

基于气泡轨迹模型研究动压式油气分离器的分离性能^{*}

张小彬, 朱卫兵, 杨春苗, 杨 旭

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了研究航空发动机滑油系统中的关键部件动压式油气分离器的分离性能, 采用气泡轨迹模型研究了滑油流量、进口处滑油的切向速度和分离器直径对滑油区内气泡分离效率的影响。结果表明: 增大进口处滑油的切向速度能够提高分离性能; 当滑油流量在4~20L/min变化时, 筒径为15mm的分离器的分离性能最佳; 滑油沿分离器筒体方向的平均轴向速度小于0.35m/s时, 分离器的分离效率随滑油流量增大而增大; 滑油沿分离器筒体方向的平均轴向速度大于0.35m/s时, 分离器的分离效率随滑油流量增大而减小。

关键词: 气泡轨迹模型; 油气两相; 分离性能

中图分类号: V233.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 08-1016-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.08.002

Study on Performance of Dynamic Pressure Oil-Gas Separator Using Bubble Trajectory Model

ZHANG Xiao-bin, ZHU Wei-bing, YANG Chun-miao, YANG Xu

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to study the separation performance of the dynamic pressure oil-gas separator, a crucial part in lubricating system of aero engine, bubble trajectory model is used to study the effect of rate of flow, tangential velocity of flow at the inlet and diameter of the separator on the separation efficiency. The results show that when the flow rate of oil changes in 4~20L/min, the separator can reach the best separation performance as the diameter of separator is 15mm. When the average axial velocity of oil is less than 0.35m/s, the separation efficiency of the separator increases with the increase of the flow rate of oil. When the average axial velocity of oil is greater than 0.35m/s, the separation efficiency of the separator decreases with the increase of the flow rate of oil.

Key words: Bubble trajectory model; Oil-gas two-phase; Separation performance

符号说明:

Δz — Δt 时间内轴向位移, m

Δr — Δt 时间内径向位移, m

u_{bz} — 气泡的轴向速度, m/s

u_{br} — 气泡的径向速度, m/s

r_{rev} — 气芯柱的半径, m

R_{sep} — 分离器的半径, m

u_z — 滑油的轴向速度, m/s

u_r — 滑油的径向速度, m/s

u_{sz} — 气泡的轴向滑移速度, m/s

u_{sr} — 气泡的径向滑移速度, m/s

ρ_l — 滑油的密度, kg/m³

u_t — 滑油的切向速度, m/s

* 收稿日期: 2013-04-04; 修订日期: 2013-10-25。

作者简介: 张小彬 (1979—), 男, 博士生, 讲师, 研究领域为流体流动与传热。E-mail: zhangxiaobin@hrbeu.edu.cn

u_{av} —滑油的轴向平均速度, m/s

M_i —进口处滑油切向动量, $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$

I —进口因子

M_T —进口处滑油轴向动量, $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$

Re —雷诺数

u_{is} —进口处滑油的切向速度, m/s

n —进口个数, 文中 $n=1$

μ_1 —滑油的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

C_d —滑油对气泡的拖曳系数

$u_{sl}(r)$ —气泡的合成滑移速度

d_b —气泡的直径, m

d_{100} —能 100% 分离的最小气泡的直径, m

1 引言

动压式油气分离器是小型航空发动机滑油系统中对混入空气的滑油进行除气的装置。利用油气混合物旋转运动产生的离心力对油气分离, 具有结构简单紧凑、内部无旋转部件、不需要消耗外功等优点。以实验数据为基础建立的机理模型是研究该类分离器内的流动情况、分离特性以及确定分离器设计准则的主要手段。目前, 国内对该类分离器的研究报道较少, 只是对分离器的分离原理, 设计控制原则有粗略的描述^[1]。国外 TUISA 大学成立的分离技术小组 (TUSTP) 对管柱式气液分离器 (GLCC) 的研究取得一定进展^[2-4]。Arpand 针对出气管夹带液滴现象, 建立 GLCC 工作范围的预测模型^[2]。Mantilla 修正了多水平入口分离器内的漩涡强度模型、速度场预测模型、气泡轨迹模型等^[3]。Gomez 建立了分离器入口流型预测模型^[4]、喷口流速计算模型^[4]以及湍动能和回流区稳定性的预测模型^[5], 给出了分离器尺寸的确定方法^[6], 并建立了分离器性能预测和设计的模拟器^[7]。Erdal 考虑分离器入口段的差异, 修正了漩涡强度模型和气芯柱半径计算模型, 建立了回流区波长 (Wavelength) 计算模型^[8]。本文结合 GLCC 内的机理模型, 对动压式油气分离器的滑油区建立气泡轨迹模型, 并利用该模型研究进口处滑油的切向速度, 分离器直径和滑油流量对滑油区气泡分离效率的影响, 实现对分离器性能的预测。

