

粒子分离器砂尘分离效率试验参数影响分析

徐大成, 陈冰

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南株洲 412002)

摘要:砂尘试验是评估和验证粒子分离器砂尘分离能力的核心方法,砂尘分离效率试验结果除受试验器测试精度影响,还与砂尘投放方式直接相关。为了摸清某粒子分离器砂尘分离效率的试验影响因素,结合流动机理分析、CFD 仿真和试验方法,分别针对粒子分离器进口粒子分布均匀性、砂尘浓度和喷砂速度 3 种因素对砂尘分离效率的影响进行了分析。结果表明:粒子分离器进口砂尘分布均匀性是影响砂尘试验结果的主要因素,在给定浓度分布模型下,进口砂尘非均匀分布比非均匀分布砂尘分离效率降低接近 7%;进口砂尘浓度在 2000 mg/m³ 范围内变化不会对分离效率试验结果产生显著影响;喷砂速度增大,大粒径粒子受壁面反弹影响,使粒子分离器总分离效率呈下降趋势。

关键词:粒子分离器;分离效率;机理分析;仿真分析;试验;航空发动机

中图分类号: V211.1+7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.06.011

Influence Analysis of Test Parameters on Sand Dust Separation Efficiency of Particle Separator

XU Dacheng, CHEN Bing

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Sand dust test is the core method to evaluate and verify the sand dust separation ability of particle separator. The results of sand dust separation efficiency test are not only affected by the precision of the tester, but also directly related to the sand dust delivery mode. In order to find out the test influencing factors of sand dust separation efficiency of a particle separator, the effects of particle distribution uniformity, sand dust concentration and sand blasting velocity on the separation efficiency of particle separator were analyzed based on the analysis of flow mechanism, CFD simulation and test methods. The results show that the sand dust distribution uniformity at the inlet of particle separator is the main factor affecting the sand dust test results. Under the given concentration distribution model, compared with the non-uniform distribution of inlet sand dust, the separation efficiency of non-uniform distribution of sand dust decreases by nearly 7%. The inlet sand dust concentration within 2000 mg/m³ will not have a significant impact on the separation efficiency. With the increase of sand blasting velocity, the total separation efficiency of particle separator decreases due to the influence of wall rebound of large size particle.

Key words: particle separator; separation efficiency; mechanism analysis; simulation analysis; test; aeroengine

0 引言

涡轴发动机吸入砂尘会出现旋转部件磨损、燃油喷嘴和涡轮叶片气膜孔堵塞等现象^[1],导致性能降低,寿命急剧缩短,维护成本倍增,因而在砂尘环境下工作的涡轴发动机大多安装进气防护装置——粒子分离器。在 20 世纪 60 年代中期以后相继出现了拦阻式过滤器和弯管式、多管式及整体式粒子分离器等多种类型砂尘防护装置,显著提升了直升机涡轴发动机砂尘环境适应性。

砂尘分离效率是粒子分离器的关键技术指标。美国军方^[1]对某发动机进行的 AC 粗砂测试结果显示:分离效率为 85% 的粒子分离器可使发动机砂尘环境使用寿命提升 5 倍以上;若分离效率提高至 96%,发动机砂尘环境使用寿命可提升 28 倍之多。因而,准确评估粒子分离器砂尘分离能力对发动机砂尘环境下使用性能、飞行安全、维护性和经济性等起着重要作用。砂尘试验是评估粒子分离器砂尘分离能力的核心方法^[2],国内外学者对此开展了大量研究。Breitman 等^[3]通过砂尘试验验证了整体式粒子分

收稿日期: 2019-12-25 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 徐大成(1987),男,硕士,工程师,主要从事涡轴发动机进气防护技术研究工作;E-mail: dachengxu@126.com。

引用格式: 徐大成,陈冰. 粒子分离器砂尘分离效率的试验影响分析[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 63-68. XU Dacheng, CHEN Bing. Influence analysis of test parameters on sand dust separation efficiency of particle separator[J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 63-68.

