航空发动机露天台吞砂试验装置数值仿真

王晨璐[1],邢 菲[1],吴松霖[1],李星璐[1],周 伟[2],张 帅[2]
(1.厦门大学 航空航天学院,福建厦门 361005; 2.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为推进吞砂试验标准本土化,促进完善适用于中国航空发动机需求的试验方法和试验装置,基于航空发动机露天台吞砂试验装置开展了气固两相数值仿真。结合中国典型地区砂粒粒径和美军标规定的沙粒粒径,计算得到粒径在63~1000 μm范围内砂粒不同的质量加权平均粒径分布,并分析了吞砂试验中不同砂粒种类在喷砂设备和发动机进气流场中的扩散特性和分布规律,研究了不同喷砂设备结构参数对发动机进气道入口截面砂粒分布特性的影响规律。结果表明:砂粒的种类对发动机进气流场中砂粒的分布会产生影响,发动机吸入美军标规定砂粒的均匀度最高,面均匀度达到0.293;整流筒直径和相对发动机进口距离过大,将会导致发动机吸入砂粒不足,无法满足吞砂试验中对发动机入口截面处砂粒密度的要求。

关键词:露天试车;吞砂试验;喷砂装置;数值仿真;航空发动机
中图分类号:V231.1 **文献标识码:**A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.06.021

Numerical Simulation Study on Sand Ingestion Test Device for Aeroengine Outdoor Test Stand

WANG Chen-lu[1], XING Fei[1], WU Song-lin[1], LI Xing-lu[1], ZHOU Wei[2], ZHANG Shuai[2]
(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China;
2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: To localize sand ingestion test standards and optimize test methods for Chinese aeroengine, a gas/solid two-phase numerical simulation was carried out using an outdoor test rig. Mass-weighted average particle sizes were calculated for sands ranging from 63 to 1000 μm, based on typical Chinese regional sands and the American military standard. The diffusion and distribution characteristics of different sand types within the injection device and engine inlet flow fileld were analyzed. The influences of structural parameters of the injection device on sand distribution at the engine inlet section were also investigated. Results show that sand type significantly affects the distribution uniformity. The standard sand specified in the American military achieved the highest uniformity, with an areal uniformity index of 0.293. An excessively large fairing tube diameter or an excessive large distance between the fairing tube and engine inlet causes insufficient sand ingestion, failing to meet the required sand concentration at the inlet section of the engine.

Key words: outdoor test stand; sand ingestion test; sand spray device; numerical simulation; aeroengine

0 引言

随着航空发动机复杂程度提高和工作环境多元化,对其安全性要求也日益严苛。早期,发动机因环境因素引起的故障并非个例。随着飞机及直升机的频繁使用,环境因素影响越来越重要,世界各国逐步开始展开了相关研究[1]。美国针对航空发动机故障率开展的统计表明,环境因素引发的失效比率高达52%,其中砂尘导致的故障占比达7%[2-4]。吸入大量砂粒不仅导致发动机性能损失,还会直接破坏发动机部件。考虑到恶劣环境的危险性,20世纪90年代美国正式将环境试验列入发动机设计定型考核试验项目,并对试验条件和试验规范制定了严格要求。

国内外学者进行了各种吞砂试验研究。Walsh等[5]采用美国标准砂,用带孔的挂片模拟涡轮叶片,将冷却气和砂粒混合物喷到挂片上,测试砂粒对涡轮叶片冷却气孔的堵塞情况;Bravo等[6]采用欧拉-拉格朗日法对砂粒在1级涡轮转子静子中的运动进行了3维数值模拟,预测砂粒的沉积位置和质量以及对叶片的破坏程度,并将结果和美国陆军研究实验室的试验结

收稿日期:2024-07-10 **基金项目:**国家级研究项目资助
作者简介:王晨璐(1995),女,硕士。

引用格式:*王晨璐,邢菲,吴松霖,等.航空发动机露天台吞砂试验装置数值仿真[J].航空发动机,2025,51(6):161-168.WANG Chenlu,XING Fei,WU Songlin,et al.Numerical simulation study on sand ingestion test device for aeroengine outdoor test stand[J].Aeroengine,2025,51(6):161-168.*

