

颗粒污染物在涡轮中的沉积效应

Deposition Effects of Particles in Turbines

■ 杨星 郝子晗 丰镇平 / 西安交通大学

颗粒污染物在涡轮中的沉积会导致叶片的使用寿命、气动效率和冷却性能严重受损，影响发动机的安全性、可靠性和经济性。随着涡轮进口温度的不断提高以及先进冷却技术的应用，颗粒污染物在涡轮中沉积导致的问题更为突出，须加以重视。

航空发动机的经济性和可靠性除了受自身的影响，还与大气环境密切相关。随着重污染天气以及火山喷发和沙尘暴等自然灾害的频发，在飞行过程中吸入的颗粒污染物使得发动机的性能明显下降，严重时甚至会导致飞行事故。

颗粒污染物的来源与危害

航空发动机吸入的颗粒污染物主要包括风扇吸入的火山灰、沙粒、粉尘、海盐、碎片，以及航油燃烧时产生的颗粒物、灰烬与杂质等。

世界气象组织发布的2017年全球大气颗粒污染物分布公报显示，除了极地以及部分海洋区域外，全球大部分地区上空均有不同程度的颗粒污染物富集，多数集中在北半球热带、亚热带沙漠地区以及中亚和中蒙等中纬度沙漠地区^[1]，如图1所示。结合图1中航线示意图可以看到，航空发动机面临的大气颗粒污染物带来的挑战是全球性的且不可避免的。

在所有大气颗粒污染物中，火山灰又被称为是全球航空业的“大杀手”之一。据统计，自1973年以来已有超过100起火山灰导致航空发动机发生故障的报告，包括9起发动机熄火的严重事故。表1总结了火山

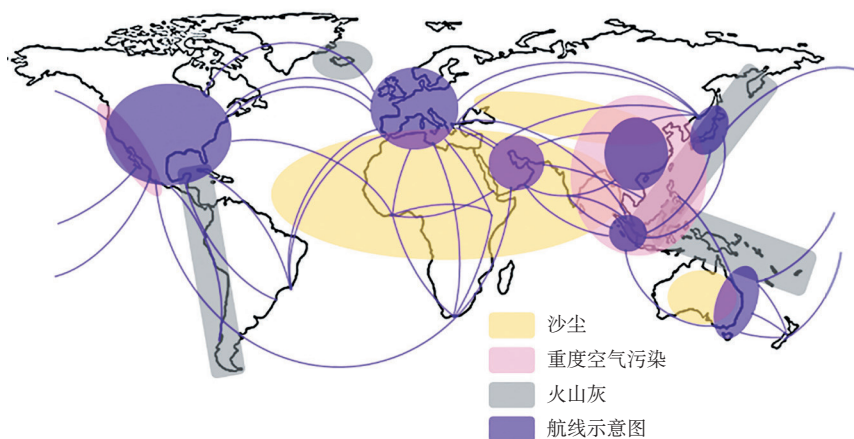


图1 全球航线示意图与大气污染集中区域图

表1 火山喷发导致的航空事故

年份	喷发火山名及国家	事故描述
1980	太圣海伦斯火山（美国）	发动机涡轮中累积了大量的火山灰
1982	加隆贡火山（印度尼西亚）	发动机涡轮中沉积了大量火山灰导致发动机失速
1985	索普坦火山（印度尼西亚）	波音747飞机的4台发动机全部损坏并起火
1989	堡垒火山（美国）	火山灰堆积导致荷兰航空公司波音747-400飞机的发动机熄火，但重新启动成功
1991	皮纳图博火山（菲律宾）	波音747-200飞机发动机的涡轮叶片气膜孔堵塞，热障涂层因高温烧蚀失效
2000	赫克拉火山（冰岛）	NASA DC-8-72试验飞机的发动机涡轮中堆积大量火山灰，叶片气膜孔被堵塞，热障涂层失效，叶片发生磨损
2006	马纳姆岛火山（巴布亚新几内亚）	“湾流”II公务机的2台发动机全部熄火，在飞机下降过程中2台发动机重新启动成功
2010	埃亚菲亚德拉火山（冰岛）	虽然没有发生安全事故，但整个欧洲空域禁飞2周，导致巨大的经济损失
2014	克卢德火山（印度尼西亚）	空客A320飞机安全着陆，但发动机严重受损
2017	巴厘岛火山（印度尼西亚）	机场关闭，所有航班取消，数万名旅客滞留机场

