

叶轮式通风器分离效率计算方法

张小彬, 朱卫兵, 张崇龙, 胡 亮
(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为研究叶轮式通风器分离特性并建立满足工程设计要求的分离效率计算方法,在对油滴进行了受力分析后,推导了油滴运动轨迹模型,结合油滴捕获条件,给出了不同工况条件下油滴的最小分离直径,进而实现了叶轮式通风器分离效率的理论计算。研究表明:在不同转速、通风量和通风器入口温度时,分离效率和最小分离直径计算值与实验值趋势一致;分离效率最大误差分别为 0.95%、1.01%和 1.01%;最小分离直径最大误差分别为 1.33%、2.29%和 6.20%。计算结果与实验结果吻合较好,该方法可为叶轮式通风器设计及分离性能优化提供参考。

关 键 词: 叶轮式通风器; 运动方程; 最小分离直径; 分离效率; 分离特性

中图分类号: V233.4 **文献标志码:** A

Calculation method to separation efficiency of impeller type ventilation

ZHANG Xiaobin, ZHU Weibing, ZHANG Chonglong, HU Liang
(College of Aerospace and Civil Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to investigate its separation performance and establish the method for calculating the separation efficiency compliant with the requirements of engineering design, stress analysis of oil droplet was conducted, the trajectory model of oil droplet was established, and the minimum oil drop diameter under different conditions was calculated combining with the oil droplet capture condition, finally realizing the theoretical calculation of impeller ventilator separation efficiency. Research showed that in different speeds, mass flow rates, and inlet temperatures, the separation efficiency and the minimum separation diameter were in agreement with the experimental values; the maximum errors of separation efficiency were 0.95%, 1.01% and 1.01%, respectively; the maximum errors of the minimum separation diameter were 1.33%, 2.29% and 6.20%, respectively. The calculation results were in good agreement with the experimental results. This method can provide a reference for designing the impeller type ventilator and optimizing its separation performance.

Key words: impeller type ventilator; equation of motion;
minimum separation diameter; separation efficiency;
separation performance

收稿日期:2016-10-10

作者简介:张小彬(1979—),男,讲师,博士生,研究领域为流体流动与传热。

通讯作者:朱卫兵(1961—),男,教授,博士,研究领域为燃烧、传热与多相流体动力学。E-mail:zhuweibing@hrbeu.edu.cn

引用格式:张小彬,朱卫兵,张崇龙,等. 叶轮式通风器分离效率计算方法[J]. 航空动力学报,2018,33(4):903-910. ZHANG Xiaobin, ZHU Weibing, ZHANG Chonglong, et al. Calculation method to separation efficiency of impeller type ventilation[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 903-910.

航空发动机工作过程中,封严空气会通过密封装置进入润滑系统轴承腔,在轴承腔中空气与滑油掺混形成油气混合物,若将油气混合物直接排出,将造成滑油的大量消耗,同时也会导致环境污染。因此在轴承腔与外界的通气路上设置通风器,其作用是把空气中的滑油分离出来,以减少滑油的消耗量^[1]。

目前,航空发动机通风系统所采取的通风器主要有两种类型,离心机式通风器(简称离心式通风器)和叶轮式通风器。叶轮式通风器和离心式通风器的工作原理相同,工作时空气夹带着滑油油滴进入通风器,转子的旋转使空气与油滴受到一个向外的径向力(离心力),由于密度的差异,作用在油滴上的离心力大,这样油滴被甩至壳体内壁,并通过壁上的小孔在动压作用下流回传动腔。分离后的空气在压差的作用下通过轴上的通气孔排出。与离心式通风器相比,叶轮式没有外壳,结构简单^[1],在小型航空发动机中得到了广泛应用。其结构如图 1 所示。

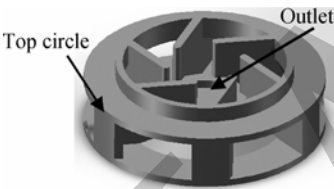


图 1 叶轮式通风器
Fig. 1 Impeller type ventilator

Farrall 等^[2]和 Bai 等^[3]分别以实验结果作为油滴与壁面撞击的判断准则关系式,建立油滴撞击后黏附、反弹、铺展和飞溅等现象的计算模型,为处理油滴捕获提供参考。Willenborg 等^[4]通过实验研究了航空发动机油气通风器的工作性能,得出了通风量、油滴直径和转速对分离效率的影响关系,并提出分离效率的优化方案。陆海涛^[5]运用离心力平衡原理建立可分离油滴直径的计算公式,通过该直径的大小评价离心式通风器的分离能力。Elsayed 等^[6]计算旋风分离器油气两相流场,预测了其内部的旋涡、轴向速度、切向速度和压降等参数,为旋风分离器流场分析提供参考。Gruselle 等^[7]通过伯努利方程和质量守恒方程对离心式油气分离运输泵出口含气率和出口含油率进行描述,提出出油口的背压和转子的转速对油气两相的分离有较大影响。石帅奇等^[8]应用欧拉-拉格朗日方法对某型航空发动机叶轮式通

