

蜂窝式通风器中油滴运动与分离效率计算

徐让书,冯建宇,冯璐璐,王酉名

(沈阳航空航天大学 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室,辽宁 沈阳 110136)

摘 要:为研究转速、空气流量、蜂窝孔长度、对边距及空气温度对蜂窝式轴心通风器油气分离性能的影响,建立了基于质点运动学的蜂窝孔内滑油颗粒运动方程,采用龙格-库塔法求解得到颗粒运动轨迹,结合蜂窝结构几何特点给出颗粒分离判据,在给定颗粒直径分布的条件下求得蜂窝孔的分离效率,分析了各项参数对蜂窝孔分离效率的影响,并给出了分离效率与各参数之间拟合关系式。结果表明:孔长和对边距一定时,分离效率随着转速提高和通风流量减小而增加;转速和流量一定时,增大蜂窝孔长度和减小对边距均使分离效率提高;降低空气温度使分离效率提高,但影响微弱。

关 键 词:航空发动机;轴心通风器;蜂窝结构;颗粒运动;分离效率

中图分类号:V233.4

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.024

[引用本文格式]徐让书,冯建宇,冯璐璐,等.蜂窝式通风器中油滴运动与分离效率计算[J].热能动力工程,2020,35(3):167-172. XU Rang-shu, FENG Jian-yu, FENG Lu-lu, et al. Calculation of particle motion and separation efficiency of breather with honeycomb [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):167-172.

Calculation of Particle Motion and Separation Efficiency of Breather with Honeycomb

XU Rang-shu, FENG Jian-yu, FENG Lu-lu, WANG You-ming

(Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for Aircraft Propulsion Systems, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China, Post Code: 110136)

Abstract: To study the influence of rotation speed, mass flow rate, length, edge distance of honeycomb hole and air temperature on the oil/gas separation performance of axial breather with honeycomb, the particle motion equation in honeycomb hole was established based on particle kinematics. The particle trajectory is obtained by Runge-Kutta methods, combined with the separation criterion, under the condition of given particle diameter distribution. The separation efficiency of the whole honeycomb was obtained. The effects of various parameters on the separation efficiency of honeycomb holes were analyzed, and the relationship between separation efficiency and parameters was given. The results show that the separation efficiency increases with the increase of rotational speed and the decrease of ventilation flow rate when the length and edge distance are fixed, while it increases with the increase of honeycomb hole length and the decrease of edge distance when the speed and mass flow are fixed. The separation efficiency increases with the decrease of air temperature, but the influence is weak.

Key words: aero-engine, axial breather, honeycomb structure, particle movement, separation efficiency

引 言

轴心通风器作为航空发动机上一种广泛使用的油气分离装置,不但具有出色的油气分离性能而且能有效地减轻发动机重量^[1-2]。由于安装位置及制造工艺的局限,不能只靠提高通风器转速来提升油气分离性能,而应更多地着眼于油滴的阻隔、凝聚等分离机理^[3]。因此,研究有金属海绵^[4]、蜂窝结构^[5]等过滤元件的轴心通风器具有重要意义。

目前,对于蜂窝式轴心通风器的性能研究报道很少,且主要采用的方法都是基于计算流体力学(CFD)方法,通过 FLUENT 商业软件进行数值计算。董哲等人^[6]采用雷诺应力模型对蜂窝式轴心通风器内流场进行数值模拟,在验证模型可行性的基础上,求解分析不同转速和空气流量时蜂窝式轴心通风器的分离效率,数值模拟能有效地表征各因素对分离效率的影响规律,并且各因素在影响分离效率的权重上互相耦合。赵静宇等人^[7]建立了考虑油滴/壁面相互作用及油气双向耦合时蜂窝式轴心通风器内部流场的计算模型,在验证通风阻力及油气分离效率可靠性的基础上,对不同工况下蜂窝式轴心通风器的油气分离效率进行计算和分析,指出蜂窝结构对轴心通风器油气分离起到主要作用,对滑油的分离贡献率在 80% 以上。

由于蜂窝式通风器蜂窝孔数量繁多,能够精确求解其多相流的 CFD 数值仿真模型规模庞大、网格数目极多、计算非常耗时,对计算资源需求非常高,给各因素对分离效率影响规律的分析带来很大困难,导致无法给出准确的分离效率拟合关系式。