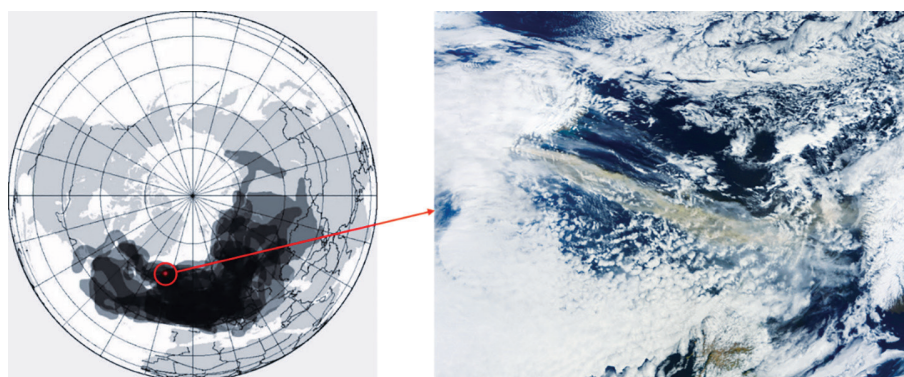


图2 2010年冰岛火山喷发期间冰岛至英国上空的火山灰卫星云图（来源：NASA）



2010年北京首都机场遭遇沙尘暴天气



运输机在沙漠环境中执行任务

图3 飞机在沙尘环境中起飞

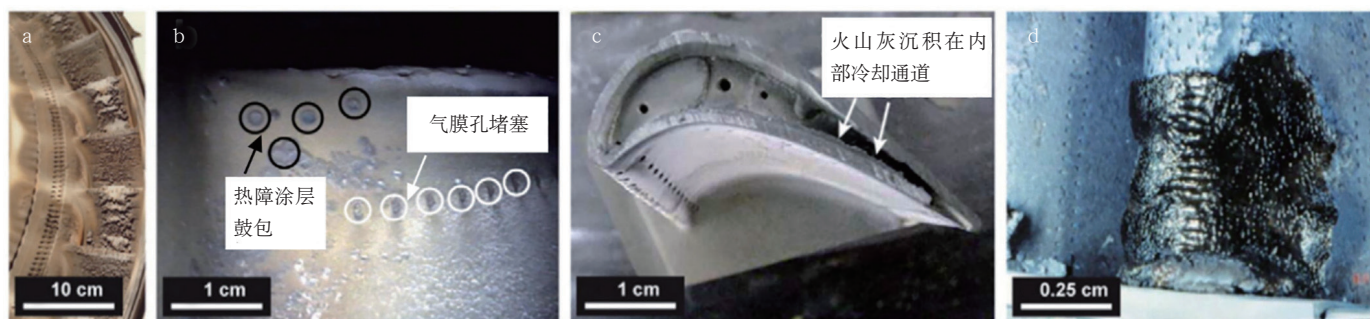
灰导致航空发动机发生故障的典型案例。最严重事故当属2010年3月和4月冰岛埃亚菲亚德拉火山两次喷发导致整个欧洲上空火山灰密布^[2]，如图2所示，欧洲空域航线被迫关闭数周，直接经济损失高达17亿美元。