风器内腔^[5]流场进行数值模拟,分析探讨了油气比、转速和空气流量对最小分离直径、分离效率和压降的影响。韩金在等^[9]对某型航空发动机的超高转速(转速为 27 000r/min)离心式通风器进行了数值模拟,结果表明:超高转速下,优化旋转空心轴结构可以减小通风器压降,提高分离效率。赵静宇^[10]等采用撞击韦伯数(We_d)作为油滴被壁面捕获的判断准则数,并给出了油滴与壁面不同作用效果对应 We_d 的取值范围。

目前,航空领域对叶轮式通风器性能的研究方法多为实验与数值模拟,探讨了流动与结构参数对通风器分离性能的影响,但均未能提出满足工程设计要求的分离效率具体计算公式。本文针对叶轮式通风器分离性能进行理论研究,通过受力分析建立了油滴运动轨迹模型,计算出叶轮入口不同周向位置的油滴最小分离直径和其对应的分离比例,最终实现了叶轮式通风器分离效率的理论计算,并将计算值与实验值对比,验证了计算方法的准确性。该方法通过计算机编程,易于实现,可对小型航空发动机叶轮式通风器进行分离性能计算,并为深入了解通风器分离机理提供参考。

1 分离效率计算方法

1.1 油滴运动方程的建立

航空发动机工作时,油气两相在压差作用下进入通风器叶轮流道,并在叶轮的带动下做周向运动,此时油滴具有径向速度和周向速度。油滴在通风器内受力如图 2 所示,设旋转产生的离心力和向心力^[11-12]分别为 P_1 和 P_2 ,油滴和空气速度差形成的斯托克斯阻力^[13]径向投影为 P_3 ,方向指向旋转中心, f_{lr} 为斯托克斯阻力在周向投影,方向与叶轮旋转方向相同,表达式见式(1)、式(2)、式(3)和式(5)。

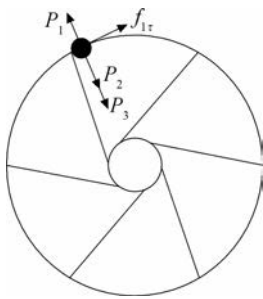


图 2 油滴受力分析
Fig. 2 Force diagram of oil droplet

$$P_1 = \frac{\pi d^3}{6} \rho_l \frac{v_{lr}^2}{r} \tag{1}$$

$$P_2 = \frac{\pi d^3}{6} \rho_g \frac{v_{lr}^2}{r} \tag{2}$$

$$P_3 = 3\pi\mu(v_{gr} - v_{lr})d \tag{3}$$

油滴径向运动方程为

$$P_1 - P_2 - P_3 = m_1 a_{lr} \tag{4}$$

油滴周向运动方程为

$$\begin{aligned} f_{lr} &= 3\pi\mu d(v_{gr} - v_{lr}) = \\ 3\pi\mu d(\omega r - v_{lr}) &= m_1 a_{lr} \end{aligned} \tag{5}$$

由式(5)可得

$$v_{lr} = a_{lr}t = \frac{3\pi\mu d(\omega r - v_{lr})}{m_1}t \tag{6}$$

则,油滴在 t 时刻周向角位移 $\theta(t)$ 为

$$\theta(t) = \int_0^t \frac{v_{lr}}{r} dt = \omega t - \frac{\omega m_1}{3\pi\mu d} \ln \frac{3\pi\mu d t}{m_1} + 1 \tag{7}$$

将式(1)~式(3)代入式(4)得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{18\mu}{\rho_l d_0^2} \cdot \frac{dr}{dt} - \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \\ \left[\frac{3\pi\mu d_0 \omega}{3\pi\mu d_0 + \rho_l \frac{\pi d_0^3}{6} \cdot \frac{1}{t}} \right]^2 \cdot r + \frac{18\mu}{\rho_l d_0^2} \cdot v_{gr} = 0 \end{aligned} \tag{8}$$

