与工况 6 相似,它的轴向速度分布很有规律,各截面给出相似分布形式,其结果如图 3-R6 所示.

为了研究二次涡流形成的原因,去掉二次气,在只有一次气(工况 7)情况下,对用叶片 1 的旋流器做了三维流场测量,其结果如图 3-R7 所示,由图可见,不但旋流器出口附近存在倒流现象,而且该现象延伸到分离器中部(等八截面),由此可见在现有条件下倒流现象是由一次气引起的.

在了解倒流起因后,对影响气体流场的关键部件——旋流器导向叶片进行了改进,对改进的方案 2(见表 1 备注),其测量结果(图 3-R7)表明旋流器出口附近倒流现象消失.由此可见旋流器导向叶片设计与一二次气配合的重要性.

3. 径向速度

径向速度(向外为正)是影响分离的重要因素,这可从粒子的径向速度看出. 假设形

状为球体的粒子在气体运动中满足 Stokes 阻力公式,当粒子在 P 点达到力平衡时,有如下关系式

$$U_r = U_r + U_{\theta}^2 \rho_p d_p^2 / (18 \mu r_p) \quad (5)$$

可见粒子的径向速度不但受离心力和粘性阻力的影响,而且受气体径向速度 V_r 的影响. 测量结果发现,准强制涡的外部,径向速度比切向速度小一个数量级,一般在 $-4 \sim +4 \text{ m/s}$ 之间,而且此处 β 较小. 但在准强制涡区,由于 β 较大,五孔探头的 4、5 孔之中必有一孔与气体的夹角为 $45^\circ + |\beta|$,该孔有可能进入气体绕圆球的脱离区,由流动的不稳定性和径向压力梯度造成测量误差增加.

对于要求分离到小粒径的高效分离器,气体的径向速度 V_r 尤其重要,例如在半径 $r_p = 50 \text{ mm}$, 一个直径为 2μ , 密度为 1400 kg/m^3 , 切向速度为 35 m/s 的粒子,当气体为空气,温度和压力分别为室温和室压时,其径向速度为

$$U_r = V_r + 0.454$$

如果该处气体的径向速度 $V_r \leq -0.454 \text{ m/s}$, 则 $U_r \leq 0$, 粒子就无法分离出去,基于这点,试验研究了大倒锥形稳流体的流场,使一次气沿锥面运动,从而产生正的径向速度,测量结果(图 3-R5)表明大倒锥形稳流体对增加气体径向速度有作用,但稳流体过大也会影响整个分离器内的流场.

综合上述和三维流场测量结果,绘出了工况一、三、七和九的流线图,它们分别为图 5 的 R1、R3、R7 和 R9.

4. 压力场

压力场是所测量量当中最有规律的,不论是一二次气共有,还是只有一次气或二次气,测量结果大体是一致的,基本上都给出同一形式的分布规律,而且,它与用简单径向平衡法求得的旋转流场(中心强制涡,外层自由涡)的压力分布形式极为相似.

5. 准滞止灰环问题

如前所述,当 $Q_2/Q_1 = 1/3$ 左右时,下行气体在截面 4 附近终止,出现轴向速度 V_z 为零或正值(图 4),通过流场测量及分析,发现截面 4 附近出现如图 5-R1 所示的二次涡流,这样被分离出的固体粒子下行到截面 4 附近时,正的轴向速度阻止了分离粒子的下行,粒子在此大量堆积,形成实验所观察到的准滞止灰环.

6. 螺旋形灰带问题

对旋流式分离器,粒子聚集成螺旋形灰带问题是人们探讨较多的问题,但对其形成机理迄今解释各异,现根据流场测量结果和粒子受力两个方面作如下分析探讨. 在本实验的模型分离器上,二次气从顶、侧上部高速喷入,由于各喷嘴排列于气流螺旋线上,各喷嘴喷出的气体互相衔接,形成一个高速旋转的螺旋形气带,而且,各喷嘴的气体相当于淹没射流,对其周围的气体有引射作用. 当气体中含有粒子时,在引射作用下,粒子向射流区运动,粒子旋转并产生 Magnus 力. 这样在离心力, Magnus 力和引射共同作用下,原生在射流区的粒子难于跳出射流区,而射流区外的粒子又向射流区运动,各喷嘴喷出的粒子及射流区外的粒子在射流区不断衔接,浓度不断增加,就行成了人们所观察到的螺旋状灰带,它的存在是粒子增加了碰撞形成大粒子的机会,有利于分离.