此次事件也引起了业界对航空发动机因吸入颗粒污染物导致故障问题的高度关注。

当飞机遭遇沙尘环境时，发动机会吸入大量的沙尘及其他颗粒污染物^[3]，如图3所示。颗粒污染物对

航空发动机带来的危害极大，形式也十分多样，主要体现在：高速气流中的颗粒物对风扇和压气机叶片产生很强的冲蚀作用，影响叶片寿命，产生的污垢一方面使得压气机的性能恶化、易于失速，还会堵塞发动机的二次空气系统，影响后续部件的密封和热端部件的冷却；在燃烧室中，颗粒物会堵塞燃油喷嘴，引起燃烧压力变化且影响燃烧效率、导致积炭，还会造成燃烧室筒壁冷却孔堵塞、导致燃烧室衬套因高温而烧毁；经过燃烧室后，高速颗粒污染物在高温燃气中对涡轮叶片的侵蚀作用更加明显，严重影响叶片的使用寿命，同时颗粒污染物在高温作用下也很容易在涡轮叶片表面沉积，从而堵塞气膜孔和内部冷却通道，不仅会导致涡轮气动性能显著退化，还致使叶片的冷却性能严重下降，导致涡轮叶片被高温烧蚀^[4]（见图4）。

与冷端部件压气机相比，高温燃气涡轮中颗粒污染物的沉积问题有4个特点：第一，除了从风扇吸入颗粒物外，燃油在燃烧室中产生的高温灰烬或者积炭也是涡轮颗粒污染物沉积的重要来源，随着未来高密度碳氢燃料和生物质燃料等可替代新能源的使用，这一问题还可能会进一步加剧；第二，涡轮处于燃烧室下游，颗粒污染物在高温燃气中软化或者熔化后更容易黏附于涡轮叶片表面，从而产生沉积；第三，涡轮叶片采用了冷却技术，涡轮的气动效率、冷却性能以及颗粒污染物沉积三者之间存在复杂的相互干涉效应；第四，涡轮中高温燃气的速度较高，颗粒污染物冲击叶片导致的侵蚀更加严重。由此，结合表1



(a) 英国航空波音 747 的发动机高压涡轮第一级静叶灰烬沉积； (b) 和 (c) NASA 试验飞机飞过火山灰云后涡轮叶片表面的沉积物及被堵塞的气膜孔， (d) 沉积物导致叶片区域性熔化烧毁，造成的维修费用高达 8000 万美元

图4 航空发动机高压涡轮第一级静叶火山灰的沉积效应

和图4所示实际案例可知，高温燃气涡轮面临的颗粒污染物沉积带来的问题更具有挑战性。

涡轮中颗粒污染物的沉积机理及影响因素

气体中颗粒污染物的沉积问题本质上属于气溶胶科学的研究范畴。颗粒物的沉积问题研究最早是从简单直通道开始的，且在多数研究中，颗粒物与壁面作用后并不反弹，而是全部黏附于壁面，研究内容主要包括连续相雷诺数 (Re)、流动方向、重力、颗粒物直径以及温度等对颗粒物迁移及沉积规律的影响，属于基础性研究，目的是为了揭示颗粒物的沉积机理。在航空发动机中，由于流动和几何结构复杂多样，在高温燃气涡轮中还面临着高温、高压、高马赫数 (Ma)、高动叶转速以及非均匀来流等复杂严峻的热流环境，因此研究航空发动机高温燃气涡轮中颗粒污染物的沉积效应及机理面临着更大的技术挑战。

颗粒污染物在涡轮叶片表面的沉积研究主要涉及两个方面：一是颗粒污染物随主流的迁移运动；二是颗粒污染物冲击叶片表面后的黏附沉积或者反弹运动。在颗粒污染

物的迁移方面，根据颗粒动力学，影响颗粒污染物迁移运动的因素主要有：气动力（包括气动阻力）、涡泳、热泳、重力、升力、布朗运动以及颗粒物自身的惯性动量，这些因素有效地构成了颗粒物的迁移理论。在颗粒污染物沉积方面，决定颗粒污染物冲击涡轮叶片后是黏附于叶片金属表面还是被反弹的主要因素有燃气温度、叶片表面金属温度、冲击速度以及颗粒污染物的弹性特征等，这些因素有力地支撑了颗粒污染物的沉积机理。验证颗粒污染物沉积效应最有效的方式是开展真实航空发动机的颗粒污染物沉积试验。