由于式(8)的高阶性、非线性和非齐次导致其不能得到解析解,故对式(8)通过泰勒公式离散化,精度取 1 阶^[14]

$$\begin{aligned} \frac{r_{i+2} + r_i - 2r_{i+1}}{\Delta t^2} + \frac{18\mu}{\rho_l d_0^2} \cdot \frac{r_{i+1} - r_i}{\Delta t} - \\ \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \left[\frac{3\pi\mu d_0 \omega}{3\pi\mu d_0 + \rho_l \frac{\pi d_0^3}{6} \cdot \frac{1}{i\Delta t}} \right]^2 \cdot \\ r_i + \frac{18\mu}{\rho_l d_0^2} \cdot \frac{M_2}{\rho_l h r \theta_0} = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

式中 μ 为空气动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; M_2 为通风量, g/s ; ρ_l 为滑油密度, kg/m^3 ; ρ_g 为空气密度, kg/m^3 ; d_0 为油滴平均直径, m ; h 为通风器轴向宽度, m ; Δt 为计算时间步长, $\Delta t = 0.00001 \text{ s}$ 。

以上黏度和密度均考虑了温度 T 对其影响。

定解条件^[15]

$$\begin{cases} r(0) = R \\ r'(0) = v_{l0} \end{cases} \tag{10}$$

式中 $r(0)$ 为初始时刻油滴的径向位置, m ; R 为叶轮外圆半径, m ; $r'(0) = \frac{dr(t)}{dt} \Big|_{t=0}$, m/s ; v_{l0} 为油滴在通风器入口时的速度, m/s 。

通过式(9)和式(10),求得油滴径向位置与时间的关系 $r(t)$ 。

1.2 最小分离直径计算

航空发动机轴承腔内油气混合物的含油率很低,故认为流入通风器内腔的主要是空气^[16]。根据叶轮式通风器的基本分离原理,本文定义油滴的分离条件为:叶轮旋转过程中,当油滴与叶轮的任意位置接触,即认为被分离,忽略油滴的反弹和飞溅等因素,故油滴分离判断条件为周向位移满足

$$\omega t \geq \theta(t) + \frac{2\pi}{n} \tag{11}$$

式中 n 为通风器叶片个数; ω 为通风器旋转角速度, $\omega = \frac{2\pi N}{60}$, rad/s ; N 为通风器转速, r/min 。

按分离条件式(11)可知,最易分离位置为图 3 所示的 C 点($r=R, \alpha=2\pi/n$),最不易分离位置为 A 点($r=R, \alpha=0$)。在叶轮式通风器中,大直径油滴比小直径油滴更易分离,记 A 点的最小分离直径为 $d_{\min}$,即在 A 点和 C 点之间,油滴直径大于 $d_{\min}$ 时一定被分离。如此,沿叶轮入口周向的不同位置就有其对应的不同最小分离直径,记其余位置的最小分离直径为 $d_{\min x}$ 。

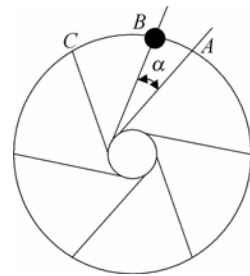


图 3 油滴入口位置

Fig. 3 Initial position of oil droplet

1.2.1 $d_{\min}$ 计算

设某一油滴处在 A 点,利用图 4 程序框图判断是否满足式(11),满足即被分离,否则减小油滴直径再次迭代,直到不能被分离,即可获得 $d_{\min}$ 。

1.2.2 $d_{\min x}$ 计算

设某一油滴处于 B 点($r=R, \alpha=\alpha_j$),初始直径取 $d_{\min}$,代入图 5 程序框图迭代计算。

当油滴直径减小满足式(12)时,该直径为 B 点的 $d_{\min x}$,增加 α 角改变 B 点的周向位置,进入下一循环,此时初始油滴直径取上一循环的 $d_{\min x}$,如此循环至 $d_{\min x} = d_n$ 。按本文的研究方法,