因此,本文基于质点运动学建立蜂窝孔内油滴颗粒运动方程,并结合蜂窝孔几何特点给出颗粒分离判据,给出一种蜂窝孔分离效率计算方法,编写蜂窝孔分离效率多参数化计算程序,计算不同转速、空气流量、孔长和孔径以及环境温度时蜂窝结构的分离效率,进而分析各参数对分离特性的影响。在保证计算模型适用性的基础上,为油气分离效率的多工况计算提供便捷计算方法,有效地减少了计算时间。

1 颗粒在蜂窝孔中的运动

1.1 蜂窝式通风器结构

图 1 为蜂窝式轴心通风器(整体的 1/6 圆周)结构剖面图,由大量六角形管组成的蜂窝结构布满通风器环形腔。工作时,通风器绕低压轴(Z 轴)高速旋转,轴承腔内的油气混合物沿蜂窝孔径向进入通风器中,流经环形腔 A、通风孔 A、环形腔 B、通风孔 B(与孔 A 错开 30°),最终由轴心通道排出。通风器工作时,直径较大的滑油颗粒会在离心力作用下甩出通风器或碰壁,直径较小滑油颗粒在环形腔和通风孔中进一步被分离,达到油气分离的目的。

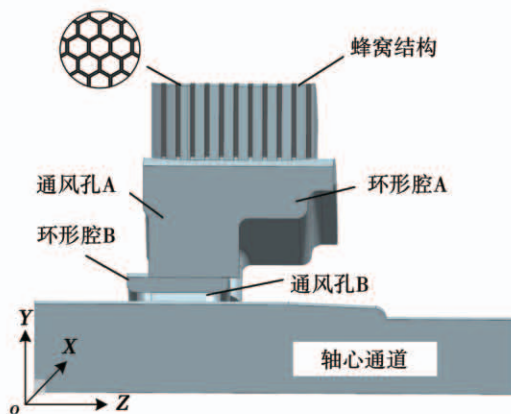


图 1 蜂窝通风器结构示意图

Fig. 1 Sketch of breather with honeycomb structure

1.2 颗粒运动方程

在通风器实际工作时,通风器内温度未达到滑油颗粒沸点,可忽略滑油颗粒的蒸发现象。油气混合物中滑油颗粒直径(微米量级)和浓度很小(质量分数小于 8%)且呈弥散状分布。Crowe C T 等人^[8]指出,当分散相体积分数小于 10^{-6} 数量级时可以不考虑油滴对气流的作用,在建立计算模型时可忽略油滴颗粒之间的相互作用及对气流的影响。

因此,可将滑油颗粒看作单个质点,研究滑油颗粒在蜂窝孔中的运动。图 2 给出单个蜂窝孔结构示意图,图中 R_{in} 、 R_{out} 、 l 和 d 分别为蜂窝孔的入口半径、出口半径、孔长和对边距,实际蜂窝孔长细比 l/d 约为 100:1,图中未按实际比例表示。在随通风器以 Z 轴为旋转轴,角速度为 ω 旋转的坐标系内,假定油气混合物以相对速度 v_{in} 垂直于入口截面进入蜂窝孔。

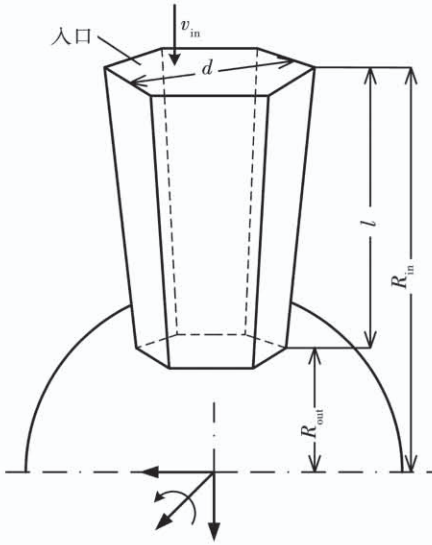


图2 单个蜂窝孔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a single honeycomb hole

颗粒在蜂窝孔中运动时主要受离心力、气流曳力、科氏力^[9]的作用,其它作用力数量级很小,可忽略不计^[10]。蜂窝孔内油滴颗粒在平行于 XOY 的平面内作二维运动,运动方程为

$$\mathbf{a}_n + \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} + \mathbf{a}_c = \mathbf{a}_f \quad (1)$$

