

美国和俄罗斯航空发动机火山灰环境试验研究

Study on Volcanic Ash Environment Test of Aero Engine in USA and Russia

■ 张娜 / 中国航发四川燃气涡轮研究院 李存 张星 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司

火山喷发形成的火山灰会对航空发动机的正常运行造成重要影响。由于发动机正常工作时内部工作温度显著高于火山灰熔点,在飞行过程中发动机吸入的火山灰熔化后会附着于部分零件表面,引起发动机喘振甚至停车,严重威胁飞行安全。

火山喷发经常会向空气中释放出大量的火山灰,当这些火山灰上升到对流层顶部时,会严重威胁飞机的飞行安全。自从1982年英国航空公司的一架从马来西亚飞往澳大利亚的波音747飞机因遭遇火山灰而导致4个发动机停止工作以来,航空业就意识到火山灰对航空安全的严重影响。欧洲航空安全局(EASA)于2015年在航空发动机适航审定规章CS-E-1050中增加了火山灰对航空发动机危害程度的评估条款,美国、俄罗斯也相继开展了发动机火山灰环境试验^[1-5]。

火山灰对航空发动机的影响

火山灰对航空发动机零部件的影响主要表现为压气机/低压涡轮叶片出现侵蚀和磨蚀性损伤、燃油喷嘴堵塞、燃烧室零组件和高压涡轮叶片上形成火山灰沉积物等。由于发动机正常工作时燃烧室和涡轮内部温度远高于火山灰熔点,发动机吸入的火山灰会被高温熔化,并在涡轮导向器、涡轮叶片等零件上沉积,进而引发一系列的故障,甚至是发动机空中停车。压气机叶片上出现侵蚀和磨蚀性损伤、热端部件(首

先是高压涡轮第一级导向叶片)上出现玻璃状沉积物最为危险,会导致压气机连续出现喘振、发动机推力丧失^[6-7]。

飞机正常飞行中遭遇火山灰云会造成严重程度不一的后果。根据国际民航组织规定,飞机遭遇火山灰云的后果严重程度指数分“0~5”6个等级:“0”表示飞机未受火山灰影响;“1”表示客舱中含有少量火山灰或氧气不能用于呼吸;“2”表示客舱中含有大量火山灰或空调系统被污染(需要氧气),或发动机出现磨蚀性损伤和火山灰沉积物;“3”表示发动机工作状态不稳定并出现损伤;“4”表示发动机出现临时故障,需要执行空中再起动力;“5”表示发动机失效或出现其他事故性损伤。发动机受损、失效或暂时故障均属后果严重程度指数较大的状况(对飞机最危险),而机身有磨蚀性损伤、空气中含有火山灰和能见度降低,则属于影响飞行安全的次要危险。

俄罗斯航空专家波波瓦(D.D.Popova)针对1935—2021年期间发生的共计156起飞机遭遇火山灰云的事件进行了统计分析,并对其

后果严重程度进行了研究总结,其中在101起事件中飞机和发动机出现不同程度的损伤,36起事件中飞机和/或发动机受到严重甚至非常严重的损坏(其中10起事件中出现发动机空中停车的情况)。

美国航空发动机火山灰环境试验

美国Calspan公司最先秘密开展了F100发动机的火山灰环境试验,此外,美国国家航空航天局(NASA)于2015年对F117(PW2040的军用型)涡扇发动机开展了火山灰环境试验。

Calspan公司

美国Calspan公司是一家主要为航空航天和国防工业领域提供工程测试和技术开发服务的独立供应商。Calspan公司通过秘密开展火山灰环境试验首次全面研究了火山灰对航空发动机的影响机理,并对火山灰影响进行了评估。

Calspan公司在火山灰浓度较高条件下(84.92min内喷撒59.46kg火山灰)对F100发动机进行了试验。试验期间,高压压气机叶片出现侵蚀磨损(见图1),使得压气机气动稳定性裕度及压比降低,发动机整



图1 F100发动机流道吸入火山灰引起的压气机叶片侵蚀

体工作性能下降。另外，发动机在火山灰浓度达 $500\text{mg}/\text{m}^3$ 时发生了喘振，导致压气机叶片出现严重机械损伤；燃油喷嘴上出现状如黑色积碳的碳沉积物，这些沉积物虽未堵塞中心供油孔，但是喷嘴上的碳沉积物严重损害了燃油雾化效果；高压涡轮导向器叶片上出现沉积物，其形状和特点与1982年遭遇印度尼西亚加隆贡火山灰云的JT9D发动机叶片上的沉积物类似。