2 分离器内的流动现象

本文研究的动压式油气分离器由单个倾斜切向的入口段、筒体、出油管 and 出气管四部分组成 (如图 1)。油气混合物经入口段在筒体内沿壁面高速旋转, 大部分空气快速聚集在筒体中心区并从出气管流出, 滑油则沿着壁面旋转向下运动, 分离器进口附近由于油气的快速分离出现了一个旋涡状的气液界面, 界面以上主要是气体, 称为空气区, 界面以下主要是滑油, 称为滑油区。滑油区内含有少量气

泡, 这些气泡一方面在离心力作用下沿径向向筒体中心运动, 另一方面在滑油拖曳力的作用下沿轴向向出油管流出, 如果气泡径向到达筒体中心的时间小于轴向进入出油管的时间, 气泡会在分离器中心聚合成气芯柱, 从而实现分离。反之, 气泡则随滑油流出出油管, 未实现分离。

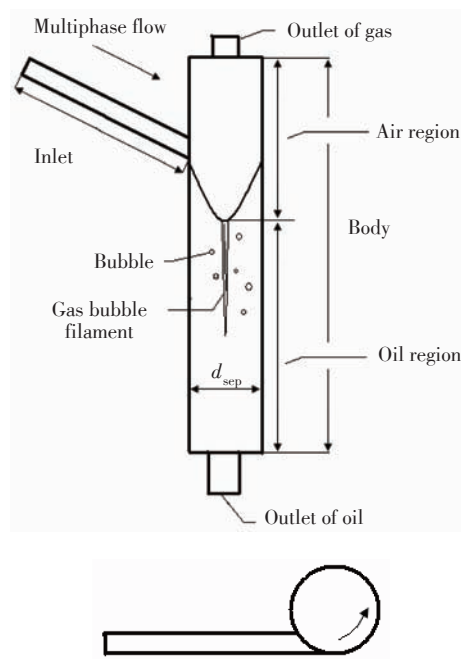


Fig. 1 Model of separator

3 气泡轨迹模型的建立

气泡轨迹模型是计算滑油区内气泡的运动轨迹, 该模型采用拉格朗日方法建立, 忽略湍流、气泡破碎和聚合的影响。气泡轨迹模型是通过计算气泡在滑油中的运动轨迹来判断气泡的分离情况的, 1998 年 Erdal 使用二维模型模拟了分离器内单相流的流场特点和两相流中的气泡轨迹。文中研究了湍流耗散、气泡直径、切向速度和分离器长度对分离效率的影响, 并且能够很好的和事实相符, 说明了气泡轨迹模型可以作为分离器模拟的有效方法。

图 2 给出了气泡在 t 和 $t + \Delta t$ 时刻的位置, 设气

泡在 t 时刻的径向速度为 u_{br} , 轴向速度为 u_{bz} , 故 Δt 时间内, 气泡的轴、径向位移为

$$\begin{cases} \Delta z = u_{bz} \Delta t \\ \Delta r = u_{br} \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中 Δz , Δr 为 Δt 时间内轴、径向位移(m), u_{bz} , u_{br} 为气泡的轴、径向速度(m/s)。

消去时间项得到方程为

$$\Delta z = \frac{u_{bz}}{u_{br}} \Delta r \quad (2)$$

气泡轨迹计算的起点是气液界面以下的壁面处, 终点是气芯柱半径位置。则气泡的运动轨迹方程为

$$z = \sum_{R_{sep}}^{r_{rev}} \left(\frac{u_{bz}}{u_{br}} \right) \Delta r \quad (3)$$