果进行了对比；Brun 等[7]建立了一种广泛适用于地面和航空叶轮机的颗粒流运动轨迹模拟，以及部件冲击仿真方法；Ghenaiet 等[8]分析了砂粒对风扇附近流场的影响，并开展了其对叶片破坏过程的数值仿真，采用 MIL-E5007E 砂进行了吞砂试验；杨飞等[9]通过 1 维设计辅以数值模拟仿真方法，设计了 1 套吞砂设备并完成吞砂试验；李霖[10]对吞砂设备进行 3D 建模设计，采用欧拉-欧拉多相流方法对砂尘工况进行数值仿真。根据国军标 3971-2000《航空燃气涡轮辅助动力装置通用规范》设计调节投砂器，而该规范对吞砂试验的描述与国军标 242-1987 基本相同，所以作者的设计理念亦可广泛运用与其他航空发动机的吞砂试验。对于航空发动机吞砂试验来说，在现行标准下，对发动机砂粒吸入的研究集中在砂对流场的干扰、砂粒对部件的破坏以及粒子分离器的研制等防治措施上。由于发动机在不同地区的环境敏感问题不同，近些年吞砂试验的规则细化问题引起了广泛关注，对砂粒本身以及吞砂试验的试验方法和试验装置研究也逐渐展开。目前，中国针对涡扇发动机的吞砂试验标准是 GJB 241A-2010《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》[11]和 GJB 2026-1994《航空涡喷涡扇发动机吞砂试验要求》[12]，上述标准均依照美国的 JSSG-2007B 标准[13]制定。鉴于科技的发展和局势变化，目前在中国有必要推进吞砂试验标准本土化，从而促进试验方法和装置的改进、完善，制定出更适应中国航空发动机需求的试验细则。

本文通过数值仿真计算分析了不同种类砂粒吞砂试验在喷砂设备和发动机进气流场中的扩散特性和分布规律，研究了不同吞砂试验设备结构参数对发动机进气道入口截面砂粒分布特性的影响规律。

1 露天台试验装置模型及砂粒种类

1.1 露天试验台模型

发动机进行露天试验时除主要功能结构外还有许多测量、安防以及辅助功能所需要的管线以及结构件。考虑流场全 3 维数值模拟的可行性，对发动机模型和露天试车台动架结构进行了简化处理，露天试车台和发动机简化物理模型如图 1 所示。从图中可见，模型包括试车台台架，试车发动机和周边厂房建筑物，忽略了试车台上面离发动机较远处阶梯和护栏，等效简化了一部分台架上的零件。

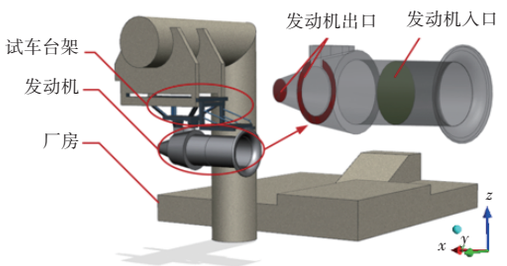


图 1 露天试车台和发动机简化物理模型

为了不让外边界影响计算域内流场，计算域远场边界要取得离重点研究区域足够远，计算域要足够大，故计算域范围为沿 3 个坐标轴正负 2 个方向各取距发动机区域 8 ~ 10 倍特征长度。特征长度为发动机长度，约为 6 m。因此，x、y、z 方向计算域尺寸分别为 123、120、66 m。

1.2 喷砂装置模型

喷砂装置包括核心装置喷砂嘴和套筒 2 部分，其中，喷砂嘴起喷入砂粒和高压空气之用，外部套筒作用为限制喷出砂粒的初始运动范围，不至砂粒分布过于分散，达不到试验相关要求的发动机入口截面处砂粒密度。

整流套筒及喷砂装置模型如图 2 所示。喷砂装置长度与套筒长度比例小于 1/800，二者尺度差异较大，所以整个计算呈现出多尺度特征。喷砂嘴内有 2 个环状通道，分别喷入不同物质。内通道入口用于喷入高压空气，外通道用于喷入高压空气和砂粒混合的二相流。内外通道喷入物质在椎体前的公共区域混合并喷出。内外通道的轴向中心截面处加装有径向高度和分别和两通道等高的两圈导流叶片，为射流提供周向旋转速度，并使喷出的气砂混合物中砂粒分布更均匀。

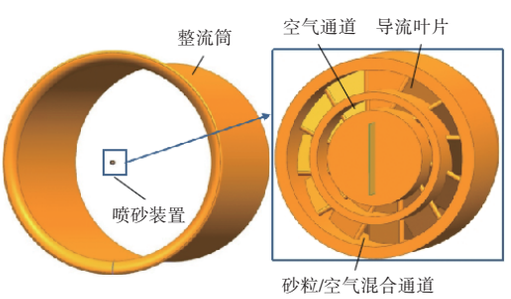


图 2 整流套筒及喷砂装置模型

1.3 砂粒种类

美国 JSGS-87231A《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范》[14]对吞砂试验中砂粒的粒径有明确规定，需要区分粗砂试验和细砂试验。

但中国GJB 241A-2010《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》[11]则只参考美军标规定了单一砂粒粒径,而没有根据各型号发动机的不同任务和不同作用来进行调整。实际上,中国国土辽阔,地貌差异巨大,根据文献[15]中国典型地区砂粒分布规律计算得到质量加权平均粒径,给出不同种类砂粒粒径分布,见表1。