分离器性能; Barone^[4]采用PIV试验方法测试了整体式粒子分离器内部气砂两相流场; 唐静^[5]开展了粒子分离器砂尘试验用的投砂装置设计和调试试验; 吴恒刚等^[6]通过试验研究了整体式粒子分离器分流器位置对分离效率的影响; 李洁琼等^[7]研究了主流路流量、扫气比、进口马赫数、进口砂粒浓度和分离器间距对整体式粒子分离器性能的影响规律; 支明等^[8]采用PIV试验方法研究了某粒子分离器内部流场特性。

从国内外研究情况来看, 目前砂尘试验研究对象主要针对粒子分离器, 对砂尘试验自身影响因素的研究未见公开报道。粒子分离器砂尘试验结果受砂尘投放装置模拟粒子分离器进口砂尘分布、砂尘浓度、喷砂速度及砂尘收集精度和测试设备误差等诸多因素影响, 直接关系到粒子分离器砂尘分离效率测试结果的准确性, 有必要开展深入研究。本文结合机理分析、数值仿真方法和试验方法, 对某整体式粒子分离器砂尘分离效率试验参数影响进行分析。

1 砂尘试验方法

1.1 试验原理

粒子分离器砂尘试验是在试验室环境下, 模拟粒子分离器在发动机上的真实工作状态, 评估或验证粒子分离器砂尘分离能力的一种方法。砂尘试验系统(如图1所示)采用吸气式动力布局, 主要由投砂、砂尘收集和流量测量装置, 以及主气流和清除流管路等组成。在试验过程中, 在动力风机抽吸作用下驱动主气流和清除流, 粒子分离器达到指定流量状态后, 利用投砂装置向粒子分离器进口投放一定质量、浓度和速度的砂尘, 含有砂尘的气流进入粒子分离器后, 经粒子分离器分离后的砂尘进入清除流管路, 相对清洁气流进入主气流管路。进入清除流管路的砂尘被砂

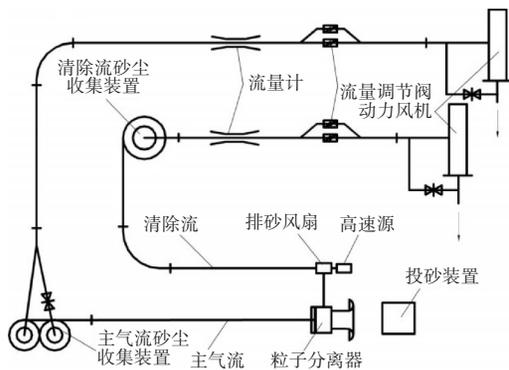


图1 试验系统原理

尘收集装置收集, 通过计量收集砂尘的质量可计算得到粒子分离器砂尘分离效率。

1.2 测试误差分析

试验过程测量参数主要包括主气流和清除流流量、砂尘投放质量 M_1 和清除流的收集质量 M_2 , 砂尘质量采用电子秤计量, 量程范围内实际测量误差为 ± 1 g, 砂尘收集装置实际收集精度为 99%。

粒子分离器对砂尘的质量分离效率为

$$\eta = M_2/M_1 \times 100\% \quad (1)$$

对式(1)求偏导数可得分离效率误差为

$$\sigma_{\eta} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial M_1} \Delta M_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial M_2} \Delta M_2\right)^2} \quad (2)$$

ΔM_1 仅受质量计量误差影响, 投砂总量 1000 g 产生的砂尘收集质量误差为 ± 1 g, 则

$$\Delta M_1 = \pm 1 \text{ g}$$

ΔM_2 受砂尘收集效率和质量计量误差综合影响, 若粒子分离器分离效率按 85% 计算, 那么投砂总量 1000 g 产生的砂尘收集质量误差为 ± 8.5 g, 则

$$\Delta M_2 = \pm \sqrt{(1)^2 + (8.5)^2} = \pm 8.56 \text{ g}$$

由式(2)可得计算误差为

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta} &= \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial M_1} \Delta M_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial M_2} \Delta M_2\right)^2} \times 100\% = \\ &= \pm \sqrt{\left(-\frac{M_2}{M_1^2} \times 1\right)^2 + \left(\frac{1}{M_1} \times 8.56\right)^2} \times 100\% = \\ &= \pm \sqrt{\left(-\frac{850}{1000^2} \times 1\right)^2 + \left(\frac{1}{1000} \times 8.56\right)^2} \times 100\% \approx \pm 0.86\% \end{aligned}$$