四、结 论

1. 流场测试表明,在旋流式分离器内,气体的切向速度分布为中心准强制涡,外层非喷嘴区为准自由涡,喷嘴区为随半径增加先降后升的分布形式。径向速度在准强制涡的外部比切向速度小一个数量级。轴向速度在一定的条件 ($Q_2/Q_0 \approx 1/3$) 下出现二次涡流现象。

2. 当 $Q_2/Q_0 \approx 1/3$ 时,分离器壁面附近出现图 5-R1 所示的二涡流,它的存在使分离出的粒子在此大量堆积,形成准滞止灰环。

3. 从流场和粒子受力情况,初步探讨了形成螺旋状灰带的原因,即粒子在淹没射流的引射,离心力, Magnus 力作用下,向射流区聚集,而且,各淹没射流的互相衔接,射流区粒子浓度不断增加,最后形成螺旋状灰带。

表 1

工况	Q_2/Q_0	Q_0 m ³ /h	喷嘴数及其位置	叶片	稳流体	图 形
1	0.67	361	4(a, b, e, f)	1	1	
2	0.50	360	6(a,b,c,d,e,f)	1	1	
3	0.40	359	6(2g,b,c,d,e)	1	1	
4	0.30	359	6(2g,b,c,d,e)	1	2	
5	0.53	359	6(2g,b,c,d,e)	1	2	
6	0.00	333	10 (4g,a,b,c,d,e,f)	1	1	
7	1.00	232	0	1	1	
8	0.65	358	6(2g,b,c,d,e)	2	1	
9	0.59	361	6(2g,b,c,d,e)	2	1	
备 注	叶片 1: 内准线为抛物线的正交直母线叶片, 其内外出气角分别为 16.5° 和 21°。 叶片 2: 内准线为双扭线的非正交直母线叶片, 其内、外出气角分别为 28° 和 26°。 喷嘴: 顶、侧喷嘴直径分别为 15mm 和 12.5mm, 其中心线与水平面夹角均为 40°, 其中心线在水平面的投影与入口切线的夹角分别为 0° 和 30°。					

参 考 文 献

- [1] Ogawa. A. Separation of Particles from Air and Gases Vol. I, II, CRC press, Inc. Florida.

- [2] 柳绮年, 贾复等, 旋风分离器三维流场的测定, 力学学报, 3(1978).
- [3] 凌志光, 气动分离除尘器一般气动力学原理, 催化裂化动力回收烟机讲座讲议, 中国工程热物理学会主办, (1985).
- [4] Crowe C. T. and Pratt D. T., Analysis of Flow Field in Cyclone separators, *Computers and Fluids*, 2 (1974).
- [5] David F. Ciliberti and Brian W. Lancaster, Fine Dust Collection in a Rotary Cyclone, *Chemical Engineering Science*, 31. (1976)
- [6] David F. Ciliberti and Brian W. Lancaster, performances of Rotary Flow Cyclones. *AIChE Journal*, 22, 2(1976).
- [7] Crowe C. T. and Pratt D. T., Two-Dimensional Gas-particle Flows. *Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics*, (1972).
- [8] Perter Lang and Bernhard Lenze, Gas-Solid Flow in a Model Smelting Cyclone, *Ger. Chem. Eng.*, 5(1982), 351—365.

INVESTIGATION OF 3D FLOW FIELD IN VORTEX TYPE CYCLONE SEPARATOR

Ling Zhiguang

(Shanghai University of Engineering Science)

Huang Cunkui

(Institute of Engineering Thermophysics, Academia Sinica)

Abstract 3-Dimensional flow field and pressure distribution in vortex type cyclone separator are investigated in detail on a $\phi 196$ mm test model with 5-hole ballprobe under different first and secondary flow rate ratio and different shape of structure parts. The results show that the tangential velocity profile follows quasi forced vortex distribution in the outer part of the separator but near the nozzle area it first decreases and then increases with the radius. Under original guide vane shape and certain flow rate regime, secondary vortex and reverse flow exist which explains the cause of appearing quasi stagnating dust ring. Mechanism of producing spiral shaped dust ring for achieving good performance is also analysed preliminarily.

Key words gas-particle separation, Cyclone, Separation, Vortex, gas-particle flow