

水力旋流器内固液两相间的相对运动(II)^①

——颗粒性质与液流特性的影响

徐继润 罗 茜[†]

(大连大学化学与化学工程系, 大连 116622)

[†] (东北大学资源与环境工程系, 沈阳 110006)

摘 要 根据该文第一部分导出的跟随性指标, 讨论了影响水力旋流器中固体颗粒与液流沿径向的相对运动的各种因素。这些因素包括流动方向(切向、轴向与径向)、颗粒性质(大小、密度)、空间位置(流动半径)、液流特性(流体切向速度与径向速度之比)等一系列参数。

关键词 水力旋流器 颗粒运动 颗粒性质 液流特性

中图法分类号 TQ021.1

在本文的第一部分^[1], 我们曾从经典的描述颗粒在液相中运动的BBO^[2]方程出发, 导出了表征水力旋流器内不同流动方向上固液两相间相对运动特性的跟随性指标。这种方法较之于通常的颗粒受力分析(即只考虑离心力、浮力、流体阻力)^[3]考虑了更多的影响因素, 尤其重要的是包含了流体湍流的信息, 因此从跟随性指标出发研究颗粒的运动特征应能更客观、更全面地反映水力旋流器内的实际情况。

如文献[1]所示, 水力旋流器中的固体颗粒与液流运动的跟随性与流动方向(切向、轴向与径向)、颗粒性质(大小、密度)、空间位置(流动半径)、流体性质(密度、粘度、湍流频率以及流体的切向速度与径向速度之比)等一系列参数有关。在文献[1]中, 我们已导出水力旋流器各个方向的跟随性指标 η (定义为颗粒复振幅与流体复振幅之比)与 ϕ (定义为颗粒相位与流体相位之差)的数学表达式。这里不拟列出有关公式, 而只简单说明 η 和 ϕ 的物理意义。若 $\eta=1$, $\phi=0$, 则颗粒与流体之间不存在相对运动; 若 $\eta>0$, 表示颗粒与流体同向运

动; 若 $\eta<0$, 表示颗粒运动方向与流体相反; 若 $\phi>0$, 说明颗粒在起动时间上超前; 若 $\phi<0$, 则颗粒在运动时间上滞后。 η 和 ϕ 的具体数值则可定量表示颗粒与流体间的跟随情况。

鉴于在旋流器切向以及不考虑重力影响的轴向, 固体颗粒与流体介质之间一般存在良好的跟随特性^[4], 因此本文将主要分析颗粒与流体在旋流器径向的相对运动, 所考虑的因素包括颗粒尺寸、颗粒密度、流动半径、液流的切向与径向速度之比等, 至于湍流问题限于篇幅将另文讨论。

1 颗粒性质对跟随性的影响

在其它参数恒定时, 颗粒粒度与密度对跟随性指标的影响分别如图1及图2所示, 其中跟随性指标的下标 r 表示沿水力旋流器的半径方向。如所预料, 随颗粒粒度及密度的增大, 颗粒与流体的跟随性下降。首先, 颗粒振幅与流体振幅之比 η 在符号上经历了从正到负的变化; 在绝对值上则先是逐渐减小, 变为

① 国家教委优秀年轻教师基金资助课题

收稿日期: 1997-11-25; 修回日期: 1998-03-23

徐继润, 男, 43岁, 博士, 教授

负数后又逐渐增大。符号的改变显然标志着颗粒运动方向的改变(即从较小颗粒的随流体向内运动转变为较大颗粒的向外沉降),绝对值的演变趋势显示跟随流体运动的小颗粒的振幅总是小于流体的振幅,而与流体作反向运动的大颗粒却可具有大于流体相应值的振幅(即大颗粒的沉降速度在数值上可大于流体的向内流动速度)。第二,颗粒在径向的运动滞后时间随颗粒粒度或密度的变化,具有双极值的特点,即在颗粒改变运动方向前后各有一个极值。随流体向内运动的颗粒需“提前”启动(即 $\phi_r > 0$),而与流体反向运动的颗粒在时间上才真正地“滞后”(即 $\phi_r < 0$)。