综上所述, 试验系统测试误差在 $\pm 1\%$ 以内, 证明利用本测试系统测试精度可满足试验需求。

2 数值仿真方法

为研究粒子分离器部件内部流动特征和性能参数影响规律, 文献[9]开展了数值验证工作, 流场计算采用 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型, 粒子轨迹计算采用离散相(DPM)模型, 计算结果与试验结果可以较好地符合, 验证了所采用计算方法的可靠性。本文利用 FLUENT 商用软件, 采用与文献[9]相同的计算方法进行了某整体式粒子分离器 3 维黏性数值仿真, 计算模型如图 2 所示。该粒子分离器为带预旋叶片的整体式粒子分离器, 粒子依靠预旋叶片和驼峰型流道产生

的离心力向外流道运动,经过气动力拖曳、壁面反弹后进入清除流通道,清洁气流经过反旋叶片消除旋流后进入压气机。粒子分离器进口边界给定压力进口,出口边界给定压力出口,计算状态选取发动机最大状态,清除流流量占主气流流量的 16%,计算采用四面体网格,壁面采用三棱柱网格进行等比加密,网格总量约 235 万。

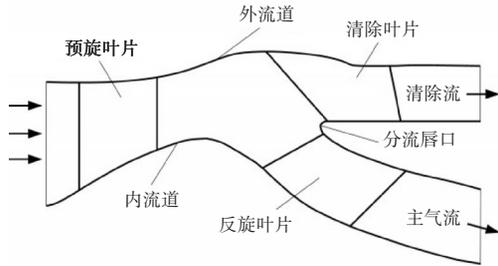


图 2 计算模型及边界条件

粒子轨迹模拟采用离散相模型,粒子材料为石英砂,形状假设为球形,按粒度大小分为 C 级砂和 AC 粗砂 2 种规格,粒径 d 分别为 $0 \sim 1000 \mu\text{m}$ 和 $0 \sim 200 \mu\text{m}$, 2 种砂均符合 GJB1171-91^[10], 粒径分布近似服从 Rosin-Rammler 分布^[6]

$$Y_d = e^{-d/\bar{d}^n} \quad (3)$$

式中: Y_d 为粒径大于 d 的粒子的质量分数; \bar{d} 为粒子平均直径; n 为分布指数。

基于响应面法可求得 C 级砂 $\bar{d} = 275 \mu\text{m}$, $n = 1.77$; AC 粗砂 $\bar{d} = 39.3 \mu\text{m}$, $n = 1.036$ 。粒径分布曲线如图 3 所示。

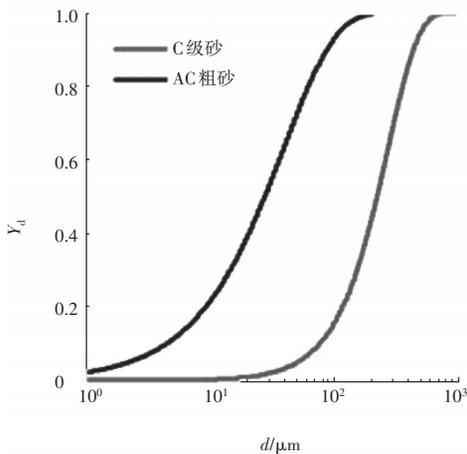


图 3 砂尘粒径分布

假设壁面为铝合金材料,粒子与壁面碰撞前后参数变化关系(如图 4 所示)按如下经验模型^[11]表示为

$$\frac{V_2}{V_1} = 1 - 2.03\beta_1 + 3.32\beta_1^2 - 2.24\beta_1^3 + 0.372\beta_1^4 \quad (4)$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = 1 + 0.409\beta_1 - 2.25\beta_1^2 + 2.19\beta_1^3 - 0.531\beta_1^4 \quad (5)$$

$$\frac{V_{n,2}}{V_{n,1}} = 0.993 - 1.76\beta_1 + 1.56\beta_1^2 - 0.49\beta_1^3 \quad (6)$$

$$\frac{V_{t,2}}{V_{t,1}} = 0.988 - 1.66\beta_1 + 2.11\beta_1^2 - 0.67\beta_1^3 \quad (7)$$