式中: $\mathbf{a}_n$ —向心加速度, m/s^2 ; $\frac{d\mathbf{v}_p}{dt}$ —相对加速度, m/s^2 ; $\mathbf{a}_c$ —科氏加速度; $\mathbf{a}_f$ —为颗粒受气流曳力产生的加速度, m/s^2 。

向心加速度:

$$\mathbf{a}_n = 2\omega \times (\omega \times \mathbf{r}) = -\omega^2(x\mathbf{i} + y\mathbf{j}) \quad (2)$$

科氏加速度:

$$\mathbf{a}_c = 2\omega \times \mathbf{v}_p = 2\omega(v_{px}\mathbf{j} - v_{py}\mathbf{i}) \quad (3)$$

气流曳力加速度:

$$\mathbf{a}_f = \frac{C_d \rho \pi d_p^2 |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p| (\mathbf{v} - \mathbf{v}_p)}{8m_p} \quad (4)$$

Rallison J M 等人^[11]指出油气两相流中,气流与油滴颗粒的粘度比远大于4时,气流中的油滴不会被拉伸变形,油滴颗粒视为刚性球形颗粒,油滴质量为

$$m_p = \frac{1}{6} \rho_p \pi d_p^3 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{r}$ —颗粒位置矢量, m ; $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{v}_p$ —气流相对速度和颗粒相对速度, m/s ; ρ 、 ρ_p —气流密度和颗粒密度, kg/m^3 ; d_p —油滴颗粒直径, m ; C_d —阻力

系数^[12]:

$$C_d = \frac{K_1}{Re_p} + \frac{K_2}{Re_p^2} + K_3 \quad (6)$$

式中: $Re_p = \frac{d_p \rho |\mathbf{v} - \mathbf{v}_p|}{\mu}$ —颗粒雷诺数; μ —气流粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; K_1 、 K_2 、 K_3 —修正系数。

蜂窝孔长细比很大,气流在蜂窝孔中只有径向速度,且气流马赫数小于0.3,视为不可压缩流动,由蜂窝孔内气体质量守恒方程可知:

$$\rho \mathbf{v}_{in} A_{in} = \rho \mathbf{v}(y) A(y) \quad (7)$$

式中: A_{in} —蜂窝孔进口面积; A_y —坐标在 y 处蜂窝孔截面面积,二者关系可由简单的几何关系推导出:

$$\frac{A_{in}}{A(y)} = \frac{R_{in}}{y} \quad (8)$$

因此,蜂窝孔内气流速度 $\mathbf{v}(y)$ 表示为:

$$\mathbf{v}(y) = \frac{R_{in}}{y} \mathbf{v}_{in} \quad (9)$$

将式(2)~式(9)带入式(1),并连同速度定义式及颗粒运动初始条件写成矢量形式:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{u}), \mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}_0 \quad (10)$$

其中,

$$\mathbf{u} = [v_{p,x}, v_{p,y}, x, y]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \omega^2 x + 2\omega v_{p,y} - \xi v_{p,x} \sqrt{v_{p,x}^2 + \psi^2} \\ \omega^2 y - 2\omega v_{p,x} + \xi \psi \sqrt{v_{p,x}^2 + \psi^2} \\ v_{p,x} \\ v_{p,y} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{u}(t_0) = [0, v_{in}, x_{in}, R_{in}]^T \quad (13)$$

式中: $\xi = \frac{3}{4} C_d \cdot \frac{\rho}{\rho_p d_p}$; $\psi = \frac{R_{in} v_{in}}{y} - v_{p,y}$ 。

式(10)为一阶非线性微分方程组,无法得到解析解,采用2级4阶隐式龙格-库塔法^[13]求解,得到颗粒运动轨迹。

1.3 颗粒运动分析

图3为蜂窝孔转速和结构一定时,从蜂窝孔入口截面上某一位置 $A(x, z)$ 进入的3种不同直径油滴颗粒的运动轨迹。

颗粒进入蜂窝孔后,在离心力作用下减速,同时,在科氏力的作用下颗粒会向蜂窝孔壁面偏离。

直径为 6 μm 的滑油颗粒所受科氏力和离心力较小,在气流曳力的作用下随气流通过蜂窝孔(逃逸);相比于直径为 6 μm 的颗粒,10 μm 颗粒所受的科氏力更大,在到达蜂窝孔出口前就已经碰壁,从而被分离(碰壁分离)。直径为 300 μm 的颗粒受到的气流曳力不足以抵消离心力,在离心力的作用下,颗粒径向速度持续减小到零后反向运动,最终从蜂窝孔进口处离开(离心分离)。