NASA

为了开发先进的健康管理系统和智能传感器并将其应用于下一代商用航空发动机，NASA实施了飞行器综合推进研究（VIPR）项目，旨在通过一系列的发动机装机条件下的试验，验证发动机气路故障诊断技术和智能传感器效果。2015年，在该项目的第三阶段，NASA与多家政府机构和企业合作开展了一系列发动机火山灰环境试验，模拟飞行中发动机吸入火山灰的场景，试验



图2 向机翼上的PW2040发动机喷撒火山灰的试验装置

装置如图2所示。

NASA在VIPR项目框架下开展火山灰环境试验时采用的发动机是F117。试验期间，涡轮第一级导向叶片上、燃烧室机匣上均出现沉积物。通过试验评估了发动机工作时间和火山灰浓度变化条件下火山灰对发动机的影响，并得出结论：工质中火山灰浓度较高（超过 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ）或浓度较低但持续时间长（约 $1\text{mg}/\text{m}^3$ ，427min）都会引起冷却系统堵塞和涡轮叶片间通道流通面积减小（见图3），以及燃烧室机匣上产生沉积物（见图4）。

F117发动机燃烧室机匣上的沉积物在火山灰浓度不同时形式也不

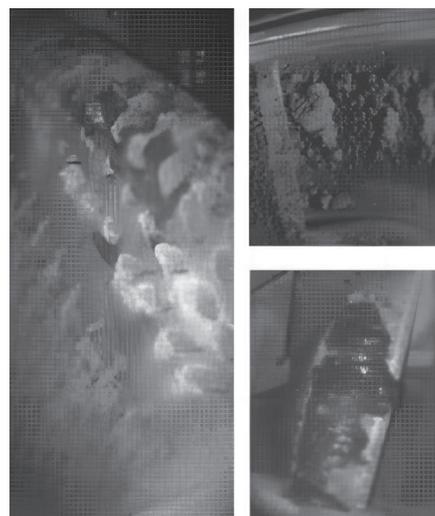


图3 PW2040发动机涡轮第一级导向器叶片上的火山灰沉积物

同：火山灰浓度为 $100 \sim 2000\text{mg}/\text{m}^3$ 条件下工作 $3 \sim 6\text{min}$ 时发现有碳沉积物，火山灰浓度为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 条件下工作 175min 时发现有玻璃状沉积物（见图4）。

俄罗斯航空发动机火山灰环境试验

2021年5—6月，俄罗斯中央航空发动机研究院（CIAM）在Ts-17T室内地面试车台开展了PD-14发动机核心机火山灰环境试验。该试验是俄罗斯首次就火山灰对燃气涡轮发动机影响问题开展的试验研究，同时也是欧洲航空安全局CS-E1050“在火山灰污染空域飞行（火山灰云