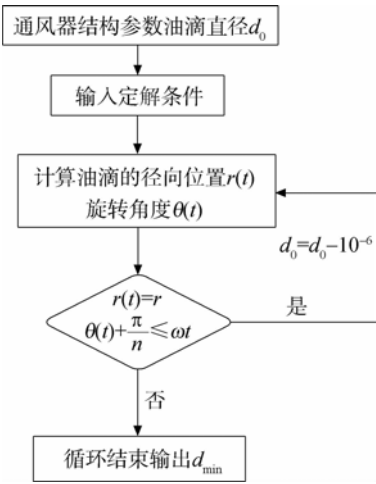


图 4 $d_{\min}$ 计算流程
Fig. 4 Calculation flow chart of $d_{\min}$

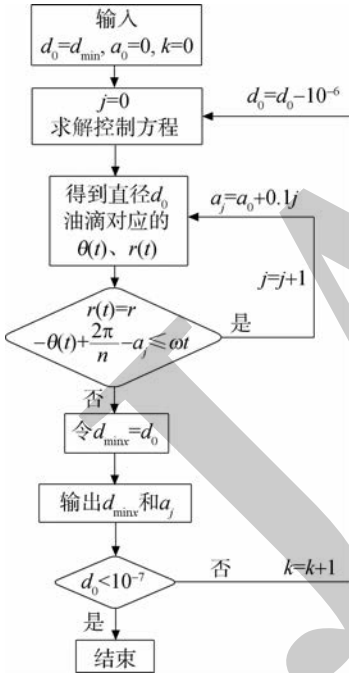


图 5 $d_{\min x}$ 计算流程
Fig. 5 Calculation flow chart of $d_{\min x}$

C 点的最小分离直径 $d_{\min x}$ 为零, 这与物理问题不相符, 因此需设一能分离的最小油滴直径 d_n , 当油滴直径小于 d_n 时处在周向任何位置都为不能被分离, 根据文献[9]取 $d_n = 0.1 \mu\text{m}$ 。按上述过程, 最终可求得 $d_{\min x}$ 沿周向的分布。

$$\omega t \leq \theta(t) + \frac{2\pi}{n} - \alpha_j \quad (12)$$

1.3 分离效率计算

在通风机叶轮入口, 通过实验测得油滴直径

分布为正态分布^[11] $d \sim N(d_0, \delta^2)$, 测量结果见图 6 所示, 根据正态分布概率密度函数积分面积恒为 1 的性质, 油滴直径的概率密度函数只是标准正态分布的平移和伸缩^[17], 本文采用近似标准正态分布函数^[11] $\Phi(x)$ 计算油滴直径的分布概率 (图 7), 计算式见式 (13)。

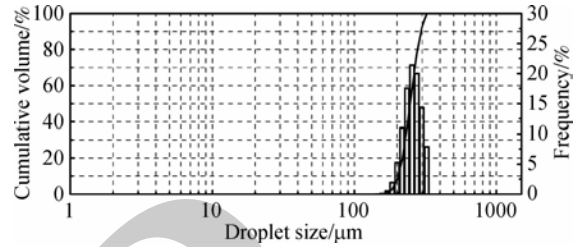


图 6 实验段入口粒径分布测量结果
Fig. 6 Oil droplets diameter distribution measurement result of experiment section entrance

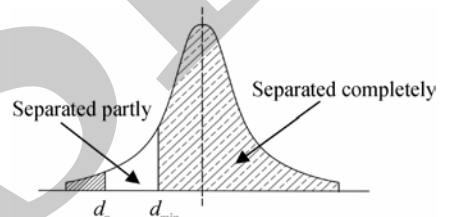


图 7 油滴直径分布
Fig. 7 Oil droplets diameter distribution

$$\Phi(x) \approx \begin{cases} 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) & x \geq 0 \\ \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2}{2}} (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中 $t = \frac{1}{1+a|x|}$; $a = 0.33$; $a_1 = 0.44$; $a_2 = -0.12$; $a_3 = 0.94$ 。

1.3.1 分离油滴体积计算

直径大于 $d_{\min}$ 油滴的体积计算。设

$$x_k = \frac{d_{\min} + (k - 0.5) \times 10^{-6} - d_0}{\delta} \quad (14)$$

则直径为 $d_{\min} + k \times 10^{-6}$ 的油滴所占的比例

$$k_k = \Phi(x_{k+1}) - \Phi(x_k) \quad (15)$$

其中 $k=1, 2, \dots$ 。直径大于 $d_{\min}$ 的油滴体积 V_1 为

$$V_1 = \frac{\pi}{6} [k_0 d_{\min}^3 + k_1 (d_{\min} + 10^{-6})^3 + \dots + k_k (d_{\min} + k \times 10^{-6})^3] \quad (16)$$

同理,直径在 $d_{\min}$ 与 d_n 之间的油滴被分离的体积计算。引入面积参数 S

$$S = \left(\frac{2\pi}{n} - \alpha\right) \frac{2\pi R h}{2\pi} = \left(\frac{2\pi}{n} - \alpha\right) R h \quad (17)$$