式中: β 为粒子与壁面的夹角, rad; V 为粒子速度; 下标 1、2 分别代表入射和反射参数; n 、 t 分别代表切向和法向参数。

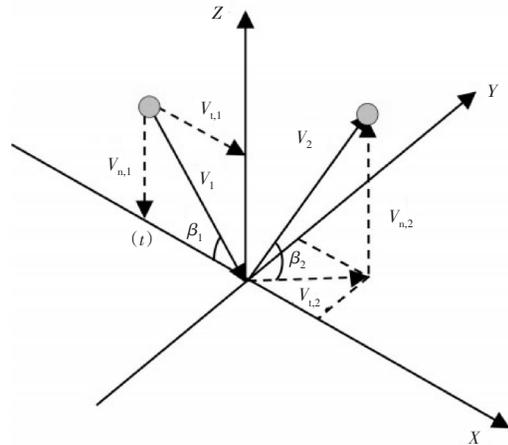


图 4 粒子碰撞反弹模型

3 参数影响分析

3.1 粒子分离器进口粒子分布均匀性

国外粒子分离器砂尘试验采用模拟均匀砂尘投放方法^[12-13], 结合砂尘分离机理和数值仿真分析方法针对粒子分离器进口砂尘分布均匀性对砂尘分离性能的影响进行分析。

首先,建立粒子分离器进口截面粒子分布简化模型,如图 5 所示。假设粒子均匀分布在经过点 E 和点 $F_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 的 2 个圆形包络的环形区域(即流道内壁附近的环形区域), 采用第 2 章基于离散相模型的两相流计算方法得到不同粒子分布区域面积 A_{EF_i} 与粒子分离器进口面

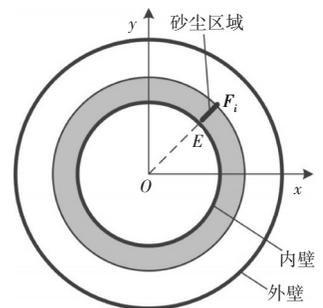


图 5 粒子分离器进口截面砂尘分布

积 A_0 比值下的沙尘分离效率,见表1。从表中可见,在 $A_{EF_i}/A_0 < 1.0$ 时,分离效率发生显著变化,进口沙尘分布均匀性对粒子分离器沙尘分离效率产生显著影响;在 $A_{EF_i}/A_0 = 0.59$ 时,C级砂的分离效率比均匀分布模型 $A_{EF_i}/A_0 = 1.00$ 的低5.1%,AC粗砂的分离效率比均匀分布模型的低6.9%。这一点可以从粒子分离器内部沙尘运动机理的角度进行定性分析,本文采用第2章的计算方法对粒子分离器进行两相流模拟,通过在粒子分离器进口径向均匀释放粒径分别为 $5 \mu\text{m}$ 和 $500 \mu\text{m}$ 的粒子,粒子运动图谱如图6所示。从图中可见,小粒径粒子($d=5 \mu\text{m}$)表现出明显的随流特性,位于分界轨迹线BFG(红色虚线)上方的粒子在清除流道分离,其下方粒子则进入主流道,若 A_{EF_i}/A_0 减小,其分离效率将会随之降低;而大粒径粒子($d=500 \mu\text{m}$)则主要借助自身惯性和壁面反弹作用分离,仅位于流道中部条带区域(粉色)的粒子被吸入主流道,若 A_{EF_i}/A_0 减小,中部条带区域粒子浓度将增大,即更多的大粒子将进入主流道,分离效率相应降低。综合分析大粒径和小粒径粒子分离机理可知,进口沙尘分布情况是影响粒子分离器沙尘分离效率的重要影响因素。

表1 粒子分布对分离效率影响仿真结果

A_{EF_i}/A_0	分离效率/%	
	C级砂	AC粗砂
0.59	88.9	74.7
0.73	91.2	77.7
0.89	92.6	80.1
1.00	94.0	81.6