美国在军用发动机YF101-GE-100中开展的颗粒污染物沉积试验结果如图5所示^[5]。然而在真实发动机条件下开展颗粒污染物沉积试验的成

本非常高，周期也很长，因此目前绝大部分试验是在模拟条件下开展的。模拟试验归纳起来主要有两类：一类是高温试验，颗粒污染物采用与真实航空发动机中沉积物成分相同的物质（如火山灰、沙粒、黏土等）；另一类是常温试验，颗粒污染物采用低熔点物质。颗粒污染物是否处于熔化状态是决定其在叶片表面是否黏附沉积的关键因素，因此两类试验方法均须保证颗粒污染物在进入涡轮叶栅时处于熔化状态，这与发动机真实条件是相符的。

影响颗粒污染物沉积最为重要的因素是颗粒污染物的温度、尺寸、形状、成分及浓度等。

温度的影响

温度的影响包括燃气温度和壁面温度。颗粒污染物黏附于叶片表面发生沉积主要取决于颗粒污染物

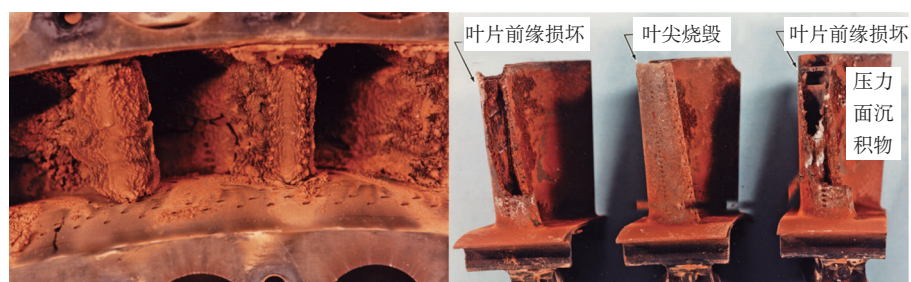


图5 美军YF101-GE-100发动机高压涡轮叶片的沉积试验结果

是否处于熔化状态。颗粒污染物冲击壁面的作用时间非常短，来不及与壁面发生热交换，颗粒物是否处于熔化状态则主要取决于燃气温度，因此随着燃气温度的升高，颗粒物在壁面的沉积量呈指数增加。叶片温度决定了沉积层的黏性，从而影响沉积效率^[6-7]，如图6所示。在燃气温度大于颗粒物熔点时，叶片温度越高，颗粒物的沉积现象越明显，然而在燃气温度低于颗粒物熔点时，叶片温度对颗粒物沉积影响不大。

颗粒污染物尺寸的影响

大尺寸颗粒物的比热容较大，冲击叶片表面时在壁面附近（热边界层中）得不到快速冷却，而小尺寸颗粒物的比热容较小，在壁面附近很快被冷却至叶片温度，因此随着颗粒物尺寸的增大，叶片表面的颗粒物沉积量逐渐增多，且叶片温度对颗粒物沉积的影响逐渐减弱。大尺寸颗粒物更容易黏附在叶片表面的另一个原因是其具有更大的动量，容易随自身惯性冲击壁面。一般采用无量纲斯托克斯（Stokes）数（Stk）来表征颗粒污染物对流场改变

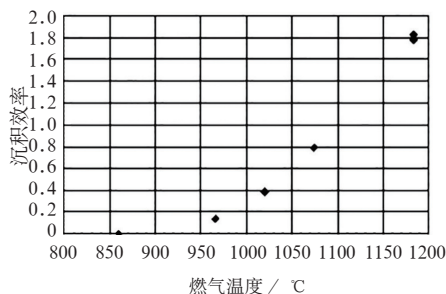
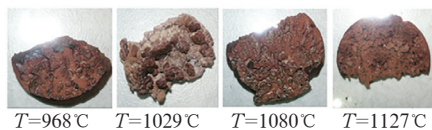