在通风器周向,直径在 $d_{\min}$ 与 d_n 之间油滴的分离条件为:在 C 点和 B 点之间的油滴能被分离,在 B 点和 A 点之间时不能被分离。直径为 $d_{\min}$ 的油滴被分离的比例记为 η_k , 计算见式(18)

$$\eta_k = \frac{\left(\frac{2\pi}{n} - a_j\right) R^2}{\frac{2\pi R^2}{n}} = 1 - \frac{a_j}{2\pi} n \quad (18)$$

故直径在 $d_{\min}$ 与 d_n 之间的油滴被分离的体积 V_2 为

$$V_2 = \frac{\pi}{6} [k_{-k} (d_{\min} - k \times 10^{-6})^3 \eta_{-k} + \dots + k_{-1} (d_{\min} - 10^{-6})^3 \eta_{-1}] \quad (19)$$

根据以上所求不同直径油滴所占的比例计算出油滴总体积 V 为

$$V = \frac{\pi}{6} [k_{-k} (d_{\min} - k \times 10^{-6})^3 + \dots + k_0 d_{\min}^3 + \dots + k_k (d_{\min} + k \times 10^{-6})^3] \quad (20)$$

1.3.2 分离效率计算

分离效率 η 的计算公式如式(21)所示, 计算程序框图见图 8。

$$\eta = \frac{V_1 + V_2}{V} \quad (21)$$

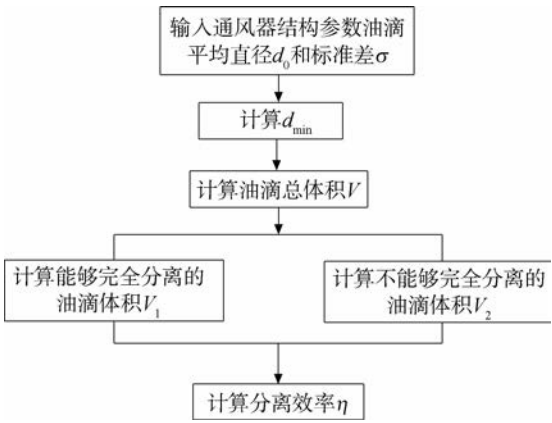


图 8 η 计算流程

Fig. 8 Calculation flow chart of η

2 实验系统

本文实验在哈尔滨工程大学航空发动机润滑油系统实验台^[18]上进行,实验系统主要由空气路、滑油路和油气混合路组成,如图 9 所示。空气路提供空气至油气掺混箱,滑油路提供滑油至油气掺混箱中的雾化喷嘴,空气与雾化的滑油在油气掺混箱中形成油气混合物,之后进入通风器实验段被通风器分离。

设未分离油滴的质量为 m_1 ,分离油滴的质量为 m_2 ,实验中收集并称质量,分离效率 η_1 计算公式见式(22)所示:

$$\eta_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (22)$$

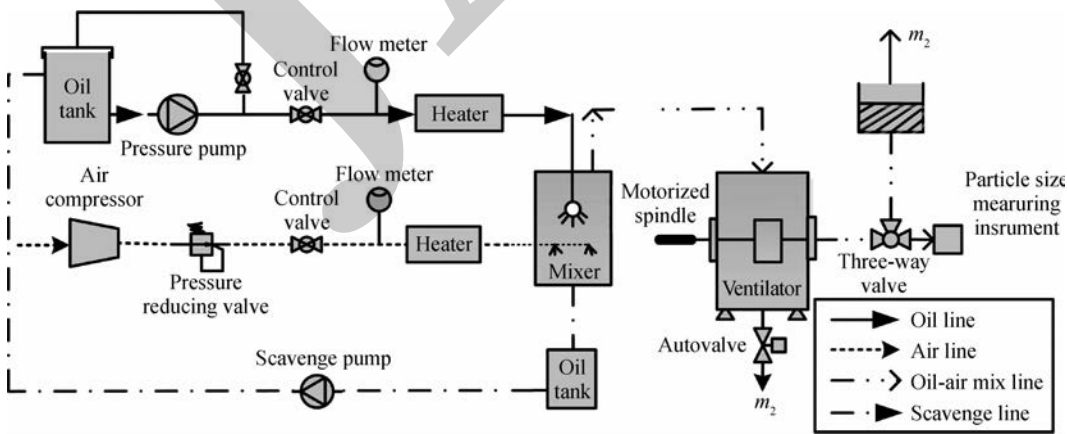


图 9 实验系统原理图

Fig. 9 Diagram of experimental system principle

温度采用温度传感器测量,压力采用压阻式传感器测量,不确定度均小于 0.5%,空气流量采用涡街流量计测量,滑油流量采用浮子流量计测量,不确定度均小于 1.5%,实验段入口粒径通过激光粒度分析仪测量,测量范围为 $4.6 \sim 323 \mu\text{m}$,