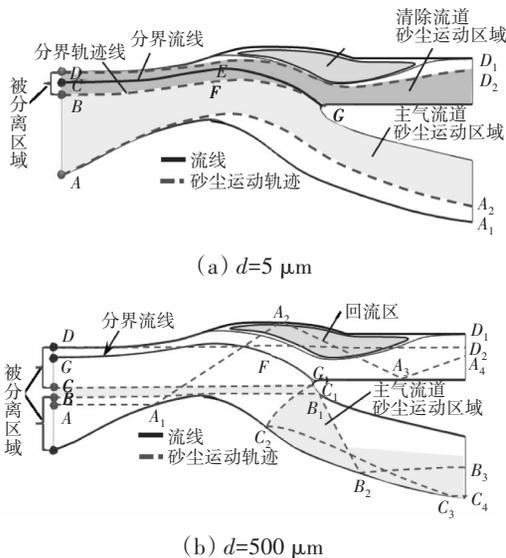


图6 不同粒径粒子分离机理

3.2 进口沙尘浓度

随着沙尘浓度升高,粒子与粒子、粒子与气流之

间相互干扰作用增强,粒子之间相互碰撞产生动量变化,影响粒子运动轨迹和碰撞反弹特性。K.ANAND等^[14]研究了粒子通量对材料磨蚀率的影响,建立了1阶粒子碰撞模型,如图7所示。从图中可见,在入射粒子束与反弹粒子束之间形成干扰区,随着入射粒子通量增加,碰撞区内入射粒子与反弹粒子相互碰撞的几率增大,造成反弹速度亏损,影响粒子运动轨迹。

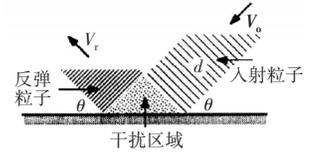


图7 粒子碰撞模型

沙尘浓度越低,粒子间相互干扰作用越弱,对沙尘分离效率影响也越小。GJB 2525-95^[15]规定了粒子分离器部件进口沙尘浓度为 53 mg/m^3 ,若按此浓度进行部件沙尘分离试验,沙尘投放时间为

$$t = \frac{M_1 \rho_g}{C_s \dot{m}_{in}} \quad (8)$$

式中: ρ_g 为空气密度; C_s 为投砂浓度; \dot{m}_{in} 为进气流量。

若进气流量为 5.4 kg/s 、投砂总量为 1 kg ,则每个状态点投砂时间为

$$t = \frac{M_1 \rho_g}{C_s \dot{m}_{in}} = \frac{1000 \times 1.225}{53 \times 10^{-3} \times 5.4 \times 3600} \approx 71.3 \text{ min}$$

因而若按 53 mg/m^3 的浓度开展沙尘分离效率试验,将耗费大量时间。为提高效率,沙尘试验一般采用加速等效方法,即在投砂量一定的情况下,提高粒子分离器入口沙尘浓度。为不影响沙尘试验结果,在粒子分离器沙尘试验过程中沙尘浓度可控制在 $53 \sim 530 \text{ mg/m}^3$ ^[12]。另外,从沙尘防护装置沙尘试验标准 ISO 5011^[16]中发现,试验时粒子分离器进口沙尘浓度可以达到 2000 mg/m^3 。对此,在投砂质量一定、不同投砂浓度的条件下进行了粒子分离器沙尘试验,最小沙尘浓度控制在 500 mg/m^3 左右,最高沙尘浓度控制在 2000 mg/m^3 左右,试验结果见表2。从表中可见,在试验的沙尘浓度下,试验结果并无显著变化,说

表2 沙尘浓度对比试验结果

砂型	投砂浓度/ (mg/m^3)	分离效率/%
C级砂	530	89.9
	2060	89.5
AC粗砂	445.2	68.8
	1913	68.0

明在试验砂尘浓度范围内,粒子与粒子、粒子与气流间相互作用很弱,不会影响砂尘试验结果,同时证明采用加速等效的砂尘试验方法可行,并将大幅缩短试验时间。

3.3 粒子分离器进口喷砂速度

直升机在实际起飞、着陆过程中,弥漫在空气中的砂尘在气流卷吸作用下进入粒子分离器,进口粒子运动速度相对气流有一迟滞过程^[7],比气流速度要慢,而在砂尘试验过程中采用压缩气源喷砂方式喷砂,通过调节气源压力控制喷砂速度。为此,对粒子分离器进行了不同喷砂速度下的砂尘分离效率仿真计算,计算结果如图8所示。