图6 不同金属表面温度时颗粒物的沉积情况以及沉积效率随燃气温度的变化情况

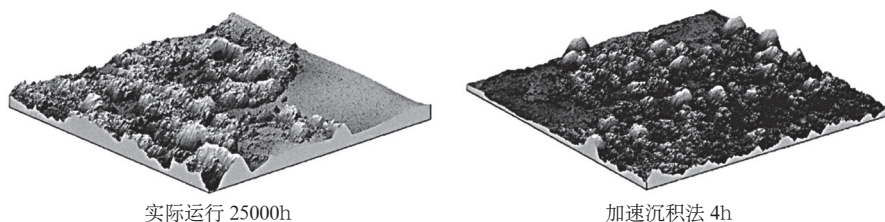


图7 涡轮叶片表面实际（左）以及加速沉积（右）情况下的沉积物分布

的反应快慢。Stk越大，颗粒物越容易保持自身运动轨迹而不随主流流动方向的改变而改变，因此越容易冲击到叶片表面。

颗粒污染物化学成分的影响

航空发动机中的沉积物主要为沙粒、火山灰、粉尘和黏土等多种物质，主要成分是氧化硅、硅酸盐、氧化钙、氧化镁和氧化铝等。多种成分组成的颗粒污染物的熔点一般低于单一成分颗粒污染物的熔点，因此颗粒污染物化学成分的影响主要是改变其熔点，导致在相同燃气温度下，颗粒污染物在叶片表面的沉积效率有所不同。由于颗粒污染物中的钠、硫和钒等元素对涡轮叶片具有腐蚀作用，通常在燃油中加入含镁元素的添加剂来抑制氧化钒和氧化硫等对叶片的化学腐蚀。

颗粒污染物浓度的影响

颗粒污染物的沉积效率主要受燃气温度及颗粒物大小的影响，其沉积量则主要受燃气中颗粒污染物浓度的影响。据此，为了在试验中短时间内模拟航空发动机在真实条件下运行上万小时才产生的沉积量，可通过增加颗粒污染物的浓度来实现，该方法被称为加速沉积试验法。图7示出了经过4h的加速沉积试验后，涡轮叶片试验件上产生了相当于航空发动机实际运行25000h后产生的颗粒污染物沉积量^[8]。

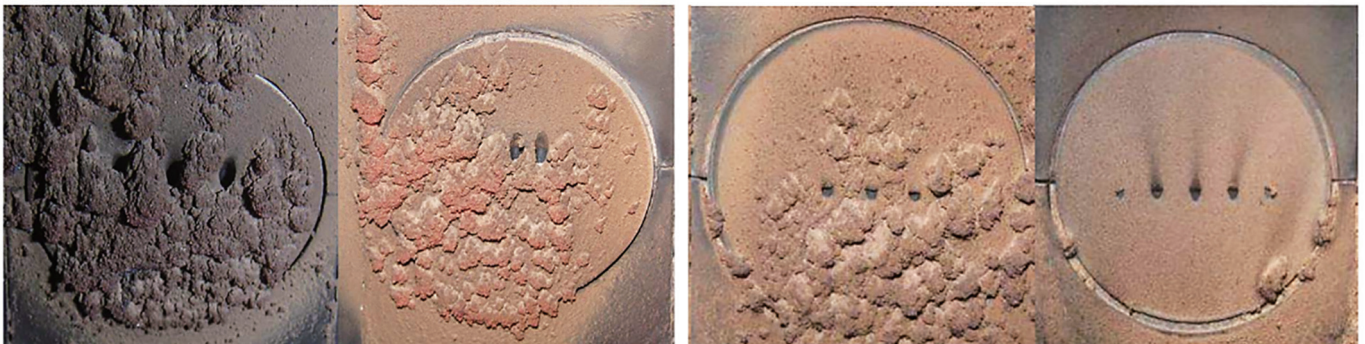
沉积物与涡轮叶片气热性能的相互作用

沉积物对涡轮气动性能的影响

颗粒污染物在进入涡轮后通常沉积在叶片的前缘以及压力面，改变了叶片的有效弦长以及原有型线，限制了气流转向，改变了气流的进口以及出口角度；同时，由于沉积在压力面的颗粒沉积物减小了涡轮叶栅通道喉部的有效通流面积，限制了燃气流量，从而降低了涡轮的做功能力。在涡轮动叶中，大尺寸的颗粒污染物在离心力的作用下向叶尖迁移并且在叶尖附近沉积。由于颗粒沉积物中的某些成分对叶片有一定的化学腐蚀作用，叶尖相对较薄，颗粒污染物在此沉积会损坏叶尖结构，从而增大叶尖间隙，使得泄漏流损失增加，降低涡轮效率。小尺寸的颗粒污染物具有更加分散的沉积分布特征，这增大了叶片表面的粗糙度，破坏了层流边界层的形成，加速了边界层由层流向湍流转变。在此影响下，在叶片吸力面更容易出现流动分离或者转捩点提前的现象，从而对涡轮的气动性能产生影响。