式中 r_{rev} 为气芯柱的半径(m), R_{sep} 为分离器的半径(m)。

气泡的轴、径向速度为

$$u_{bz} = u_z - u_{sz}, \quad u_{br} = u_r - u_{sr} \quad (4)$$

式中 u_z , u_r 为滑油的轴、径向速度(m/s), u_{sz} , u_{sr} 为气泡的轴、径向滑移速度(m/s)。

将式(4)带入式(3)得

$$z(r) = \sum_{R_{sep}}^{r_{rev}} \left(\frac{u_z - u_{sz}}{u_r - u_{sr}} \right) \Delta r \quad (5)$$

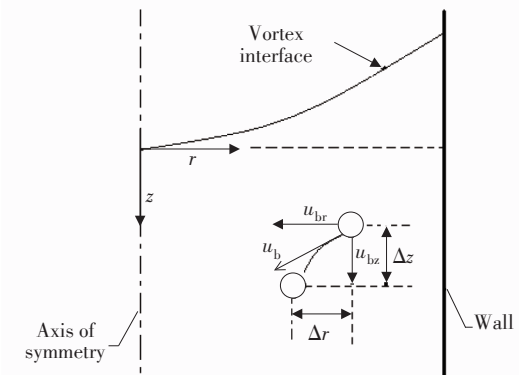


Fig. 2 Bubble trajectory

由式(5)可知, 气泡的运动轨迹取决于滑油的速度分布、气泡的滑移速度分布以及气芯柱半径位置。因此滑油区滑油的流动状态对气泡分离有很大的影响, 滑油旋转速度越大, 离心力越大, 气泡越容易分离。旋流强度、滑油的速度分布是描述滑油运动状态的主要参数。

3.1 旋流强度

由于粘性耗散和壁面摩擦阻力的影响, 滑油在

筒体内旋转强度沿轴向逐渐减小, 旋流强度用来表征旋流场的衰减特性^[9], 旋流强度定义为某一轴向位置上滑油切向动量通量与轴向动量通量的比值。

$$\Omega = \frac{2\pi \int_0^{R_{sep}} u_z u_r r dr}{\pi \rho_l R_{sep}^2 u_{av}^2} \quad (6)$$

式中 ρ_l 为滑油的密度(kg/m^3), u_r 为滑油的切向速度(m/s), u_{av} 为滑油的轴向平均速度(m/s)。

旋流强度的经验关系式按照文献[8]给出, 当 $z/(2R_{sep}) \geq 2$ 时

$$\Omega = 0.67 Re^{0.13} \left(\frac{M_t}{M_T} I^2 \right)^{0.93} \exp \left[-0.5 \left(\frac{M_t}{M_T} I^4 \right)^{0.35} (Re)^{-0.16} \left(\frac{z}{2R_{sep}} \right)^{0.7} \right] \quad (7)$$

式中 M_t , M_T 为进口处滑油切、轴向动量($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$), I 为进口因子, Re 为雷诺数。

进口处滑油的切向与轴向动量的比值 M_t/M_T 计算公式为

$$\frac{M_t}{M_T} = \frac{u_{tis}}{u_{av}} \quad (8)$$

式中 u_{tis} 为进口处滑油的切向速度(m/s)。

进口因子的计算公式为

$$I = 1 - \exp \left(-\frac{n}{2} \right) \quad (9)$$

式中 n 为进口个数, 文中 $n=1$ 。

雷诺数的计算公式为

$$Re = \frac{2\rho_l u_{av} R_{sep}}{\mu_l} \quad (10)$$

式中 μ_l 为滑油的动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

3.2 切向速度分布

滑油在分离器内的旋转运动是由分离器中心处的强制涡和壁面处的自由涡组成。故滑油的切向速度由三部分组成: 分离器中心的强制涡区, 壁面处的自由涡区以及两区之间的过度区, 滑油的切向速度分布表达式^[10]为

$$\begin{cases} \frac{u_r}{u_{av}} = \frac{T_m}{\left(\frac{r}{R_{sep}} \right)} \left\{ 1 - \exp \left[-B \left(\frac{r}{R_{sep}} \right)^2 \right] \right\} \\ T_m = 0.9\Omega - 0.05 \\ B = 3.6 + 20 \exp \left(-\frac{\Omega}{0.6} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中 T_m , B 为关于旋流强的参数。