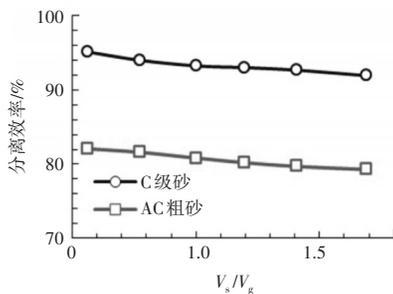


图8 喷砂速度对粒子分离器砂尘分离效率的影响

从图中可见,随着喷砂速度与进气速度比值 V_s/V_g 的增大,砂尘分离效率呈缓慢降低趋势,进口喷砂速度在0.65~1.35倍进气速度范围内变化时,粒子分离器砂尘分离效率相比 $V_s/V_g = 1$ 时的降低不超过1%。

为分析喷砂速度对砂尘分离效率影响不显著的原因,计算了不同喷砂速度下粒子分离器对不同粒径粒子的分离效率,如图9所示。

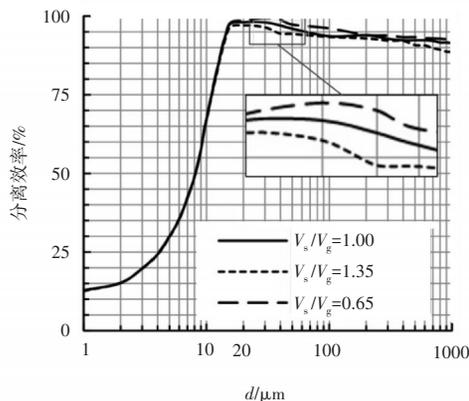


图9 不同喷砂速度下的粒子分离效率

从计算结果中可以发现:(1) V_s/V_g 一定时,随着粒径增大,惯性离心力增大,粒子分离效率呈升高趋势,当粒径大于 $15 \mu\text{m}$ 时,壁面反弹作用影响逐渐增强,分离效率出现降低趋势;(2) 粒子粒径一定时,对于粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 的粒子,由于自身惯性小,运动受气动曳力主导,具有较好的随流性,在 $V_s/V_g=0.65\sim 1.35$ 范围内变化时,其离心力变化很小,运动轨迹几乎不变,分离效率也几乎不变;对于粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 的粒子,运动受离心力和壁面反弹作用主导,在 $V_s/V_g=0.65\sim 1.35$ 范围内变化时,受离心力和壁面反弹作用影响,粒子运动轨迹发生变化,致使分离效率也出现波动,相比 $V_s/V_g = 1$ 时的波动范围在1%~3%。这里大于 $20 \mu\text{m}$ 的粒子分为2部分,其中大部分粒子会与壁面发生碰撞,其余少部分则不与壁面发生碰撞而直接进入主气流道或清除流道,如图10所示。与 $V_s/V_g = 1$ 的粒子相比,在 $V_s/V_g = 1.35$ 时,与壁面发生碰撞的粒子与粒子分离器外流道碰撞点提前,受壁面曲率影响,反弹后粒子运动轨迹向主气流通道偏移,进入主流道可能性增大,因而这部分粒子的分离效率降低;少量不与壁面发生碰撞的粒子运动轨迹向外流道偏移,进入清除通道可能性增大,其分离效率会有所提高,但这部分粒子数量相对较少。而在 $V_s/V_g = 0.65$ 时则反之。

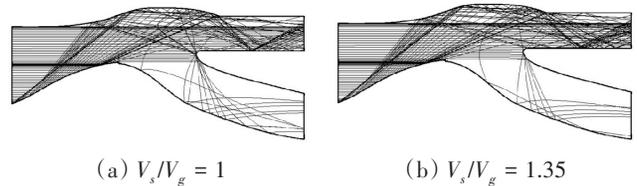


图10 粒子运动轨迹($d=150 \mu\text{m}$)

综上,由于小于 $20 \mu\text{m}$ 的粒子运动受气动曳力主导,分离效率几乎不受喷砂速度影响;大于 $20 \mu\text{m}$ 的粒子中与壁面碰撞的粒子数量占优,分离效率主要受壁面反弹作用影响,随着喷砂速度增大,粒子与外流道碰撞点提前,反弹后粒子运动轨迹向主气流通道偏移,致使粒子分离效率降低,因只有运动轨迹在分流唇口附近的少部分粒子的分离效率会受反弹作用受影响,致使粒子分离器总分离效率随进口喷砂速度增大呈缓慢降低趋势。

