

# 大涵道比涡扇发动机吞砂技术研究\*

## Research on Sand Ingestion Technology of High Bypass Ratio Turbofan Engine

■ 唐宇峰 徐嘉悦 王冠夫 王金光 / 中国航发沈阳发动机研究所

大涵道比发动机在沙尘环境下工作会吸入大量沙粒和灰尘，对发动机的性能、稳定性等产生不利影响。对大涵道比发动机应对吞砂的设计措施进行分析和研究，在发动机设计之初考虑吞砂需求，对提升发动机抗沙尘能力和环境适应性具有重要意义。

**大**涵道比发动机一般带有增压级设计，而且风扇尺寸大、涵道比高、总压比高、涡轮前温度高。根据大涵道比发动机的特点，对主要部件和控制规律开展针对性抗沙尘设计，一方面能够使更多的沙尘排出发动机，另一方面可以提高主要部件的耐沙尘能力。本文通过分析发动机吞砂后整机和各主要部件的变化，提出相应的设计措施，使发动机在沙尘环境下工作的功能、性能和稳定性满足使用要求，为大涵道比发动机抗沙尘设计提供技术支撑。

### 吞砂对大涵道比发动机的影响

航空发动机吸入砂粒后会产生不同程度的伤害，大的砂粒可能导致压气机叶片磨蚀、效率下降，小的砂粒可能导致涡轮冷却孔堵塞并引起涡轮叶片烧蚀。大涵道比发动机在吞咽沙尘时，一部分沙尘进入外涵道，主要对风扇外涵道、支板、外涵道机匣等产生磨蚀性损伤；另一部分沙尘进入内涵道，不仅对风扇内涵道、增压级、高压压气机、燃烧室和涡轮产生磨蚀性损伤，且砂

尘经燃烧室烧蚀产生沉积物，会堵塞燃烧室喷嘴、涡轮导向器和气膜冷却孔<sup>[1-2]</sup>。以上情况会对发动机性能和稳定性产生不利影响。

#### 主要性能影响

吞咽沙尘对发动机的影响程度主要与沙尘浓度、颗粒尺寸、成分、发动机状态，以及吞咽时间有关，吞咽后导致发动机的性能出现恶化的趋势，对发动机结构也会出现磨蚀性损伤。研究表明，航空发动机吞入沙尘后推力降低，但大涵道比涡扇发动机一般采用低压转速控制，且推力大部分由风扇外涵道产生，因此在发动机状态保持恒定条件下吞入沙尘，推力变化较小，甚至会出现略微上升的趋势，但因吞入沙尘会导致风扇、增压级、核心机等重要部件的性能出现恶化，发动机的排气温度和耗油率将升高。

#### 对压缩部件的影响

大涵道比涡扇发动机的风扇一般采用钛合金叶片或复合材料叶片，风扇部件在受到砂粒切削和挤压时，叶尖间隙增大、叶片变薄，支板和机匣表面粗糙度增加，导致风扇部件效率降低。对于有吞砂要求的发动机，相比选用复合材料叶

片，钛合金风扇叶片的摩擦系数和磨损率会随着温度的增加而减小，作为低温部件的风扇，抗冲蚀磨损能力强，能更好地减少冲蚀磨损带来的损失。

沙尘经过风扇后，一部分通过外涵道排入大气，另一部分进入增压级和高压压气机。与风扇不同的是，增压级和高压压气机级数多、叶片尺寸小，且高压压气机转速更高，受到沙尘磨损影响更加显著，图1是经过吞砂后的压气机叶片。沙尘进入增压级和高压压气机后，会对机匣、转子叶片、静子叶片造成永久磨损，使叶片表面粗糙度、叶尖间隙和叶片流道总压损失增加；增压级和高压压气机叶片级数多，导致增压级和高压压气机内部的沙尘不断回弹和反复碰撞，叶片、机匣易造成更大程度的损伤。沙尘与压气机叶片碰撞时具有一定规律，在叶片前缘相对速度较大，随弦长方向递减；叶片底部附近碰撞速度较低，沿叶片高度方向逐步增大。各级叶片均会受到磨损，由前到后逐级加重。因此，沙尘对增压级和高压压气机的影响更为明显，导致性能显著降低。