3.3 轴向速度分布

文献[3]中证明了滑油的轴向速度分布可以采用 r 的三次多项式描述,采用忽略边界层的边界条件得到的轴向速度与文献[9, 11, 12]的实验数据一致,轴向速度分布表达式为

$$\begin{cases} \frac{u_z}{u_{av}} = \frac{2}{C} \left(\frac{r}{R_{sep}} \right)^3 - \frac{3}{C} \left(\frac{r}{R_{sep}} \right)^2 + \frac{0.7}{C} + 1.0 \\ C = \left(\frac{r_{rev}}{R_{sep}} \right)^2 \left(3 - 2 \left(\frac{r_{rev}}{R_{sep}} \right) \right) - 0.7 \\ \frac{r_{rev}}{R_{sep}} = 0.23\Omega^{0.33} \end{cases} \quad (12)$$

3.4 径向速度分布

滑油的径向速度分布可根据连续方程推导得出,连续方程为

$$u_r = \frac{1}{r} \int_0^r \frac{\partial(ru_z)}{\partial z} dr \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)得到滑油的径向速度计算式

$$\begin{cases} \frac{u_r}{u_{av}} = \left[64 \left(\frac{r}{R_{sep}} \right)^4 - 60 \left(\frac{r}{R_{sep}} \right)^3 - 11 \left(\frac{r}{R_{sep}} \right)^2 + 7 \left(\frac{r}{R_{sep}} \right) \right] \cdot \\ \left[-\frac{R_{sep}}{20C^2} \left(\frac{dC}{d(r_{rev}/R_{sep})} \right) \right] \\ \frac{dC}{d(r_{rev}/R_{sep})} = 2 \left(\frac{r_{rev}}{R_{sep}} \right) \left[3 - 2 \left(\frac{r_{rev}}{R_{sep}} \right) \right] dR_{rev} - \\ 2 \left(\frac{r_{rev}}{R_{sep}} \right)^2 \frac{d(r_{rev}/R_{sep})}{d\Omega} \\ \frac{d(r_{rev}/R_{sep})}{d\Omega} = 0.0759\Omega^{-0.67} \frac{d\Omega}{dz} \\ \frac{d\Omega}{dz} = -\frac{0.35}{z} Re^{-0.16} \left(\frac{M_t}{M_T} I^4 \right)^{0.35} \left(\frac{z}{d_{sep}} \right)^{0.7} \Omega \end{cases} \quad (14)$$

3.5 气泡的滑移速度

根据气泡在滑油中的受力平衡^[3],得到气泡的轴、径向滑移速度表达式为

$$\begin{cases} u_{sz}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right) g \frac{d_b}{C_d} \frac{1}{u_{sb}(r)} \\ u_{sr}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right) \frac{u_{t1}^2 d_b}{r C_d} \frac{1}{u_{sb}(r)} \end{cases} \quad (15)$$

式中 C_d 为滑油对气泡的拖曳系数, $u_{sb}(r)$ 为气泡的合成滑移速度,计算式为 $u_{sb}(r) = \sqrt{u_{sz}^2(r) + u_{sr}^2(r)}$, m/s。

拖曳系数采用文献[11]提出的关系式求解

$$C_d = \frac{16}{Re_b} \left\{ 1 + \left[\frac{8}{Re_b} + \frac{1}{2} (1 + 3.315 Re_b^{-0.5}) \right]^{-1} \right\} \quad (16)$$

气泡的雷诺数的计算公式为

$$Re_b = \frac{\rho_l d_b u_{sb}}{\mu_l} \quad (17)$$

式中 d_b 为气泡的直径,单位m。

4 计算条件

分离器直径、滑油流量和进口处滑油的切向速度是影响气泡分离效率的关键参数,本文采用气泡轨迹模型研究上述参数对气泡的分离效率的影响,通过公式计算得出滑油区的长度约为分离器直径的5倍,滑油和空气流量及物性参数根据文献及工程实际给出。表1给出了参数的变化范围,表2给出了滑油和空气的物性参数。

Table 1 Range of variables

Diameter of the separator d_{sep}/mm	10	15	20	25	30
Flow of the oil $q_l/(\text{L}/\text{min})$	4~20				
Inlet tangential velocity $u_{tis}/(\text{m}/\text{s})$	5~25				

Table 2 Value of oil and air

Density of the oil $\rho_l/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Density of the air $\rho_g/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Dynamic viscosity of the oil $\mu_l/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
972.2	0.746	0.00148