颗粒污染物沉积与叶片换热冷却

颗粒污染物的沉积与叶片换热冷却之间存在相互作用与影响的关系。沉积物增加了叶片表面的粗糙度，导致叶片表面的换热系数大幅



(a) 不同气膜孔间距下试验件表面的沉积结果

(b) 不同吹风比下试验件表面的沉积结果

图8 不同气膜孔间距和不同吹风比下试验件表面的沉积物分布情况

增强，同时可能堵塞叶片表面的气膜孔，导致气膜冷却性能急剧下降。颗粒污染物还可能进入二次空气系统在叶片内部冷却通道中沉积，改变内部冷却结构，削弱冷气与叶片之间的换热效果。相反，叶片表面的气膜冷却射流也会对颗粒污染物的沉积产生影响。冷气射流既可以改变颗粒污染物的迁移轨迹，也会改变叶片表面的金属温度和颗粒污染物的温度，从而影响颗粒污染物在叶片表面的沉积规律和特性^[9]，如图8所示。

事实上，颗粒物在叶片表面上的沉积是一个非定常过程。随着沉积时间的增加，叶片表面的沉积物逐渐增厚，改变了叶片表面的状态，从而影响颗粒污染物的沉积效率。同时，在发动机服役期间，叶片表面沉积物的厚度并不是一直增加的，而是在到达一定厚度后不再增厚，即颗粒污染物在叶片表面的沉积厚度在一定时间后会达到动态平衡。当然，这种动态平衡会明显地受到涡轮叶栅非定常流动特征的影响。

结束语

虽然航空发动机中颗粒污染物的沉

积问题由来已久，但并未引起足够的重视，相关基础与应用研究还十分薄弱。涡轮叶栅内部复杂流动中颗粒污染物的动态沉积特性，以及沉积物与涡轮叶片气热特性的耦合作用机制，将是未来研究需要重点突破的方向。在研发和设计阶段充分考虑大气颗粒污染物的沉积效应，将是提高航空发动机市场竞争力的重要保障之一。

航空动力

(杨星，西安交通大学，助理研究员，主要从事涡轮流动换热机理与叶片先进冷却技术研究)

参考文献

[1] Forsyth P. High temperature particle deposition with gas turbine applications [D]. Oxford: University of Oxford, UK, 2017.

[2] NASA. Photograph of volcanic ash cloud [R/OL]. www.nasa.gov, 2010.

[3] Rory A F B. A study of the effects of turning angle on particle deposition in gas turbine combustor liner effusion cooling holes [D]. Columbus Ohio: The Ohio State University, USA, 2016.

[4] Giehl G, Brooker R A, Marxer H, et al. An

experimental simulation of volcanic ash deposition in gas turbines and implications for jet engine safety [J]. Chemical Geology, 2017, 461: 160-170.

[5] Dunn M G. Operation of gas turbine engines in an environment contaminated with volcanic Ash [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134.

[6] Anderson R J, Logan R G, Meyer C T, et al. A combustion/deposition entrained reactor for high-temperature/pressure studies of coal and coal minerals [J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61: 1294-1302.

[7] Crosby J M, Lewis S, Bons J P, et al. Effects of temperature and particle size on deposition in land based turbines [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130.

[8] Jensen J W, Squire S W, Bons J P, et al. Simulated land-based turbine deposits generated in an accelerated deposition facility [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127: 462-470.

[9] Ai W, Murray N, Fletcher T H, et al. Effect of hole spacing on deposition of fine coal flyash near film cooling holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 134.