表1　不同种类砂粒粒径分布

	质量加权平均粒径/μm	颗粒尺寸/μm	质量累积/%
美军标规定用砂	318	1000	100
		900	98 ~ 99
		600	93 ~ 97
		400	82 ~ 86
		200	46 ~ 50
		125	18 ~ 22
		75	3 ~ 7
粗砂粒	286	1000	100
		707	95 ~ 99
		500	89 ~ 93
		354	77 ~ 81
		250	60 ~ 64
		177	38 ~ 42
		125	18 ~ 22
		88	6 ~ 10
		63	1 ~ 5
细砂粒	279	1000	100
		500	85 ~ 90
		250	70 ~ 75
		125	50 ~ 55
		75	25 ~ 30

2　数值模拟方法与验证

2.1　离散相颗粒物粒子追踪方程

在拉格朗日坐标系下,单个颗粒物的受力为

$$\frac{\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=F_{\mathrm{D}}(\vec{\boldsymbol{u}}-\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{p}})+\frac{\vec{\boldsymbol{g}}\left(\rho_{\mathrm{p}}-\rho\right)}{\rho_{\mathrm{p}}}+\vec{\boldsymbol{F}} \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{D}}=\frac{18\mu}{\rho_{\mathrm{p}}d_{\mathrm{p}}^{2}}\frac{C_{\mathrm{d}}Re}{24} \tag{2}$$

式中:$\vec{\boldsymbol{F}}$为附加力;$\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}(\vec{\boldsymbol{u}}-\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{p}})$为曳力;$F_{\mathrm{D}}$为弛豫时间;$\vec{u}$为流体相速度;$\vec{u}_{\mathrm{p}}$为颗粒速度;$\mu$为流体动力黏度;$\rho$为流体密度;$\rho_{\mathrm{p}}$为颗粒密度;$d_{\mathrm{p}}$为颗粒物直径;$Re$为雷诺数;$t$为颗粒;$\vec{\boldsymbol{g}}$为重力;$C_{\mathrm{d}}$为曳力系数。

$$C_{\mathrm{d}}=a_{1}+\frac{a_{2}}{Re}+\frac{a_{3}}{Re} \tag{3}$$

式(3)中,假设砂粒为标准球型,在一定雷诺数范围内,a_1、a_2、a_3均为常数[16]。本例中的附加力为Saffman升力,表达式为

$$F=\frac{2Kv^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_{\mathrm{p}}d_{\mathrm{p}}\left(d_{\mathrm{lk}}d_{\mathrm{kl}}\right)^{1/4}}\left(u-u_{\mathrm{p}}\right) \tag{4}$$

式中:F为Saffman升力;K为常量,K = 2.594;v为流体运动黏度;$\boldsymbol{d}_{ij}$为应变张量;$\boldsymbol{d}_{\mathrm{lk}}$、$\boldsymbol{d}_{\mathrm{kl}}$为应变张量的分量。

2.2　两相流模型与边界条件

在计算域中,砂粒随着气流进行湍流运动,会受到各种不同力的作用。由于砂粒最大直径仅为1000 μm、占比远低于10%且砂粒之间的距离非常大[3],故可以忽略砂粒之间的相互影响。因此,本文基于商用软件平台,采用以欧拉-拉格朗日方法建立的离散相模型(Discrete Phase Model,DPM)进行喷砂仿真计算。考虑重力加速度,曳力和Saffman升力,离散相边界条件设为逃逸。

虽然远场边界距离发动机内及附近流场足够远,但整个计算域并不全属于充分发展湍流区域。考虑到某些壁面粗糙度的影响,本文采用RNG k-ε模型,使用基于压力-速度耦合求解器的SIMPLEC算法。

喷砂装置砂粒/空气混合入口和空气入口均设为压力入口,初始表压均为0.5 MPa,总温均为288.16 K。湍流规范方法选择湍流强度为5%。固体壁面类型全部设为无滑移壁面边界。根据相关试验要求,吞砂试验中发动机入口截面处砂粒密度须达到0.053 g/m^3。根据发动机进气道入口截面平均气流密度计算可得发动机进气道截面砂粒浓度为1.17 kg/m^3。DPM模型采用离散相与连续相耦合计算,入射源面选取喷砂装置平面,颗粒入射速度为5 m/s,粒径分布根据表1选取75 ~ 1000 μm中19个代表粒径,其各自质量流量通过质量分数计算得出。

发动机进气道末端处设为压力出口,起飞时压强为87 kPa。发动机内涵道和外涵道出口均设为质量入口,起飞时涵道比为5.4。试验环境为无风状态,外远场来流速度设置为0。计算域边界条件见表2。

2.3　网格无关性验证

考虑试车台模型尺寸,使用商用软件进行网格划分。综合考虑计算模型和计算资源,将整个计算域划分为2部分,分别采用不同的网格划分方案。露天台及喷砂装置模型如图3所示。

由于试车台周围结构复杂,使用便于生成的非结

表2 计算域边界条件

边界	参数	数值
源场入口	速度/(m/s)	0
	总温/K	288.16
	总压/Pa	101325
喷砂装置空气入口	压力/Pa	500000
	总温/K	288.16
喷砂装置砂粒入口	砂粒初始速度/(m/s)	5
	砂粒初始温度/K	288.16
发动机进气道出口	压力/Pa	87000