5 分离特性分析

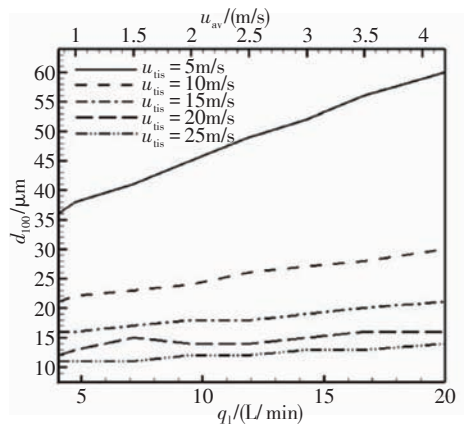
气泡轨迹模型用于计算滑油区气泡的运动轨迹,但对于分离器尺寸确定,滑油和空气的物性参数以及进口流动参数已知的情况下,气泡轨迹模型可以计算出能够100%分离的最小气泡的直径,该直径称为临界气泡直径,用 d_{100} 表示,因此, d_{100} 能够代表滑油区气泡的分离效率,进而反映分离器的分离效率,临界气泡直径越小反映了分离器的分离效率越高。

影响气泡分离的主要因素有两个:滑油旋转运动产生的离心力和气泡在分离器内的停留时间。滑油旋转离心力是气泡分离的动力,气泡在分离器内的停留时间是分离过程进行的必要条件。滑油旋转离心力的计算式为 $F_c = 2\rho_l q_l u_{tis}^2 / d_{sep}$,可见 F_c 与 q_l , u_{tis} 的平方呈正比, d_{sep} 呈反比。气泡在分离器内停留时间的计算式为 $\Delta t = L/u_{av}$ (L 是滑油区的长度, $u_{av} = 4q_l / \pi d_{sep}^2$),可见 Δt 与 q_l 呈反比, d_{sep} 的平方呈正比。本文将分析对比 q_l , d_{sep} 和 u_{tis} 三个因素对 d_{100} 的

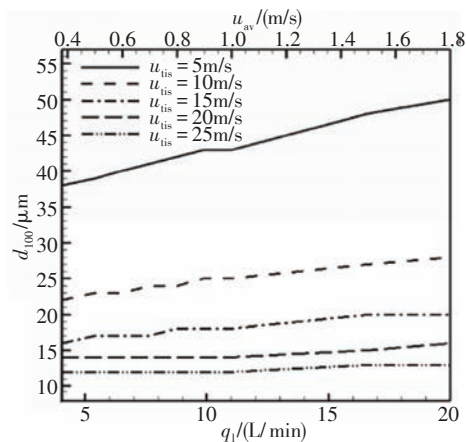
影响。三种因素对分离效率的影响曲线见图3和图4。

5.1 滑油流量 q_l 对 d_{100} 的影响

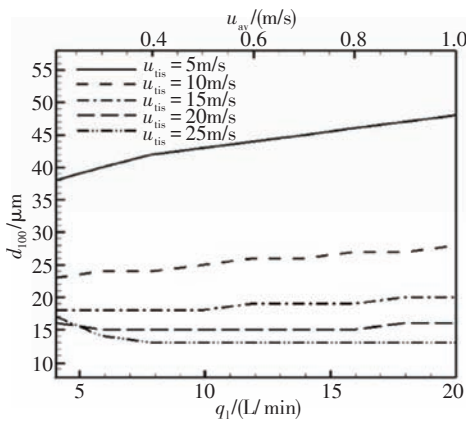
随着滑油流量 q_l 的增大,一方面增大了离心力 F_c ,促进了气泡分离,另一方面缩短了停留时间 Δt ,不利于气泡分离。由图3可以看出,当 $u_{av} > 0.35 \text{ m/s}$ 时, d_{100} 随 q_l 的增大而增大;当 $u_{av} < 0.35 \text{ m/s}$ 时, d_{100} 随 q_l 的增大而减小。分析认为:当 $u_{av} < 0.35 \text{ m/s}$ 时, $\Delta t > L/0.35 \text{ s}$,保证了足够的 Δt ,而较大的 u_{tis} 使 F_c 随 q_l 的