分辨率为 $1.0 \mu\text{m}$,最小分离直径(实验段出气口最大油滴直径)采用颗粒图像分析系统测量,测量范围为 $1 \sim 3000 \mu\text{m}$,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,油滴质量采用电子天平测量,其最小分度为 0.01g 。为保证实验值的准确性,实验数据均取 5 min 的平均值。

3 结果分析

根据上述计算方法对转速、通风量和通风器入口温度取不同值,计算其对应的最小分离直径和分离效率,并与实验结果对比。根据实验工况,通风器入口油滴平均直径 $d_0=1.25\times10^{-4}$ m,油滴直径标准偏差 $\delta=1.0\times10^{-4}$ m,通风器入口压力 $p=1.25\times10^6$ Pa,计算与实验工况见表 1,其中转速用 N 表示,通风量用 M_2 表示,通风器入口温度用 t 表示。计算结果见图 10~图 15。

表 1 通风器工作条件

Table 1 Working conditions of ventilator

序号	$N/(r/min)$	$M_2/(g/s)$	$t/^\circ C$
1	800	10	40
2	1000	15	50
3	2000	20	60
4	3000	25	70
5	4000	30	80

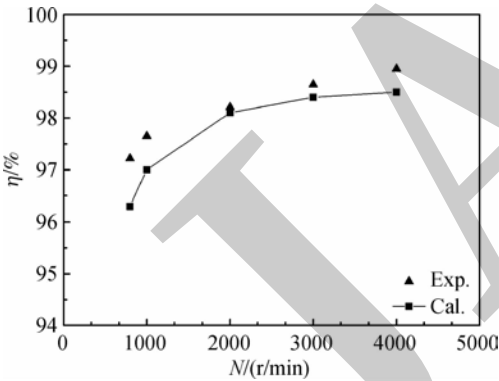


图 10 转速对分离效率的影响

Fig. 10 Effect of speed on separation efficiency

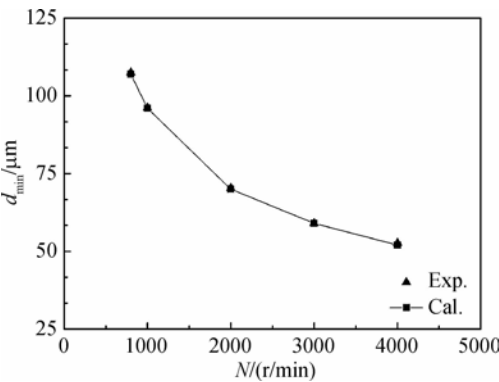


图 11 转速对 d_{min} 的影响

Fig. 11 Effect of speed on d_{min}

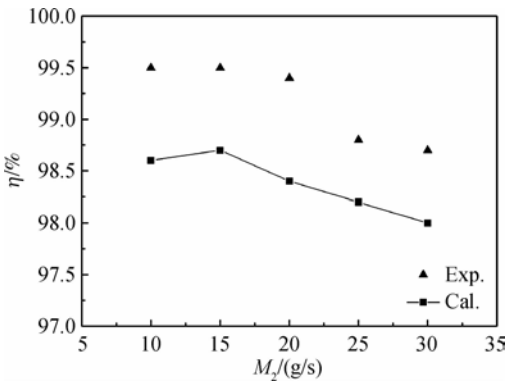


图 12 M_2 对分离效率的影响

Fig. 12 Effect of M_2 on separation efficiency

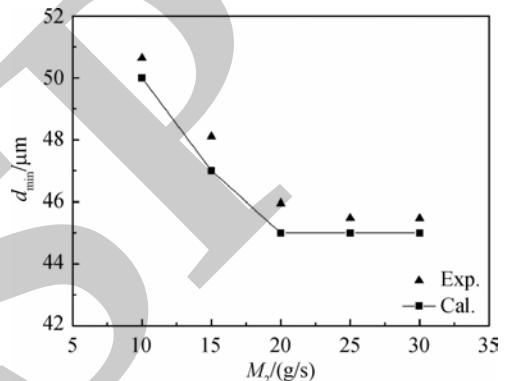


图 13 M_2 对 d_{min} 的影响

Fig. 13 Effect of M_2 on d_{min}

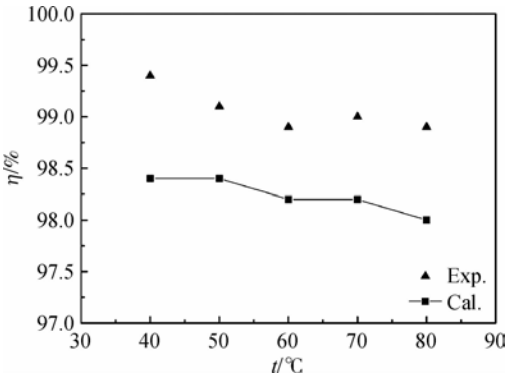


图 14 入口温度对分离效率的影响

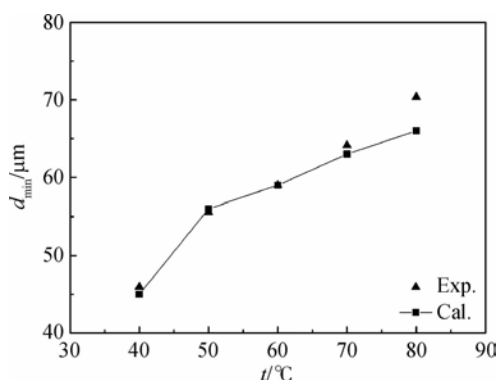
Fig. 14 Effect of inlet temperature on separation efficiency

相对误差 E_{rel} (文中简称误差) 计算公式如下:

$$E_{rel} = \left| \frac{V_{exp} - V_{cal}}{V_{exp}} \right| \times 100\% \tag{23}$$