\*“沙粒”适用于自然层面，“砂粒”适用于工程、矿物或制造层面，文中与标准砂相关时使用“砂粒”，与自然沙相关时使用“沙粒”。



图1 压气机叶片磨损情况

### 对燃烧室的影响

沙尘进入燃烧室后，受到高温燃烧影响，一般会产生沉积物，这些沉积物的形成主要取决于沙尘的成分。砂石中 $\text{SiO}_2$ 的熔点较高，形成沉积物的概率较小，但混合砂石中 $\text{CaSO}_4$ 水合物、 $\text{CaCO}_3$ 和可溶解盐熔点较低，在经过高温燃烧后会形成沉积物。燃烧室为非旋转部件，与砂石相对速度较低，砂石对燃烧室结构性损伤较小，但高温沉积物会造成燃油喷嘴污染、火焰筒冷却孔堵塞和火焰筒壁面烧结等问题。一方面影响燃油的雾化程度，对燃烧效率产生影响；另一方面沉积物将改变燃油喷射模式，影响燃烧室出口温度分布，从而对下游涡轮产生不利影响。

### 对涡轮部件的影响

沙尘经过燃烧室后进入涡轮部件，涡轮属于高温、高压、高应力载荷的旋转部件，且涡轮与砂石的相对速度很高，受吞砂影响更为明显，吞砂后的涡轮叶片如图2所示。



图2 吞砂后的涡轮导向叶片和工作叶片

首先，高速砂石会对涡轮工作叶片产生冲击，将叶片表面和叶尖磨蚀，导致叶尖间隙增大、涡轮部件效率降低，影响发动机整机性能；其次，高温产生的沉积物会堵塞涡轮气膜冷却孔，使冷却效果变差，导致涡轮叶片有烧蚀的风险；最后，长时间沉积物累积导致涡轮导向器出现堵塞，流通面积缩小，造成发动机共同工作线向喘振边界移动，到达一定程度后发动机出现喘振，影响整机工作稳定性。

### 应对吞砂的措施

通过分析沙尘对大涵道比发动机的影响，结合大涵道比发动机特点，可以采取一定的应对措施，改善发动机吞砂过程中的工作情况，以降低吞砂对发动机造成的不利影响。

#### 控制规律设计

飞机在沙尘环境下工作一般处于起飞和爬升阶段，在这两个阶段开展适应吞砂的控制规律设计，在

保证发动机性能和稳定性的同时，使更多沙尘排到大气环境，可以降低沙尘对发动机的不利影响。主要对增压级后放气阀（VBV）和高压压气机可调静子导向叶片（VSV）控制规律进行吞砂适应性设计，当大涵道比发动机开始吞砂时，切换至适应吞砂的控制规律。在发动机主要吞砂状态下，吞砂控制规律相比正常控制规律，VBV开度增加，使更多的沙尘排向外涵道，减少沙尘对内涵道的影响；VSV向增加稳定裕度的方向调节，使发动机吞砂时具有更好的工作稳定性。

此外，在吞砂阶段，可配合设计高压压气机后过渡放气阀（TBV）规律，使一部分进入内涵道的沙尘通过TBV进入低压涡轮。这部分沙尘未经燃烧室高温燃烧，减少了高温沙尘沉积物，既可以减少燃烧室的附着物，也可以降低沙尘对涡轮导向器的堵塞。

#### 风扇、增压级部件设计

通过分析沙尘对压缩部件的影响，为使风扇更好地抵抗沙尘，风扇叶片应选用较强抗磨损能力的钛合金材料，此外，风扇、增压级和高压压气机部件应采用耐磨涂层，降低沙尘磨损影响，目前选用最多的为Ti/TiN涂层。

进入发动机的沙尘流迹主要有3类，如图3所示，其中A类沙尘经过风扇叶片后，直接由外涵道排入大气；B类沙尘进入发动机内涵道，经过发动机各主要部件；C类沙尘冲击风扇整流罩，一部分进入发动机外涵道，另一部分进入发动机内涵道。