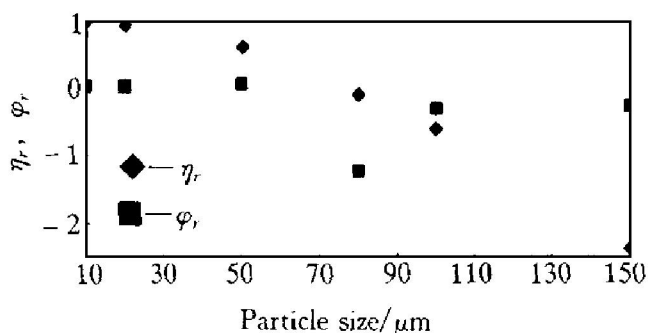


图1 跟随性与颗粒粒度的关系

Fig. 1 Follow-up parameters vs particle size

($r = 2 \text{ cm}$; $u_{\theta} = 320 \text{ cm/s}$; $\omega = 10/\text{s}$;

$\rho_p = 3.0 \text{ g/cm}^3$; $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$; $A_{\theta}/A_r = -10$)

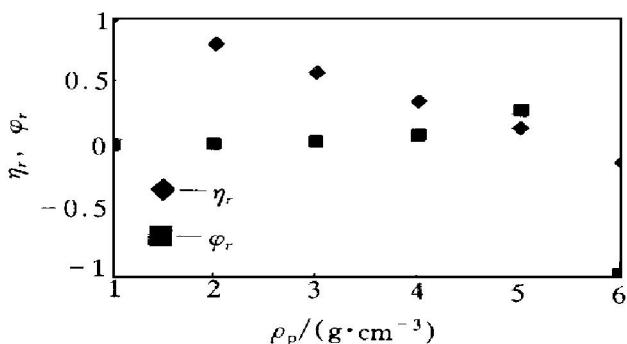


图2 跟随性与颗粒密度的关系

Fig. 2 Follow-up parameters vs particle density

($r = 2 \text{ cm}$; $u_{\theta} = 320 \text{ cm/s}$; $\omega = 10/\text{s}$;

$x = 50 \text{ }\mu\text{m}$; $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$; $A_{\theta}/A_r = -10$)

固体颗粒在径向与流体的跟随性随颗粒尺寸的增加及颗粒密度的增大而变差,这是容易

理解的,但颗粒振幅大于流体振幅,仍有进一步讨论的必要。首先,让我们看一下颗粒振幅大于流体振幅对相应的平均速度意味着什么。在文献[1]里,我们曾经证明:

$$\frac{\overline{u_{f\theta}}}{u_{fr}} = \frac{A_{\theta}}{A_r} \quad (1)$$

即流体的平均切向速度与径向速度之比等于相应方向上的湍流振幅之比。类似地,不难导出颗粒的平均速度与湍流振幅的关系为

$$\frac{\overline{u_{p\theta}}}{u_{pr}} = \frac{\eta_{\theta} A_{\theta}}{\eta_r A_r} \quad (2)$$

式中的下标 θ , r 分别表示旋流器的切向与径向,下标 p 与下式的下标 f 分别表示颗粒与流体介质。将式(1)代入式(2),得

$$\frac{\overline{u_{p\theta}}}{u_{pr}} = \frac{\eta_{\theta} \overline{u_{f\theta}}}{\eta_r \overline{u_{fr}}} \quad (3)$$

由于平均速度与 ω 无关,故 η_{θ}/η_r 亦应与 ω 无关,尽管 η_{θ} 或 η_r 自身各是 ω 的函数。因此 η_{θ}/η_r 可用某一常数代替之。最简单的方法是将 η_{θ} , η_r 与它们各自的平均值联系起来。由平均值的定义,有

$$\frac{\overline{\eta_{\theta}}}{\overline{\eta_r}} = \frac{\lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_{\theta}(\omega) f(\omega) d\omega}{\lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_r(\omega) f(\omega) d\omega} \quad (4)$$

这里 $f(\omega)$ 为湍流频率的分布密度函数。若

$$\frac{\overline{\eta_{\theta}}}{\overline{\eta_r}} = \frac{\eta_{\theta}}{\eta_r} \quad (5)$$