构网格，但非结构网格计算量较大且网格质量不易控制，所以外部流场使用结构网格，二者通过建立Interface面的方式进行拼接。针对主要关心区域（发动机和喷砂装置）进行局部网格加密来控制网格数量，最终得到完整的计算域网格。整个计算域的网格平均质量为0.8812，其中，只有少量四面体网格质量为0.3，整体网格适合可用于计算。

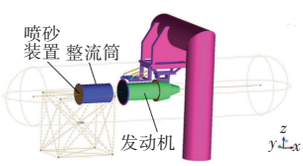


图3 露天台及喷砂装置模型

网格无关性验证是将疏密程度不同的4套网格计算结果与该型发动机在露天试车试验数据作对比。网格无关性验证结果如图4所示。取发动机进气唇口截面、水平方向、距离发动机中心1.8～2.8 m线段上速度参数进行分析。图中，横坐标为该点到发动机中心水平距离L，纵坐标为该点速度v与进气道入口平均速度V的比值v/V。

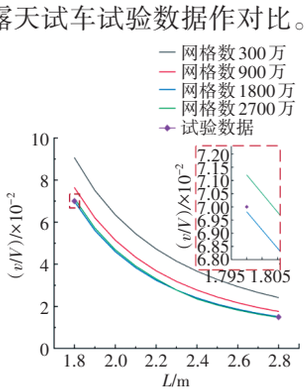


图4 网格无关性验证结果

结果显示300万和900万网格数量的数值结算结果与试验结果相差较大，1800万网格和2700万网格都与试验测量数据相接近，最大相差分别为1.68%和0.98%，均不超过2%，都属于可以接受的误差范围。这2个数量网格都满足网格独立性条件，说明该数值计算方法和网格划分的可靠性。综合考虑计算资源和计算精度，选用1800万网格作为后续数值计算网格。

3 数值模拟结果与分析

3.1 典型吞砂试验流场特性分析

典型吞砂试验砂粒扩散轨迹如图5所示。从图中可见，砂粒扩散轨迹有明显特征。砂粒从喷砂装置射出后沿径向扩散，并按粒径不同出现明显的分层情况，大颗粒砂粒离中心较远，小颗粒砂粒离中心较近。砂粒轨迹整体向中心靠拢，砂粒从喷嘴至进口的分布为由集中到分散到集中，同时砂粒轨迹整体有向下运动趋势。

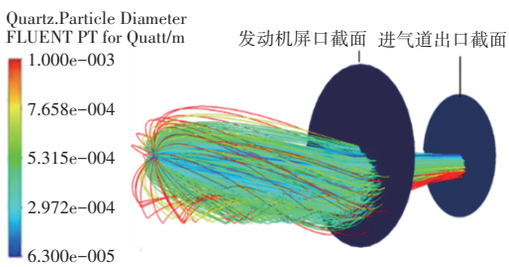


图5 典型吞砂试验砂粒扩散轨迹

典型吞砂试验进气道入口砂粒密度分布如图6所示。从图中可见，喷嘴出口截面的砂粒分布很规律，密度最高点位于轴心处，砂粒集中且对称分布于轴心四周，分布形状基本呈圆形，浓度由中心至外缘呈类同心圆状依次递减，过渡层次整齐且明显。而因为重力作用，随后砂粒向下方移动，密度最高点逐渐下移，分布形状逐渐由起初的圆形变化至进口截面处的扇形。扇形顶角指向z轴正方向且为锐角，密度最高点以上砂粒分布位置少且密度低，密度梯度大、过渡快；密度最高点以下分布位置较分散且浓度更高，浓度梯度更小、过渡慢，即砂粒分布更均匀。

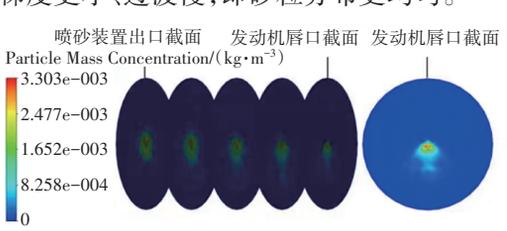


图6 典型吞砂试验进气道入口砂粒密度分布

供砂设备提供的砂粒都分布在发动机进口正前方，而发动机入口截面附近气流是从四周方向吸入，被吸入的气流被给予向入口中心运动的动量。由于颗粒随气流运动且惯性较大，所以容易被气流裹挟至中心处，尤其小粒径颗粒更易被携带聚集在中心，这造成砂粒在靠近发动机处会集中在入口截面中心附近。所以，喷砂装置喷射的砂粒绝大部分都会进入发动机内涵道，可能给发动机核心机部件带来更大伤害。