图4 VIPR项目框架下喷撒火山灰后燃烧室零件上的沉积物

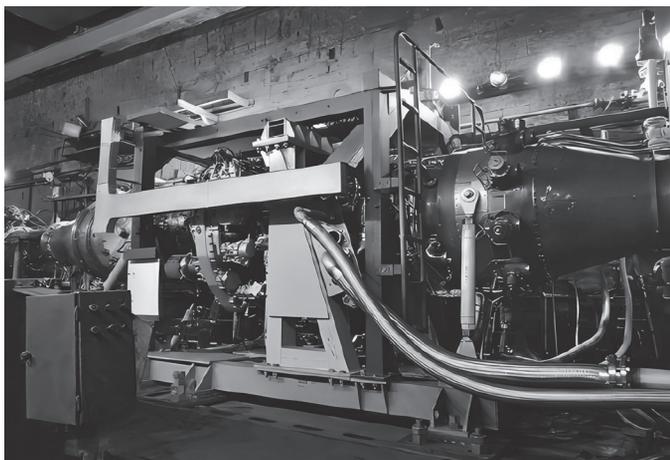


图5 PD-14核心机在Ts-17T试车台上的布置

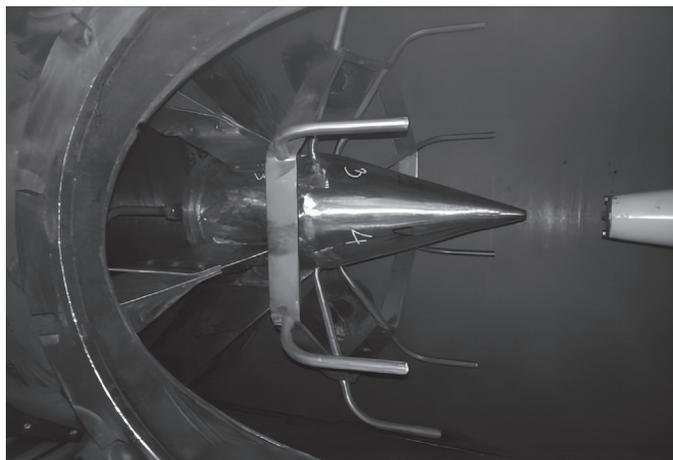


图6 火山灰喷撒设备

危险因素影响)”条款要求的PD-14发动机型号合格验证试验的工作内容。

在1h的试验时间内，CIAM按剂量向核心机进口喷撒了总质量为0.828kg、浓度为 $4\text{mg}/\text{m}^3$ 的火山灰。PD-14发动机核心机在Ts-17T试车台上的布置及火山灰专用喷撒设备如图5和图6所示。

试验期间，涡轮第一级所有导向叶片上均出现沉积物；第一级转子叶片和二级导向叶片上可见沉积物相当少（小于表面积0.01%，呈直径 $0.2 \sim 0.6\text{mm}$ 的滴状物）。涡轮二级转子叶片及随后顺气流方向未见沉积物。第一级导向叶片上可见因滴状物朝空气流动方向散流



图7 1h内浓度为 $4\text{mg}/\text{m}^3$ 的火山灰作用下，涡轮第一级导向叶片叶盆处的玻璃状沉积物

而产生的狭长形玻璃状沉积物，且第一级导向叶片上出现的沉积物比高压涡轮其他叶片上的多很多（见图7）。燃烧室火焰筒的导流板和隔热板上有尺寸不超过 0.5mm 的深棕色微小球状（块集岩）玻璃状沉积物。

在喷撒火山灰后，PD-14发动机燃烧室火焰筒隔热板和导流板上也出现深棕色玻璃状沉积物，这些沉积物由燃烧区火山灰颗粒形成，呈不大于 0.5mm 的小球状（烧结块）。隔热板和导流板表面火山灰沉积物最密集的位置形成了厚度不超过 $0.5 \sim 0.6\text{mm}$ 的薄膜。

试验结果、核心机分解结果、零件故障检测结果分析表明：火山灰喷撒过程中，PD-14发动机核心机参数实际未发生变化；压气机、燃烧室、涡轮、外部系统零件、管路和电子通信线路状态良好，可进一步使用；向PD-14发动机进口喷撒火山灰未引起其推力性能降低，未导致不良后果；发动机零件未见有火山灰颗粒导致的腐蚀。

展的发动机火山灰环境试验，可以看出二者存在以下区别。

一是美国开展火山灰试验研究的时间早于俄罗斯。美国开展发动机火山灰环境试验的时间是2015年，而俄罗斯则是2021年，俄罗斯比美国足足晚了6年。EASA 2015年将火山灰对发动机危害程度的评估纳入了适航规章，而美国开展火山灰环境试验的时间恰巧也在2015年。可见，美国是在EASA新规出台当年就迅速启动了火山灰环境试验，相比包括俄罗斯在内的其他国家更早期在该领域开展研究和积累经验。

二是美国和俄罗斯开展试验的背景和目的有区别，由此采用的发动机成熟度等级也不同。美国开展火山灰试验依托的是VIPR项目，该项目旨在通过试验验证发动机气路故障诊断技术和智能传感器效果，美国开展火山灰试验的目的更多是了解发动机装机条件下火山灰会对发动机带来何种影响。因此，在VIPR项目第三阶段开展火山灰环境试验时，美国采用的装备是一架C-17运输机及原定退役的两台F117发动机。而俄罗斯开展火山灰试验