则式(4)恒能成立。将式(5)代入式(3),并考虑到 $\overline{\eta_{\theta}} \approx 1$, $\overline{u_{p\theta}} \approx \overline{u_{f\theta}}$, 从而有

$$\overline{u_{pr}} \approx \overline{\eta_r} \overline{u_{fr}} \quad (6)$$

可见,颗粒在径向脉动幅度的增大意味着颗粒径向速度的增加。第二,颗粒在切向与轴向,无论是速度还是时间都滞后于流体的运动^[4],但在径向却有时表现出速度的超出,这一现象可解释如下。与切向及轴向的情况不同,颗粒在半径方向受 Stokes 阻力等作用的同时,还受到离心力的作用,而且后者往往更为重要。我们知道,颗粒沿径向的沉降速度 u_{pr} 等于流体径向速度 u_{fr} 与颗粒在静止流体中的离心沉降速度 u_{t0} 的代数和,若 u_{t0} 在数值上是

u_{fr} 的两倍以上(对粒度足够大的颗粒这是完全可能的), 则颗粒的沉降速度(方向与流体运动相反) u_{pr} 就会大于流体速度 u_{fr} , 从而表现为跟随性指标 η_r 的绝对值大于 1。从图 2 还可看到, 当颗粒密度与流体密度相等(即 $\rho_p = 1$) 时, 颗粒运动与流体完全同步($\eta_r = 1, \varphi_r = 0$), 这是意料之中的。

2 径向位置对跟随性的影响

如前所述, 在水力旋流器的半径方向, 由于离心力的作用, 颗粒与流体的运动跟随性下降。而离心力的大小是流动半径的函数, 因此径向的跟随性指标必然随流动半径而异, 具体计算结果如图 3 所示(图中不同半径处的流体切向速度按公式 $u_\theta r^n = k$ 算出, 并取 $n = 0.5$ 及 $r = 2 \text{ cm}$ 处的 u_θ 为 320 cm/s)。从图可见, 跟随性随半径的增大而改善(表现为颗粒振幅在方向与数值两方面逐渐接近流体的振幅), 这是因为颗粒所受的离心力与半径成反比的缘故。就微细粒级来说, 我们希望其在旋流器边壁处仍与流体介质有良好的跟随性, 从而可借助介质流动而被“清洗”出来。计算表明, 在直径为 80 mm 的旋流器边壁处, $10 \mu\text{m}$ 的颗粒向内的运动速度仍与介质相当($\eta_r = 0.9912$)。

3 流体的切向与径向振幅之比对跟随性的影响

由于流体的切向与径向湍流振幅之比 A_θ/A_r 等于流体在相应方向上的平均速度之比, 因此 A_θ/A_r 对颗粒跟随性的影响反映的是切向与径向速度的比值与跟随性的关系。从图 4 (其中 A_θ/A_r 之所以取负值是因为流体的径向速度与径向坐标 r 的方向相反) 可见, 随 A_θ/A_r 绝对值的增大, 颗粒与流体的跟随性变差。在切向速度一定的时候, A_θ/A_r 的增大意味着流体径向速度的减小, 于是颗粒的沉降加快, 固液两相间的跟随性当然下降。

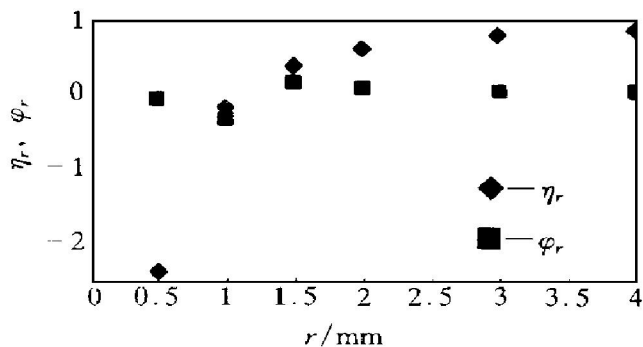


图 3 跟随性与流动半径的关系

Fig. 3 Follow-up parameters vs flow radius

($\omega = 10/\text{s}$; $x = 50 \mu\text{m}$; $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$;
 $\rho_p = 3.0 \text{ g/cm}^3$; $A_\theta/A_r = -10$)