4 结论

(1)建立了粒子分离器进口砂尘分布模型,结合

流动机理分析和CFD仿真分析证实粒子分离器进口砂尘分布的均匀性是影响砂尘分离效率的主要因素;

(2)砂尘试验结果和相关资料显示,进口砂尘浓度约为 2000 mg/m^3 ,砂尘浓度变化不会对分离效率试验结果产生显著影响,通过合理控制砂尘浓度,采用加速等效试验方法可大幅缩短试验周期;

(3)喷砂速度增大,大粒径粒子受壁面反弹影响,使粒子分离器总分离效率呈降低趋势,但影响并不显著。

参考文献:

- [1] Potts J T. Why an engine air particle separator (EAPS)?[C]//The Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1990:1-7.
- [2] 李立国,王锁芳.直升机发动机的进气防护[M].北京:国防工业出版社,2009:199-207
- LI Liguang, WANG Suofang. Inlet protection of engine for helicopter[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:1-207. (in Chinese)
- [3] Breitman D S, Dueck E G. Analysis of a split-flow inertial particle separator by finite elements[J]. Aircraft, 1985, 22(2): 135-140.
- [4] Barone D L. Inertial particle separator multiphase dynamics[D]. Virginia: University of Virginia, 2014.
- [5] 唐静.粒子分离器试验器某关键件的设计[D].上海:上海交通大学, 2008.
- TANG Jing. Design for critical parts of IPS[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese)
- [6] 吴恒刚.无叶片整体式粒子分离器性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
- WU Henggang. Numerical simulation of vaneless inertial particle separator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [7] 李洁琼,王锁芳,董伟林,等.整体式粒子分离器性能的试验研究[J].推进技术,2016,37(9):1617-1623.
- LI Jieqiong, WANG Suofang, DONG Weilin, et al. Experimental study on performance of inertial particle separator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(9): 1617-1623. (in Chinese)
- [8] 支明,李维,王彤.惯性粒子分离器流场特性的PIV试验研究[J].风机技术,2017,39(2):56-60,70.
- ZHI Ming, LI Wei, WANG Tong. PIV measurements of the flow field characteristics in an inertial particle separator[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2017, 39(2): 56-60, 70. (in Chinese)
- [9] 况开鑫.整体式粒子分离器特性研究[D].南京:南京航空航天大学, 2011.
- KUANG Kaixin. Investigation on the characteristic of integral inlet particle separator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [10] 国防科学技术委员会.军用直升机防砂尘要求:GJB 1171-1991[S].北京:中国标准出版社,1991:1-8.
- Committee on Defense Science and Technology. Requirements for sand and dust protection of military helicopters: GJB1171-91[S]. Beijing: China Standards Press, 1991:1-8. (in Chinese)
- [11] 侯凌云,严传俊.二维粒子分离器的流场及分离效率的数值模拟[J].航空动力学报,1997,9(4):374-376.
- HOU Lingyun, YAN Chuanjun. Numerical simulation of two-dimension flow field in particle separator[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 9(4): 374-376. (in Chinese)
- [12] Robert J D, Bernard S. Integral engine inlet particle separator[R]. America: Army Air Mobility Research and Development Laboratory, 1975.
- [13] Vittal B V R, Tipton D L, Bennett W A. Development of an advanced vaneless inlet particle separator for helicopter engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1985, 2(5): 438-444.
- [14] Anand K, Hovis S K. Flux effects in solid particle erosion[J]. Elsevier, 1987, 118(2): 243-257.
- [15] 国防科学技术委员会.直升机发动机进气粒子分离器通用要求:GJB 2525-1995[S].北京:中国标准出版社,1996:1-8.
- Committee on Defense Science and Technology. Inlet particle separator of helicopter engine general requirements: GJB2525-1995[S]. Beijing: China Standards Press, 1996:1-8. (in Chinese)
- [16] International Organization for Standardization. Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors-performance testing: ISO 5011[S]. Swizerland: HIS, 2014: 1-39.
- [17] 董晓婷,王锁芳.有叶片整体式粒子分离器三维两相流数值模拟[J].机床与液压,2008,36(10):135-139.
- DONG Xiaoting, WANG Suofang. Numerical simulation of three-dimension two-phase flow in inlet particle separator with vanes[J]. Machine Tool & Hydraulic, 2008, 36(10): 135-139. (in Chinese)

(编辑:刘亮)