式中 V_{exp} 表示实验值, V_{cal} 表示计算值。

由图 10~图 15 可见,分离效率和最小分离直径的计算值与实验值趋势一致。转速对分离效

图15 入口温度对 $d_{\min}$ 的影响Fig. 15 Effect of inlet temperature on $d_{\min}$

率影响的最大误差为 0.95%，平均误差为 0.49%，对最小分离直径影响的最大误差为 1.33%，平均误差为 0.51%。通风量对分离效率影响的最大误差为 1.01%，平均误差为 0.81%，对最小分离直径影响的最大误差为 2.29%，平均误差为 1.54%。通风器入口温度对分离效率影响的最大误差为 1.01%，平均误差为 0.83%，对最小分离直径影响的最大误差为 6.20%，平均误差为 2.17%。

图 10 和图 11 为通风量和通风器入口温度固定时(通风量为 20 g/s,通风器入口温度为 40℃)叶轮式通风器分离效率和最小分离直径随转速的变化曲线。可以看出:在计算转速(800~4 000 r/min)范围内,随着转速的增加,分离效率呈上升趋势,转速超过 2 000 r/min 后,分离效率基本保持恒定。随着转速的提高,油滴受到的离心力随之增加,进而提高了油滴与空气的相对速度,在油滴惯性的作用下,相同分离时间里,更多的油滴被甩到壁面上进行分离,导致分离效率的增加。

图 12 和图 13 为转速和通风器入口温度固定时(转速为 4 000 r/min,通风器入口温度为 40℃)叶轮式通风器分离效率和最小分离直径随通风量的变化曲线。可以看出:在计算通风量(10~30 g/s)范围内,分离效率随通风量的增加而下降,但总体保持在 98% 以上。通风量增加导致空气流速变大,使油滴受到空气的斯托克斯阻力(拖曳力)加大,增加了油滴的运动速度,减少了油滴在通风器内部的滞留时间,即降低了油滴落在叶片上的概率,从而更多的油滴逃逸出通风器,使分离效率降低。

图 14 和图 15 为转速和通风量固定时(转速为 4 000 r/min,通风量为 20 g/s)叶轮式通风器分离效率和最小分离直径随通风器入口温度的变化

曲线。图中显示:在计算通风器入口温度(40~80℃)范围内,分离效率随通风器入口温度的增加而下降。温度的升高会降低空气的密度,增大空气的黏性,同时,空气的密度降低会造成体积流量增加,增大空气流速,从而影响油滴与空气的速度。结合式(3)和式(5),液滴所受拖曳力随之增加,最终引起油气分离效率的下降。

4 结 论

为研究叶轮式通风器的分离特性,建立满足工程设计要求的分离效率计算方法,本文推导了油滴运动轨迹模型,实现了叶轮式通风器分离效率的理论计算。研究表明:在不同转速、通风量和通风器入口温度时,有

1) 分离效率和最小分离直径计算值与实验值趋势一致;

2) 转速的增加使离心力相应增加导致油气分离效率提升;通风量和通风器入口温度的升高均使通风器内部流场速度增加,增强了油滴克服惯性力与离心力的能力,同时减少了油滴在通风器内部的滞留时间,导致油气分离效率降低;