可以看出,直径越大的滑油颗粒越容易被分离。由此可以推断,从位置 A 进入蜂窝孔的油滴直径存在一个恰好碰到蜂窝孔出口边沿的临界值,该直径即为位置 A 的最小分离直径 $d_p^*(x,z)$, 因此,油滴颗粒的分离判据为:在 (x,z) 位置进入蜂窝孔内的颗粒群中直径大于 $d_p^*(x,z)$ 的油滴颗粒都可以被分离。在给定颗粒群直径分布后确定颗粒群中的最小和最大直径,采用二分法逐步搜索得到满足分离判据条件的最小分离直径 $d_p^*(x,z)$ 。

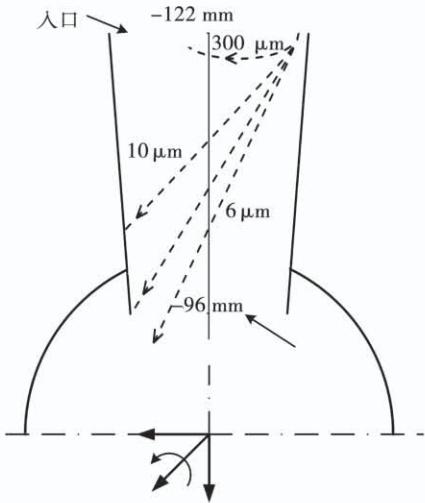


图 3 不同直径油滴的运动轨迹

Fig. 3 Trajectory of oil droplets with different diameters

2 分离效率

蜂窝孔油气分离效率表达式为:

$$\eta = \frac{m_{p,sep}}{m_{p,in}} \tag{14}$$

式中: $m_{p,sep}$ —被分离油滴颗粒质量, kg; $m_{p,in}$ —进口油滴颗粒总质量, kg。

混合物中的滑油颗粒直径分布遵从 Rosin-Rammler 分布^[14]:

$$R_{d_p} = 1 - e^{-(d_p/\bar{d_p})^N} \tag{15}$$

式中: R_{d_p} —直径小于 d_p 的颗粒累计质量分数, %; $\bar{d_p}$ —颗粒群特征直径, m; N —分布指数。

假定蜂窝孔入口截面上各位置处的滑油颗粒直径分布相同。则对于在点 (x,z) 处进入的颗粒流,最小分离直径为 $d_p^*(x,z)$, 分离效率为:

$$\eta(x,z) = 1 - R_{d_p^*}(x,z) \tag{16}$$

从不同位置进入蜂窝孔的滑油颗粒运动轨迹不同,导致最小分离直径不同。单个蜂窝孔的分离效率是从入口截面上全部微元面所进入的颗粒流的分离效率的面积加权平均:

$$\eta = \frac{1}{S} \iint_S 1 - R_{d_p^*}(x,y) dS \tag{17}$$

式中: S —入口截面面积, m^2 ; dS —微元面积, m^2 。

采用数值方法计算式(17)的积分,蜂窝孔结构及内部颗粒运动关于 X 轴对称,因此只需要对蜂窝孔一侧进行计算。将入口截面分成若干个正三角形单元,并假定颗粒从每个单元的几何中心进入。将式(15)代入式(17),得到分离效率的离散计算式:

$$\eta = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^I e^{-(d_p^*(x,z)/\bar{d_p})^N} dS \tag{18}$$

式中: I —正三角形单元个数。

3 计算模型分离效率校验与分析

图 4 为转速在 4 750 r/min 时,空气流量在 0.02 ~0.10 kg/s 时,蜂窝结构分离效率的计算结果与文献[6]中经试验验证的数值模拟结果对比,两种方法计算所得的分离效率相对误差低于 2%,验证了计算方法的可靠性。