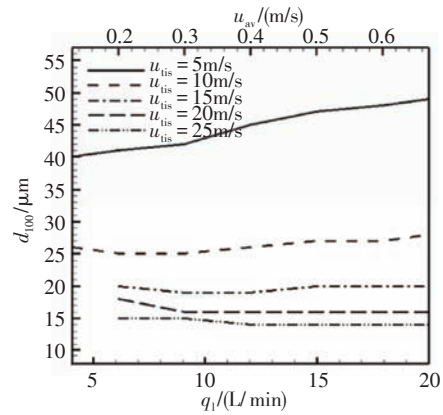
(a) $d_{sep} = 10 \text{ mm}$



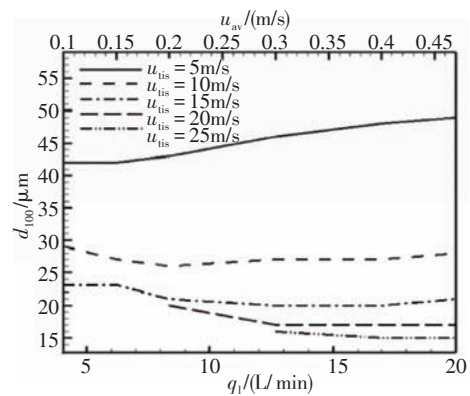
(b) $d_{sep} = 15 \text{ mm}$



(c) $d_{sep} = 20 \text{ mm}$

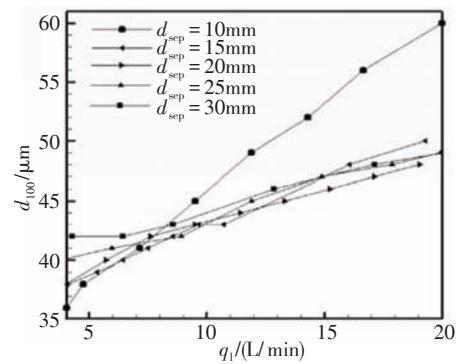


(d) $d_{sep} = 25 \text{ mm}$

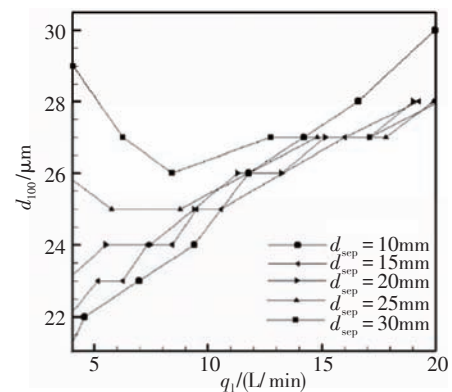


(e) $d_{sep} = 30 \text{ mm}$

Fig. 3 Effects of the rate of flow q_l and the tangential velocity u_{tis} on d_{100}