美俄试验对比

通过对比分析上述美国、俄罗斯开

是为了完成新发动机取证的考核要求。按照EASA新规，俄罗斯针对新型客机MC-21研发的新型发动机PD-14，若要通过国际适航取证，需开展火山灰环境试验，评估火山灰对发动机的危害程度。因此，俄罗斯2021开展PD-14火山灰试验是为满足EASA适航规章要求，而美国2015年开展F117发动机火山灰试验更多出于利用新型试验探索与验证先进测试技术的目的。

三是美国和俄罗斯的试验思路 and 具体试验方法不同。美国按不同火山灰浓度、不同时长和不同吸入量组织多轮试验，且试验是发动机装在飞机上开展，更接近真实条件；俄罗斯试验的思路是在特定单位时间内分剂量向核心机进口喷撒相同浓度的火山灰，且试验是在室内地面试车台开展。2015年，美国使用颗粒直径为5~60 μm 的玛扎玛火山的火山灰开展了5轮火山灰试验，试验发动机为F117，试验火山灰浓度分别为1 mg/m^3 、1 mg/m^3 、1 mg/m^3 、10 mg/m^3 、10 mg/m^3 ，相应发动机工作时间分别为90min、68min、269min、175min、235min，发动机吸入火山灰总量依次为0.730kg、0.549kg、2.156kg、11.017kg、14.465kg；2021年，俄罗斯采用勘察加半岛希韦卢奇火山颗粒直径10~100 μm 的火山灰开展了试验，试验发动机为PD-14，1h内按剂量向PD-14发动机核心机进口喷撒了浓度为4 mg/m^3 （该浓度为欧洲容许最大浓度）的火山灰，喷撒总质量为0.828kg。两国火山灰环境试验信息对比如表1所示。

结束语

在发动机火山灰环境试验研究方面，

表1 美国和俄罗斯发动机火山灰环境试验信息对比

参数名称	美国	俄罗斯
试验时间	2015年	2021年
试验发动机	F117	PD-14
试验设备	C-17飞机	Ts-17T地面试车台
发动机工作时间/min	90、68、269、175、235	60
火山灰浓度/(mg/m^3)	1、1、1、10、10	4
火山灰吸入总量/kg	0.730、0.549、2.156、11.017、14.465	0.828
火山灰来源	玛扎玛火山	希韦卢奇火山
火山灰颗粒直径/ μm	5~60	10~100

美国和俄罗斯无疑走在了世界前列。开展航空发动机火山灰试验，一方面受到美国和俄罗斯两国境内多个活火山对航空飞行安全威胁的客观环境所迫，另一方面受EASA出台的新研发动机适航取证新规驱使。我国活火山数量相较这两国极少，地域条件上航空飞行安全受到火山喷发的威胁较小，但从新研发发动机的国际化发展角度来看，也需预先开展航空发动机火山灰环境试验的理论研究，分析国外的试验思路和方法，借鉴其中的成熟经验，建立研发火山灰试验设备和方法的技术储备，为我国新研航空发动机开展并通过国际适航取证奠定基础。

（张娜，中国航发四川燃气涡轮研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）

参考文献

[1] ПОПОВА Д Д,САЖЕНКОВ А Н.Воздействие вулканического пепла на авиационные газотурбинные двигатели[J]. Вестник ПНИПУ,2022,70:122-139.
 [2] ИНОЗЕМЦЕВ А А,ПОПОВА Д Д,АБРАМЧУК Т В.Исследование

устойчивости авиационного двигателя ПД-14 к воздействию вулканического пепла[J]. Вестник УГАТУ,2022,26, 2 (96):60-70.

[3] ГИРИНА О А,МАНЕВИЧ А Г,МЕЛЬНИКОВ Д В.Извержения вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. и их опасность для авиации[J].Вулканология и сейсмология,2019, 3: 34-48.
 [4] МАЛЬКОВСКИЙ С,СОРОКИН А А,ГИРИНА О А.Развитие информационной системы численного моделирования распространения пепловых облаков от вулканов Камчатки и Курил[J].Вычислительные технологии,2019,24, 6:79-89.
 [5] 卜旭东.国外航空发动机火山灰环境试验研究综述[J].工程与试验,2022, 4:1-4.
 [6] 梁毅强,许建东,于红梅.火山与航空安全[J].城市与减灾, 2018(5):30-34.
 [7] 赵谊,李永生.火山灰对航空安全的影响及其监测[C]//中国地震学会空间对地观测专业委员会2012年学术研讨会论文集摘要集,2012.