3.2 砂粒种类的影响

在吞砂试验中，由于砂粒在重力影响下整体分布

偏向下方,在调整试验条件后,很可能有部分砂粒没有被发动机完全吸入,导致不能达到试验规定进气砂粒密度的要求(0.053 g/m^3)。因此,引入砂粒浓度误差δ_s来量化试验设备结构参数对砂粒浓度的影响

$$\delta_s = \frac{|\bar{c} - 0.053|}{0.053} \times 100\% \tag{5}$$

式中:$\bar{c}$为发动机进气道入口截面砂粒平均密度。δ_s越小,说明越符合试验要求。

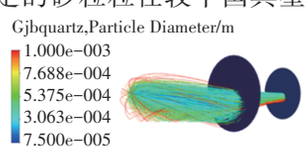
为量化分析发动机进气截面砂粒分布均匀程度,在此参考 Fric[17]提出的预混不均匀性概念以及邵卫卫等[18]的应用,引入面均匀度γ_a来表示进气截面砂粒分布均匀程度,表达式为

$$\gamma_a = 1 - \frac{\iint |c - \bar{c}| \mathrm{d}A}{A_e \bar{c}} \tag{6}$$

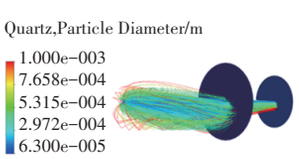
式中:c为截面上每个网格节点砂粒密度;A_e为截面面积。

γ_a最大值为 1,数值越大,表示砂粒在发动机进口截面分布越均匀,越适合进行吞砂试验。

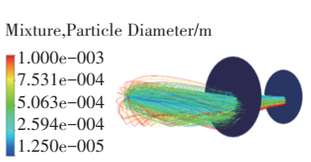
不同种类砂粒吞砂试验砂粒扩散轨迹如图 7 所示。不同种类砂粒虽然粒径不同,但在露天试车台吞砂试验的流场中,砂粒运动轨迹并没有明显区别。同样是粒径大的砂粒在外侧,粒径小的砂粒靠近砂粒流的中心处。由于美军标规定的砂粒粒径较中国典型粗砂的粒径更大,因此美军标规定的砂粒流运动轨迹中处于流场外侧的砂粒最多。



(a) 美军标规定的砂粒



(b) 粗砂

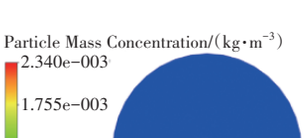


(c) 细砂

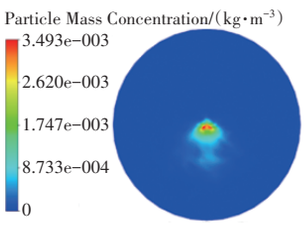
图 7　不同种类砂粒吞砂试验砂粒扩散轨迹

不同种类砂粒吞砂试验砂粒密度分布如图 8 所示。从图中可见,美军标规定的砂粒在特征截面分布最均匀,随着砂粒粒径的减小,砂粒也越来靠近进气截面的中心位置。

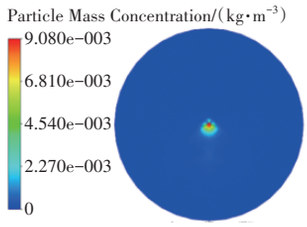
根据式(6)计算不同种类砂粒的吞砂试验数值仿真结果中,发动机进气道入口流场截面的砂粒分布均匀度γ_a。不同砂粒、不同发动机状态砂粒分布参数见表 3。从表中可见,美军标规定砂粒的均匀度γ_a最高,为 0.293,相比典型细砂的均匀度 0.207 高 41.5%,比粗砂 0.253 高 15.8%。因此,用于露天试车台吞砂试验砂粒的粒径越大,发动机进气流场的砂粒分布越均匀。



(a) 美军标规定的砂粒



(b) 粗砂



(c) 细砂

图 8　不同种类砂粒吞砂试验砂粒密度分布

表 3　不同砂粒、不同发动机状态砂粒分布参数

砂粒种类	均匀性指数γ_a
美军标规定砂粒	0.293
粗砂	0.253
细砂	0.207

3.3　喷砂装置的影响

从流场计算结果分析发现,喷嘴出口挡板角θ、整流筒直径D以及喷砂设备到发动机距离L是 3 个主要影响砂粒在发动机进气流场分布的结构参数。喷砂装置喷嘴挡板角(图 3),在喷嘴出口位置有倾斜角度θ的挡板,主要作用是使砂粒流从喷嘴中出来后能在流场中有沿径向扩散的速度,因此,其角度大小会对发动机进气流场的砂粒密度分布产生影响。整流筒与发动机相对位置及喷砂设备如图 9 所示,整流筒的直径会影响砂粒扩散范围,喷砂设备到发动机进气道入口距离影响喷嘴出口位置气动流场,进而影响砂粒的分布特性。