(a) $u_{tis} = 5 \text{ m/s}$



(b) $u_{tis} = 10 \text{ m/s}$

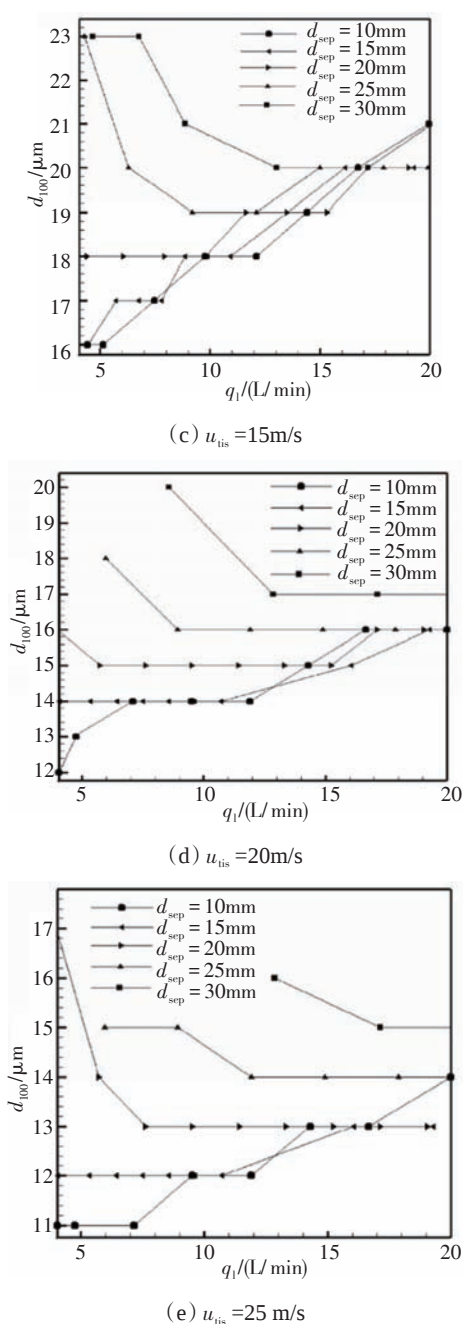


Fig. 4 Effects of the rate of flow q_1 and the diameter of separator d_{sep} on d_{100}

增大而增大的越明显。故 q_1 的增大对 F_c 的影响大于对 Δt 的影响,因此 d_{100} 随 q_1 增大而减小,分离效率随 q_1 增大而升高;当 $u_{tis} > 0.35\text{m/s}$ 时, q_1 增大对 Δt 的影响大于对 F_c 的影响,故 d_{100} 随 q_1 增大而增大,分离效率随 q_1 增大而降低。

5.2 滑油切向速度 u_{tis} 对 d_{100} 的影响

由离心力的计算式 $F_c = 2\rho_1 q_1 u_{tis}^2 / d_{sep}$ 可知 F_c 与

u_{tis} 的平方呈正比,故 u_{tis} 的增大促进气泡分离。

由图3可以看出:

(1)较大的 u_{tis} 一方面降低了 d_{100} ,另一方面使 q_1 的变化对 d_{100} 的影响变小; u_{tis} 增大, F_c 增大, Δt 没影响。

(2)随着切向速度 u_{tis} 的增大, d_{100} 逐渐减小,说明增大切向速度 u_{tis} 能提高分离器的分离性能。但当 u_{tis} 增大到一定程度, d_{100} 的减小变得困难,分离性能提高变得困难。 $u_{tis} > 10\text{m/s}$ 时,分离效率较高,且分离效率随 q_1 变化已经很小,分离器的分离性能已经很稳定了。

(3)当 u_{tis} 较小时, d_{sep} 较大的分离器分离性能较好, u_{tis} 较大时, d_{sep} 较小的分离器分离性能较好。分析认为: u_{tis} 较小时,气泡分离主要取决于 Δt , d_{sep} 较大的分离器内 u_{av} 较小, Δt 充足,故 d_{sep} 较大的分离器有利于气泡分离;当 u_{tis} 较大时,气泡分离主要取决于 F_c , d_{sep} 较小的分离器提供的 F_c 最大,能够在很短的时间内实现油气的分离。

5.3 分离器筒径 d_{sep} 对 d_{100} 的影响

图4(a)看出:当 $u_{tis} = 5\text{m/s}$ 时,在 q_1 的变化范围内,不同直径分离器的 d_{100} 随 q_1 增大而增大,其中 $d_{sep} = 10\text{mm}$ 的分离器 d_{100} 变化最大,分离效率随 q_1 不稳定,其余4个分离器的 d_{100} 变化较小。故 $u_{tis} = 5\text{m/s}$ 时, $d_{sep} \in [15 \sim 30]\text{mm}$ 的分离器分离性能较好。

图4(b)看出:当 $u_{tis} = 10\text{m/s}$ 时, $d_{sep} = 30\text{mm}$ 的分离器在 q_1 最小时 d_{100} 最大, $d_{sep} = 10\text{mm}$ 的分离器在 q_1 最大时 d_{100} 最大, $d_{sep} \in [15 \sim 25]\text{mm}$ 的分离器 d_{100} 居中。故 $u_{tis} = 10\text{m/s}$ 时, $d_{sep} \in [15 \sim 25]\text{mm}$ 的分离器分离性能较好。

图4(c)看出:当 $u_{tis} = 15\text{m/s}$ 时,5个直径分离器的 $d_{100} \in [16 \sim 23]\mu\text{m}$,即 d_{sep} 对分离效率的影响很小;在 q_1 小的情况下, $d_{sep} \in [25 \sim 30]\text{mm}$ 分离器的 d_{100} 比 $d_{sep} \in [10 \sim 20]\text{mm}$ 分离器的 d_{100} 大, $d_{sep} \in [10 \sim 20]\text{mm}$ 的分离器中 d_{100} 在整个 q_1 范围内很接近,故 $u_{tis} = 15\text{m/s}$ 时, $d_{sep} \in [10 \sim 20]\text{mm}$ 的分离器分离性能较好。