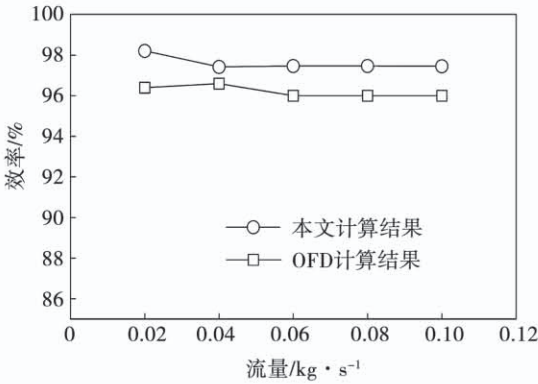


图 4 本文计算结果与 CFD 计算结果对比

Fig. 4 The comparison of computation results and calculation results of CFD

图 5 为孔长和对边距一定时,不同转速、流量时的等分离效率曲线。在一定空气流量下,随着转速增加,离心力、科氏力随之增大,导致分离效率提高,且在流量较小时变化显著;转速一定时,随着空气流量减小,气流曳力随之减小,导致分离效率提高,且在转速较小时变化显著。

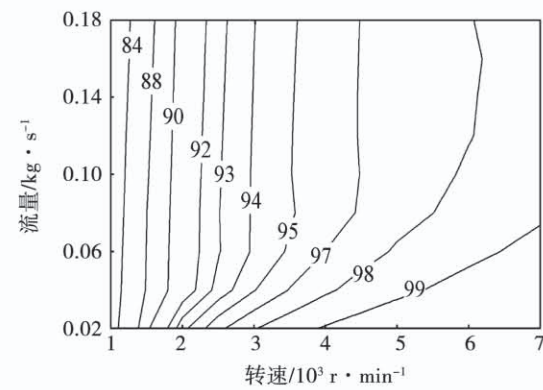


图 5 不同运转参数时蜂窝孔的等分离效率曲线(%)
Fig.5 Isoline of separation efficiency of honeycomb holes vs. operating parameters(%)

图 6 为转速和流量一定时,不同孔长和对边距时的等分离效率曲线。在对边距一定时增大蜂窝孔长度,或者在孔长一定时减小蜂窝孔对边距,都会使分离效率增加,这是由于科氏力造成的运动轨迹弯曲使颗粒更容易碰壁所引起的。

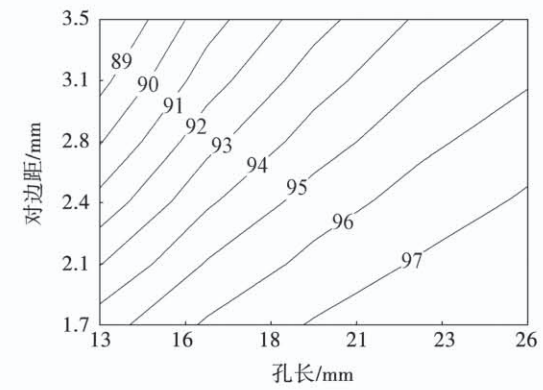


图 6 不同结构参数时蜂窝孔的等分离效率曲线(%)
Fig.6 Isoline of separation efficiency of honeycomb holes vs. structural parameters(%)

图 7 为蜂窝孔分离效率随空气流量和工作环境温度的变化曲线。空气流量一定时,随着空气温度的升高,空气密度减小导致气流速度增加,同时气流

粘度增大使气流曳力增加,这两个因素都导致分离效率降低。但温度对分离效率的影响相比于其他参数非常小,实际应用中可将其作为次要因素。

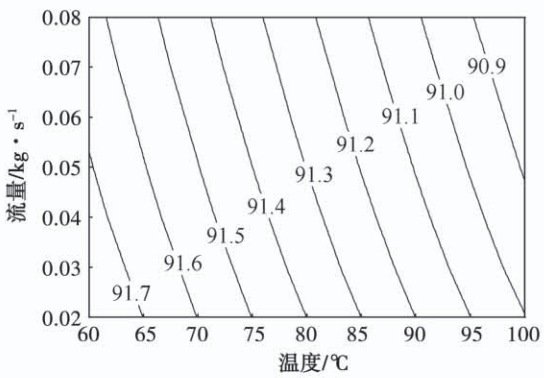


图 7 不同温度时蜂窝孔的等分离效率曲线(%)
Fig.7 Isoline of separation efficiency of honeycomb holes vs. temperature(%)