根据沙尘流迹，对于A类沙尘可通过风扇叶型设计，使沙尘更好地由外涵道直接排出，降低对发动

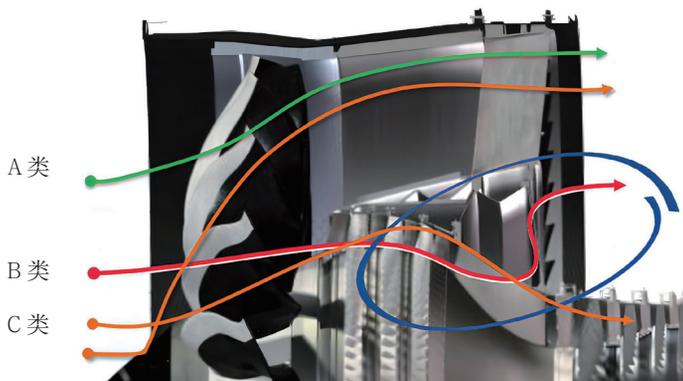


图3 进入发动机沙尘流迹示意

机内涵道的影响。

对于B类沙尘，一方面通过风扇叶型设计，使沙尘尽可能少地进入发动机内涵道，另一方面通过调整VBV的开度，使进入增压级的沙尘更多地由VBV排向外涵道。从图4可以看出，调整前，VBV由内涵道向外涵道打开，发动机利用内涵道压力( $p_{内涵道}$ )和外涵道压力( $p_{外涵道}$ )的差，将内涵道沙尘排至外涵道，但仍有相当一部分沙尘对内涵道产生影响；调整后，VBV由外涵道向内涵道打开，不仅可以利用内、外涵道气压差将沙尘排出外涵道，还可以利用沙尘对VBV的冲击使其排出外涵道，进一步降低沙尘对内涵道的影响。需要注意的是，调整后的VBV不仅对沙尘起到阻挡作用，且会对气流产生一定的节流影响，因此应对调整后的VBV进行评估和分析，保证发动机的性能和工作稳定性。

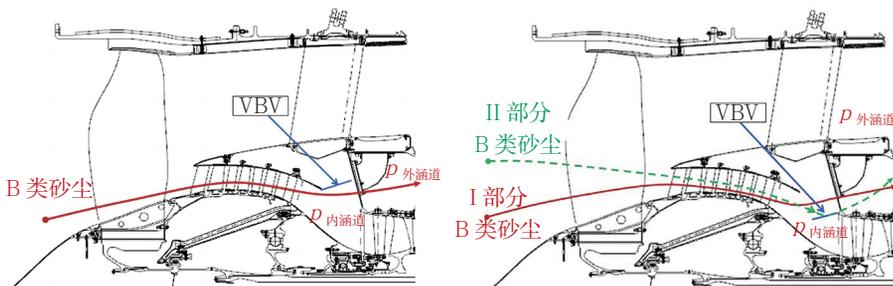


图4 VBV设计对B类沙尘流迹影响示意

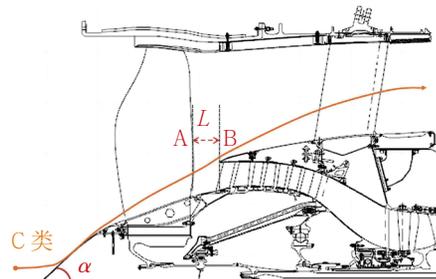


图5 风扇设计对C类沙尘流迹影响示意

面通过增加涡轮叶片的涂层，降低沙尘对涡轮叶片磨损；另一方面，为保证涡轮叶片气膜孔和冲击孔的可靠性，并缓解导向器堵塞对整机稳定性影响，需在冷却叶片上开设排尘孔，利用离心力与冷气流动使沙尘从排尘孔流出，避免因气膜孔、冲击孔的堵塞而导致冷却效率下降引起的叶片失效。

## 结束语

通过分析沙尘对发动机影响和研究防沙尘设计措施可知，粗砂主要对发动机进行磨蚀，使发动机风扇、增压级、高压压气机、燃烧室、涡轮等主要部件效率降低；细砂将导致冷却孔、涡轮导向器堵塞，产生沉积效应。粗砂和细砂共同的作用，直接影响发动机的性能、功能和稳定性，远期影响发动机的寿命与安全。通过开展应对吞砂的控制规律设计和风扇/增压级结构布局优化设计，可以减少进入内涵道的沙尘量，降低对发动机的影响；通过对涡轮优化设计和燃烧室检查清洗，可以降低沙尘对发动机堵塞和沉积的影响。从而保证发动机的稳定性和安全性，使发动机具备在沙尘环境下的工作能力。

航空动力

(唐宇峰，中国航发沈阳发动机研究所，高级工程师，主要从事航空发动机总体性能设计)