图4(d)和4(e)看出:当 $u_{tis} = 20\text{m/s}$ 和 $u_{tis} = 25\text{m/s}$ 时,5个直径分离器的 $d_{100} \in [11 \sim 20]\mu\text{m}$,即 d_{sep} 对分离效率的影响很小;在整个 q_1 变化范围内, $d_{sep} \in$

[20~30]mm分离器的 d_{100} 比 $d_{sep} \in [10 \sim 15]$ mm分离器的 d_{100} 大,故 $u_{tis}=20\text{m/s}$ 和 $u_{tis}=25\text{m/s}$ 时, $d_{sep} \in [10 \sim 15]$ mm的分离器分离性能较好。

综上分析可得: $q_1 \in [4 \sim 20]\text{L/min}$ 时, $d_{sep}=15\text{mm}$ 的分离器分离性能最佳。

6 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)分离器的分离性能受进口处滑油的切向速度的影响,增大进口处滑油的切向速度可以提高分离效率,但当进口处滑油的切向速度增大到一定程度时,分离性能提高速度减缓。

(2)当滑油流量在4~20L/min范围内变化,平均轴向速度小于0.35m/s时,流量增加对离心力的影响大于对气泡停留时间的影响,故分离效率随滑油流量增大而升高。当滑油平均轴向速度大于0.35m/s时,流量增加对气泡停留时间的影响大于对离心力的影响,故分离效率随滑油流量增大而降低。

(3)当进口处滑油的切向速度较小时,大直径分离器的分离性能较好;进口处滑油的切向速度较大时,小直径分离器的分离性能较好。

(4)当滑油流量在4~20L/min范围内变化时,筒径为15mm的分离器的分离性能最佳。

参考文献:

- [1] 航空工业总编委会编.《航空发动机设计手册》第12册[M].北京:航空工业出版社.2002.
- [2] Arpandi I A, Joshi A R, Shoham O, et al. Hydrodynamics of Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators [C]. Dallas: the SPE 70th Annual Meeting, 1995.
- [3] Ferhat M Erdal, Ivan Mantilla, Siamack A Shirazi, et al. Flow Field Prediction and Bubble Trajectory Model in GLCC Separators [C]. Huston: Texas, Energy Sources Technology Conference & Exhibition, 1999.
- [4] Gomez L E, Mohan R, Shoham O, et al. Enhanced Mechanistic Model and Field Application Design of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separator [C]. New Orleans: Louisiana, the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1998.
- [5] Gomez L E. Swirling Gas-Liquid Two-Phase Flow-Experiment and Modeling Part II: Turbulent Quantities and Core Stability [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(11): 935-942.
- [6] Gomez L E. Aspect Ratio Modeling and Design Procedure for GLCC Compact Separators [J]. ASME Journal of Energy Resources Technology, 1999, 121(15):1-14.
- [7] Gomez L E, Mohan R, Shoham O, et al. State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators [C]. Huston: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1999.
- [8] Ferhat M Erdal, Siamack A Shirazi. Local Velocity Measurement and Computational Fluid Dynamics Simulation of Swirling Flow in A Cylindrical Cyclone Separator [C]. Texas: Engineering Technology Conference on Energy, 2001.
- [9] F Chang, V K Dhir. Turbulent Flow Field in Tangentially Injected Swirl Flows in Tubes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1994, 15(5): 346-356.
- [10] A H Algifri, R K Bhardwaj, Y V N Rao. Eddy Viscosity in Decaying Swirl Flow in a Pipe [J]. Applied Scientific Research, 1988, 45(4): 287-302.
- [11] Kitoh O. Experimental Study of Turbulent Swirling Flow in a Straight Pipe [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 225: 445-479.
- [12] Alfred H Nissan, V P Bresan. Swirling Flow in Cylinders [J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 1961, 7(4): 543-547.
- [13] Mei R, Klausner J F, Lawrence C I. A Note on the History Force on a Spherical Bubble at Finite Reynolds Number [J]. Physics of Fluids, 1994, 6(1): 418-420.

(编辑:朱立影)