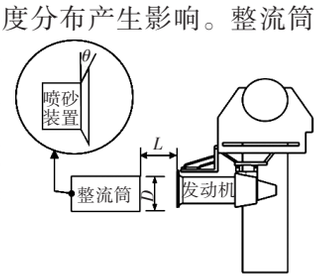
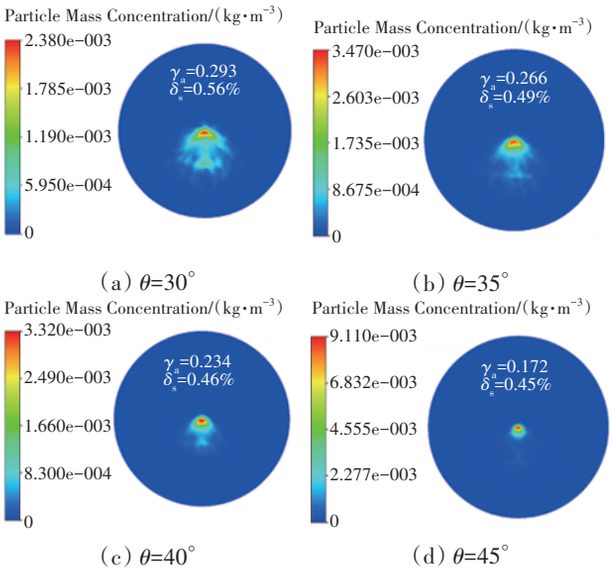


图 9　整流筒与发动机相对位置及喷砂设备

通过物理模型修改θ,得到挡板角为 30°、35°、40°、45°的 4 个喷嘴结构模型,D均为 1700 mm,L均为 1500 mm。通过对露天台吞砂试验流场数值仿真计算,得到不同挡板角的进气道入口截面砂粒密度分布,如图 10 所示。挡板角对进气道入口截面砂粒密度分布的影响如图 11 所示。

从图 11 中可见,随着喷嘴出口挡板角增大,发动机进气道入口处的砂粒向截面中心处集中,截面的γ_a



(a) θ=30° (b) θ=35°

(c) θ=40° (d) θ=45°

图 10 不同挡板角的进气道入口截面砂粒密度分布

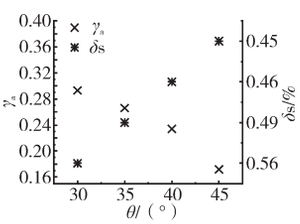
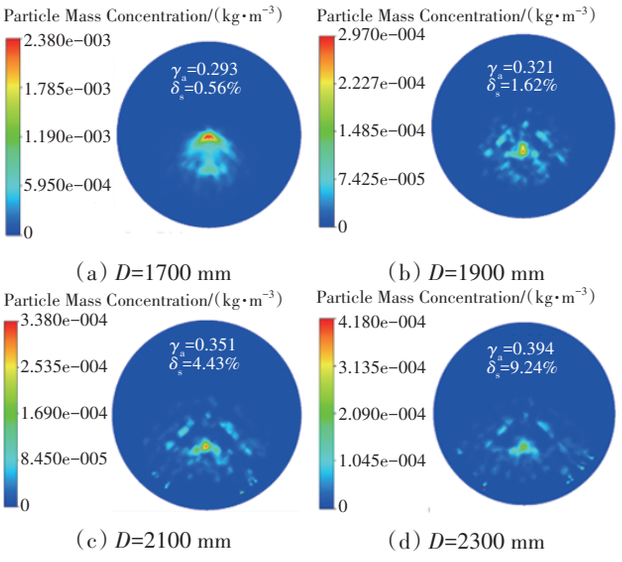


图 11 挡板角对进气道入口截面砂粒密度分布的影响

也在减小。其中，挡板角为30°时，进气截面砂粒密度均匀度最大，为0.293；挡板角为45°时，砂粒密度均匀度最小，为0.172，相比最大时降低41.3%。而不同方案的砂粒浓度误差则均小于1%，结合仿真精度，可以认为不同挡板角对发动机进气流场沙粒均匀度影响较大，对平均砂粒浓度的影响不大。

在吞砂试验中，考虑到砂粒能否被发动机完全吸入，需要对整流筒直径设限，通过物理模型修改喷砂设备整流筒直径 D，得到直径分别为1700、1900、2100、2300 mm的4个整流筒模型，其中，喷嘴出口挡板角为30°，喷砂装置到发动机距离 L 均为1500 mm。通过对露天台吞砂试验流场数值仿真计算，得到不同整流筒直径的进气道入口截面砂粒密度分布，如图12所示、整流筒直径对进气道入口截面砂粒密度分布的影响如图13所示。