综上所述,转速、流量、孔长和对边距是蜂窝结构分离效率的主要影响因素,分离效率与转速和流量呈非线性关系,与孔径和孔长呈简单线性关系,并且各参数之间存在交互作用。因此,对不同运转参数和结构参数($T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $n=1\text{ }000\sim7\text{ }000\text{ r/min}$ 、 $Q_m=0.02\sim0.18\text{ kg/s}$ 、 $l=13\sim26\text{ mm}$ 和 $d=1.7\sim3.5\text{ mm}$)时蜂窝结构分离效率进行计算,并给出分离效率与各参数间的非线性拟合关系式:

$$\eta = (-0.321 - 6.022 \times 0.999^n) \cdot (4.171q_m^{0.18})(41.377d + 0.007) \cdot (-26.744l + 0.961) + 1.01 \tag{19}$$

4 结 论

基于质点运动学建立并求解蜂窝孔内滑油颗粒运动方程,给出滑油颗粒分离的判断依据,编写蜂窝结构油气分离效率参数化计算程序,并使用经验证后的计算模型对蜂窝结构分离效率进行参数化计算,分析转速、流量、蜂窝孔长度、对边距和温度对分离效率的影响,得出结论:

- (1) 蜂窝孔长度及对边距一定时,随着转速的增大或空气流量的减小,分离效率提高,且在小转速和小流量时的影响趋势更为明显,运转参数对于通风器油气分离效果起到决定性作用。
- (2) 蜂窝结构分离效率不只受到转速和流量的影响,蜂窝孔长度和对边距同样起到不可忽视的作

用。转速和流量一定时,随着蜂窝孔长度增大或对边距减小,分离效率提高。在通风器运转参数受条件限制时,可以通过调整结构参数,进一步提升通风器分离效率。

(3) 通风器在工作中,温度对分离效率的影响相比于其他参数非常小,实际应用中可将其作为次要因素。

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: 传动及润滑系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
Editorial Board of Aeroengine Design Manual. Aeroengine design manual: transmission and lubrication system[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.
- [2] 马 枚. 航空发动机轴心通风系统的结构演变及分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1994(4): 23-30.
MA Mei. Structural evolution and analysis of aeroengine shaft ventilation system[J]. Gas Turbine Test and Research, 1994(4): 23-30.
- [3] 马 枚, 赵 炜. 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. Research on oil and gas separation technology of axis ventilator of aeroengine and tracking of oil droplet running track[J]. Aeroengine, 1997(2): 13-16.
- [4] WILLENBORGK, KLINGSPORN M, TEBBY S, et al. Experimental analysis of air/oil separator performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2008, 130(6): 1495-1505.
- [5] 鞠珊珊. 蜂窝式通风器流动和油气分离数值模拟方法的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
JU Shan-shan. Research on the numerical simulation method for the gas flow and oil-gas separation of honeycomb breather[D]. Shenyang: Shenyang aerospace University thesis for master's degree, 2013.
- [6] 董 哲, 徐让书, 胡 慧. 蜂窝式轴心通风器分离效率数值模拟[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(4): 19-24.

DONG Zhe, XU Rang-shu, HU Hui. Calculation of separation efficiency in axial ventilator with honeycomb structure[J]. Journal of Shenyang University, 2016, 33(4): 19-24.

- [7] 赵静宇, 刘振侠, 吕亚国, 等. 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 Jing-yu, LIU Zhen-xia, LYU Ya-guo, et al. Computation on oil/gas separation performance of axialbreather with honeycomb structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1583-1590.
- [8] CROWE T. Review - numerical models for dilute gas-particle flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 1982, 104(3): 297-303.
- [9] 陈世民. 理论力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
CHEN Shi-min. Concise course of theoretical mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [10] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
CHE De-fu, LI Hui-xiong. Multiphase flow and its application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [11] RALLISON J. The deformation of small viscous drops and bubbles in shear flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1984, 16(1): 45-66.
- [12] MORSE S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193-208.
- [13] BUTCHER J. C. Implicit Runge-Kutta processes[J]. Mathematics of Computation, 1964, 18(85): 50-64.
- [14] 郑钢鏢, 康天合, 柴肇云, 等. 运用 Rosin-Rammler 分布函数研究煤尘粒径分布规律[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(3): 317-319.
ZHENG Gang-biao, KANG Tian-he, CHAI Zhao-yun, et al. Applied the Rosin Rammler distribution function to study on the law of coal dust particle size distribution[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(3): 317-319.

(丛 敏 编辑)