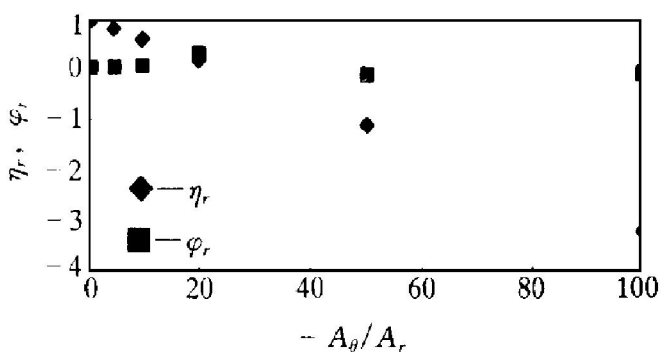


图 4 跟随性与 A_θ/A_r 的关系

Fig. 4 Follow-up parameters vs A_θ/A_r

($r = 2 \text{ cm}$; $\omega = 10/\text{s}$; $x = 50 \mu\text{m}$;
 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$; $\rho_p = 3.0 \text{ g/cm}^3$; $u_\theta = 320 \text{ cm/s}$)

4 结语

利用从 BBO 方程结合水力旋流器内的流场情况而导出的跟随性指标, 可对旋流器内固体颗粒与液体介质之间的相对运动进行定量考察, 进而揭示各种因素的影响规律, 可为研究实验上难以测定的颗粒运动提供一些定性与定量的参考, 这方面工作的深入进行应该说是很有意义的。当然, 这种考察也存在某种局限性。例如, 为分析颗粒的径向跟随, 我们需预先确定流体的切向振幅与径向振幅之比(亦即切向速度与径向速度之比), 而这一比值的确定并非易事, 因为关于径向速度的大小迄今尚无定论(这一点从若干文献的比较^[5-8]可见端

倪)。

在此,我们想说明这样一个问题,即 BBO 方程与常用的计算颗粒离心沉降速度的公式^[3]之间的联系与区别。在 BBO 方程中,若不计速度随时间的变化,则整理可得沉降速度公式。而不计颗粒及流体的运动速度随时间的变化,实际上是把 BBO 方程中的瞬时速度用平均速度代替了,这样客观存在的湍流脉动对流体及颗粒运动的影响便不能体现出来。因此,如果说,为求得颗粒的沉降速度只需简单地应用沉降公式就可以的话,为考察颗粒对不同频率流体湍流的跟随特性就必须运用 BBO 方程,这一点在本文的第三部分将进一步体现出来。

REFERENCES

1 Xu Jirun(徐继润) and Luo Qian(罗茜). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学

报), 1998: 8(3): 487.

- 2 Hinze J O ed, Huang Yongnian(黄永念) and Yan Dachun(颜大椿) transl. Turbulence(湍流). Beijing: Science Press, 1985.
- 3 Svarofsky L. Hydrocyclones. London: Holt, Rinehart and Winston Ltd, 1984.
- 4 Xu Jirun(徐继润) and Luo Qian(罗茜). Flow Field Theory in Hydrocyclones(水力旋流器流场理论). Beijing: Science Press, 1998.
- 5 Kelsall D F. Trans Inst Chem Eng, 1952, 30: 87-104.
- 6 Luo Qian, Deng Changlie, Xu Jirun *et al.* Inter J Miner Process, 1989, 25: 297-310.
- 7 Chu Liangyin and Luo Qian. Trans Nonferrous Met Soc China, 1994, 4(4): 20-24.
- 8 Ji Hua, Mao Yu and Shi Mingxian. In: Xi Yingben ed. The 3rd China-Japan Int Conf on Filtr & Sep. Wuxi: Chinese Mechanical Engineering Society and Society of Chemical Engineers Japan, 1997, 360-365.

RELATIVE MOTION BETWEEN SOLID PARTICLES AND LIQUID MEDIUM IN HYDROCYCLONES

PART II: EFFECT OF PARTICLE FEATURES AND FLOW FIELD CHARACTERISTICS

Xu Jirun and Luo Qian[†]

*Department of Chemical Engineering, Dalian University,
Dalian 116622, P. R. China*

[†]*Department of Resources and Environment Engineering, Northeastern University,
Shenyang 110006, P. R. China*

ABSTRACT According to the parameters derived in the authors' previous work, the effect of some factors on the relative motion between solid particles and liquid medium in hydrocyclones was discussed. The examined factors included the flow direction (tangential, vertical and radial), particle features (size and density), space position (radius) and flow field characteristics (ratio of tangential to radial velocities). As for the important turbulence frequency, a detailed report will be given in the next issue of the magazine.

Key words hydrocyclones particle motion particle features flow field characteristics

(编辑 袁赛前)