从图12、13中可见，整流筒直径 D 增大，发动机进气道入口处的砂粒在流场中分布越均匀，γ_a 也在增大。其中，当 D=1700时，进气截面砂粒浓度均匀度最小，为0.293；当 D=2300时，砂粒浓度均匀度最大，为0.394，相比最小提高34.5%。D 越大，发动机进气道入口截面砂粒密度误差 δ_s 越大，当 D=1700时，δ_s 为0.56%；当 D=2300时，δ_s 为9.24%，变化超过5%，此时已经不足，无法完成吞砂试验。



(a) D=1700 mm (b) D=1900 mm

(c) D=2100 mm (d) D=2300 mm

图 12 不同整流筒直径的进气道入口截面砂粒密度分布

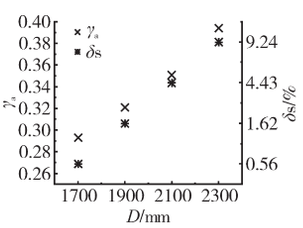
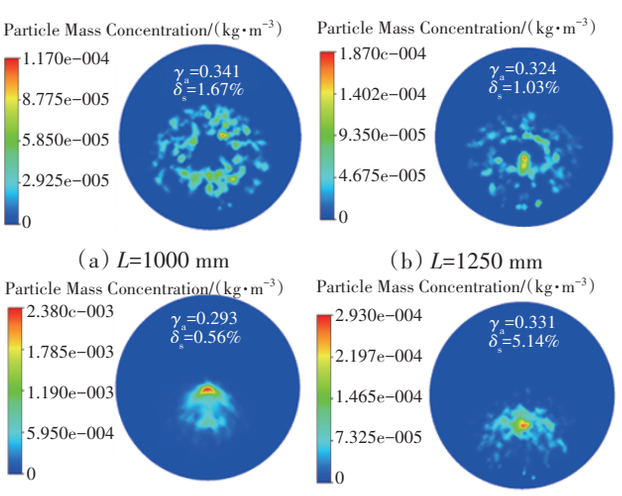


图 13 整流筒直径对进气道入口截面砂粒密度分布的影响

通过物理模型修改 L，得到距离分别为1000、1250、1500、1750 mm的4个吞砂试验试车台模型。其中，喷嘴出口挡板角为30°，D 均为1700 mm。通过对露天台吞砂试验流场数值仿真计算得到不同相对距离的进气道入口截面砂粒浓度分布如图14所示、喷砂设备到发动机进气道距离对进气道入口截面砂粒浓度分布的影响如图15所示。



(a) L=1000 mm (b) L=1250 mm

(c) L=1500 mm (d) L=1750 mm

图 14 不同相对距离的进气道入口截面砂粒密度分布

从图14、15中可见，随 L 增大，发动机进气道入口处砂粒的分布先向截面中心集中。在 L=1500 mm处，截面的 γ_a 达到最小值为0.293，随后随 L 增大而增加。

随着L增大，发动机进气道入口截面δ_s先减小到L=1500 mm处的0.56%，然后在L=1750 mm处为超过5.14%，同样超过5%，不适合进行露天试车台吞砂试验。

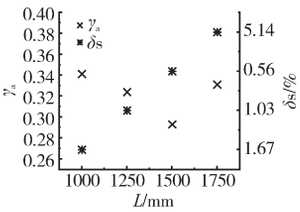


图15　喷砂设备到发动机进气道距离对进气道入口截面砂粒密度分布的影响

不同挡板角度、整流筒直径、喷砂设备到发动机进气道距离对砂粒密度误差和均匀度的影响如图16所示。从优化试验条件的角度出发，密度误差应尽可能小，均匀度应尽可能大，因此图中右下角区域的工况将是相对理想的试验条件。

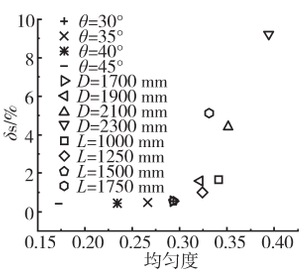


图16　不同挡板角度、整流筒直径、喷砂设备到发动机进气道距离对砂粒密度误差和均匀度的影响

4　结论

（1）受重力影响，流场中砂粒运动轨迹整体有先向下运动趋势，后在发动机进气流场影响下向发动机轴心位置靠近；砂粒的种类对进气流场中砂粒分布有影响，发动机吸入美军标规定砂粒的均匀度最高，比典型细砂的均匀度高41.5%，因此，用于露天试车台吞砂试验砂粒的粒径越大，发动机进气流场的砂粒分布越均匀。

（2）随着喷砂装置出口挡板角增大，发动机进气道入口处的砂粒向截面中心处集中，截面的砂粒密度分布均匀度越小，砂粒密度误差越小；整流筒的直径越大，发动机进气道入口处的砂粒在流场中分布越均匀，截面的砂粒密度分布均匀度越大，砂粒密度误差也越大；喷砂设备到发动机进口距离越大，发动机进气道入口处砂粒的分布先向截面中心集中，截面的砂粒密度分布均匀度越小，砂粒密度误差越小；后随着距离增大，砂粒分布范围和均匀度变化趋势相反，砂粒密度误差增大。