3) 分离效率计算值最大误差分别为 0.95%、1.01%和 1.01%;最小分离直径计算值最大误差分别为 1.33%、2.29%、6.20%,计算结果与实验结果吻合较好,该方法可为叶轮式通风器设计及分离性能优化提供参考。

本文在处理油滴与壁面作用时只考虑了黏附,而忽略了反弹和飞溅,实际后两者对于油滴分离也有一定的影响。因此,进一步完善油滴与壁面作用效果,提高分离效率的准确性是必要的。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 12 册 传动及润滑系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [2] FARRALL M, HIBBERD S, SIMMONS K. Modeling oil droplet/film interaction in an aero-engine bearing chamber[R]. Sorrento, Italy: the 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2003.
- [3] BAI C, GOSMAN A D. Development of methodology for spray impingement simulation[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper 950283, 1995.
- [4] WILLENBORG K, KLINGSPORN M, TEBBY S, et al. Experimental analysis of air-oil separator performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(6): 1495-1505.
- [5] 陆海涛. 航空发动机离心通风器分离能力评价方法及其转

- 子优化设计[J]. 机械设计与制造, 2008(10):44-46.
- LU Haitao. Method for separation ability price of aero motor centrifugal ventilator and rotor optimal design[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008(10):44-46. (in Chinese)
- [6] ELSAYED K, LACOR C. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(22):6048-6058.
- [7] GRUSELLE F, STEIMES J, HENDRICK P. Study of a two-phase flow pump and separator system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(6):657-666.
- [8] 石帅奇, 刘振侠, 胡剑平. 航空发动机离心通风器计算[J]. 航空计算技术, 2012, 24(1):68-71.
- SHI Shuaiqi, LIU Zhenxia, HU Jianping. Calculation on aero engine oil-air separator[J]. Aeronautical Computer Technique, 2012, 24(1):68-71. (in Chinese)
- [9] 韩金在, 陈聪慧, 徐让书. 超高转速离心通风器性能仿真分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3):685-691.
- HAN Jinzai, CHEN Conghui, XU Rangshu. Simulation analysis on performance of a high speed centrifugal oil-air separator[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3):685-691. (in Chinese)
- [10] 赵静宇, 刘振侠, 吕亚国. 蜂窝式轴心通风器油气分离性能计算[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7):1583-1590.
- ZHAO Jingyu, LIU Zhenxia, LÜ Yaguo. Computation oil/gas separation performance of axial breather with honeycomb structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7):1583-1590. (in Chinese)
- [11] 于尧. 动压式油气分离器和离心通风器的设计与仿真模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- YU Yao. Design and numerical simulation of dynamic pressure oil-gas separator and centrifugal ventilator[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [12] 林高平, 邹宽, 章立新. 水力旋流器内固液两相分离理论: II 数学模型[R]. 北京: 中国工程热物理学会多相流学术会议, 2002.
- [13] GAO Xiang, FENG Jianmei. Numerical and experimental investigations of the effects of the breakup of oil droplets on the performance of oil/gas cyclone separators in oil-injected compressor systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(7):1894-1904.
- [14] MORTON K W, MAYERS D F. Numerical solution of partial differential equations[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [15] 张楠, 刘振侠, 吕亚国. 航空发动机滑油系统叶轮式通风器数值计算研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(15):3645-3648.
- ZHANG Nan, LIU Zhenxia, LÜ Yaguo. A numerical study of aero-engine lubrication system centrifugal-separator[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(15):3645-3648. (in Chinese)
- [16] 马枚, 赵伟. 航空发动机轴心通风器油气分离技术研究及油滴运行轨迹跟踪[J]. 航空发动机, 1997(2):13-16.
- MA Mei, ZHAO Wei. Researching aircraft engine ventilator oil-gas separation technology and tracking the oil droplets trajectory[J]. Aeroengine, 1997(2):13-16. (in Chinese)
- [17] 刘清珺, 陈婷, 陈舜琮. 正态分布积分近似计算公式及其在实验结果判定中的应用[J]. 现代测量与实验室管理, 2009, 17(3):21-23.
- LIU Qingjun, CHEN Ting, CHEN Shuncong. Normal distribution integral approximate calculation formula and application in experimental results[J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 2009, 17(3):21-23. (in Chinese)
- [18] 朱卫兵, 王冬兰, 张小彬, 等. 航空动压式油气分离器分离性能的实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(5):852-857.
- ZHU Weibing, WANG Donglan, ZHANG Xiaobin, et al. Experimental study on performance of dynamic pressure type lubricant-air separator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(5):852-857. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)