参考文献：

[1] 胡志强．环境试验设备与环境试验[J]．航空精密制造技术，1993(4)：42-43，46.
HU Zhiqiang. Environmental test equipment and environmental test[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology，1993(4)：42-43，46.(in Chinese)

[2] 王长喜，乔文逍．航空发动机环境及吞咽试验[J]．国际航空，1989(6)：18-20.
WANG Changxi，QIAO Wenxiao. Aeroengine environmental and swallowing test[J]. International Aviation，1989(6)：18-20.(in Chinese)

[3] 常鸿雯，李艳军．航空发动机吞砂试验技术浅析[J]．机械工程师，2019(8)：126-127.
CHANG Hongwen，LI Yanjun. Technical analysis of sand ingestion test on aero-engine[J]. Mechanical Engineer，2019(8)：126-127.(in Chinese)

[4] 徐倩楠，胡峰，肖友洪，等．航空发动机进气及叶栅通道内砂粒动力学特性分析[J]．航空动力学报，2021，36(8)：1776-1782.
XU Qiannan，HU Feng，XIAO Youhong，et al. Analysis of dynamic characteristics of sand particles in air intake and compressor cascade of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power，2021，36(8)：1776-1782.(in Chinese)

[5] Walsh W S，Thole K A，Joe C. Effects of sand ingestion on the blockage of film-cooling holes[C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land，Sea，and Air. New York：ASME，2006：81-90.

[6] Bravo L G，Xue Q，Murugan M，et al. Particle transport analysis of sand ingestion in gas turbine jet engines[C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta：AIAA，2017：1-13.

[7] Brun K，Nored M，Kurz R. Particle transport analysis of sand ingestion in gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2011，134(1)：012402.

[8] Ghenaiet A，Elder R L，Tan S C. Particles trajectories through an axial fan and performance degradation due to sand ingestion[C]//ASME Turbo Expo 2001: Power for Land，Sea，and Air. New Orleans，Louisiana：ASME，2001：1-12..

[9] 杨飞，田震，张浙波．大功率涡桨发动机整机吞砂试验装置设计与研究[J]．科学技术与工程，2020，20(21)：8573-8578.
YANG Fei，TIAN Zhen，ZHANG Zhebo. Design and research of sand ingestion test device for high-power turboprop whole engine[J]. Science Technology and Engineering，2020，20(21)：8573-8578.(in Chinese)

[10] 李霖．直升机辅助动力装置吞砂试验装置设计及试验[D]．上海：上海交通大学，2016.
LI Lin. Sand ingestion equipment design and test of a whole helicopter auxiliary power unit[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2016.(in Chinese)

[11] 国防科学技术委员会．航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范：GJB 241-2010[S]．北京：中国人民解放军总装备部，2010：15.
National Defense Science and Technology Commission. General specification for engines，aircraft，turbojet and turbofan：GJB 241-2010[S]. Beijing：China People's Liberation Army General Armaments Department，2010：15.(in Chinese)

[12] 国防科学技术委员会．航空涡喷涡扇发动机吞砂试验要求：GJB 2026-1994[S]．北京：国防科学技术委员会，1994：1-6.
National Defense Science and Technology Commission. Requirements

for test of sand ingestion, aircraft turbojet and turbofan engine: GJB 2026-1994[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Commission, 1994: 1-6.(in Chinese)

[13] 张华,叶巍,李红军.美国航空发动机通用规范演变分析[J].航空标准化与质量,2015(4):53-56.
ZHANG Hua, YE Wei, LI Hongjun. Evolution analysis of American aeroengine general specification[J]. Aeronautic Standardization and Quality, 2015(4): 53-56.(in Chinese)

[14] U.S. Department of Defense. Engines, Aircraft, Turbin: JSGS-87231A [S]. USA: US Military Specs/Standards/Handbooks, 1995.

[15] 曾林,程礼,李宁,等.航空发动机吞砂试验标准砂与典型沙粒形貌对比分析[J].航空发动机,2019,35(1):101-106.
ZENG Lin, CHENG Li, LI Ning, et al.Comparison and analysis of morphology of standard sand and typical sand particle in aeroengine sand swallowing test[J].Aeroengine, 2019, 35(1): 101-106.(in Chinese)

[16] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972(55): 193-208.

[17] Fric T F. Effects of fuel-air unmixedness on NOx emissions[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(5): 708-713.

[18] 邵卫卫,赵岩,刘艳,等.燃气轮机燃烧室预混燃烧器天然气燃料/空气掺混均匀性研究[J].中国电机工程学报,2017(3):795-802.
SHAO Weiwei, ZHAO Yan, LIU Yan, et al. Investigation of fuel/air mixing uniformity in a natural gas premixed burner for gas turbine combustor applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2017(3): 795-802.(in Chinese)

(编辑:兰海青)