

# 飞机动力装置安装系统橡胶材料标准研究

## Study on Rubber Material Standard for Installation System of Aircraft Powerplant

■ 师永宁 段宇星 赵苗苗 / 中国飞机强度研究所

随着民航业的发展，商用飞机动力装置的性能不断提高、国产化需求日益突出，动力装置安装系统用橡胶材料研究和标准规范的建立，对国产橡胶材料的适航及标准化具有指导意义。

飞机的动力装置一般指飞机发动机以及保证飞机发动机正常工作所必需的系统 and 附件，此外还包括辅助动力装置（APU）。动力装置安装系统的核心功能元件一般由高性能阻尼橡胶材料制成，橡胶材料具有超弹性与黏弹性特征，同时也对温度、频率及振幅较为敏感。

美国、俄罗斯等国在投入精力研发新型橡胶材料及工艺技术的同时，已经积累了大量橡胶材料在飞机动力装置上的应用数据，并在此基础上，开展了可靠性分析与使用寿命评定研究工作<sup>[1]</sup>。随着国内发动机减振技术及国产化高性能橡胶材料的快速发展，材料标准体系建设凸显出越来越重要的作用。虽然，在橡胶材料标准建设上已构建了相关体系，但仍存在通用合成橡胶具有相对完整的标准体系，高端领域使用的橡胶材料标准体系研究匮乏、采标和修订滞后等现象。为更好地推进我国飞机动力装置安装系统及其领域用国产材料的技术发展，研究橡胶材料的标准并建立材料标准体系成为亟待着手的工作。

### 材料的适航审定要求

材料是构成动力装置的物质基础，

需要建立完善材料标准来保证材料性能的稳定性和适用性。材料标准作为技术体系的重要组成部分，既是设计制造的指导文件，又是性能稳定的基础保证，也是适航审定的重要依据。

各航空器的适航规章都对材料提出了直接审定要求。《航空发动机适航规定》（CCAR-33）材料专用条款第33.15条提出，发动机所用材料的适用性和耐久性必须满足：建立在经验或试验的基础上；符合经批准的规范（工业或者军用规范），保证这些材料具有设计资料中采用的强度和其他性能。中国民用航空局适航审定司编制的《航空器型号合格审定程序》（AP-21-AA-2011-03-R4）中也将材料作为适航制造符合性检查时应考虑的重点，并规定：在制造过程中使用的原材料是否与型号资料相符合；是否有证据能够保证原材料的化学和物理特性得到确定和检查；是否有文件性证据表明从原材料到原型零件的可追溯性；是否有对不符合提交的型号资料要求的任何零件或工艺过程的偏离记录。

适航审定时材料的具体选用规则包括：选用的材料应有足够的数据和经验，即成熟材料已积累一定

数量批次的性能数据；选用的材料应有正式标准，材料标准应经过适航管理机构或其他权威机构认可，对于美国联邦航空局（FAA）和欧洲航空安全局（EASA）直接接受的行业材料标准，在说明适用性的前提下，可提供材料数据作为符合性证据，如美国汽车工程师协会（SAE）的宇航材料规范（AMS），对于国内行业材料标准，需表明用于材料标准建立的生产处于稳定和设计值满足适航要求，如航空工业行业标准（HB），国家军用标准（GJB）等；设计适用的材料性能数据应在制定手册中选用<sup>[2-3]</sup>。

在进行适航审定时，橡胶材料需要按照适航规定与审定程序进行。一般推荐选用经过适航管理机构或其他权威机构认可的材料标准，如AMS。但是，国内很难获取到符合AMS的橡胶材料原材料，国产橡胶产品一般采用国产橡胶原材料进行加工，产品若需进行适航审定时，一般应自行建立橡胶材料标准规范<sup>[4-5]</sup>。

总体而言，材料适航审定的要求是通过材料标准和性能数据来审查。材料标准由能够实现材料性能全面控制的代表性项目构成，指标

由多个批次数据基于统计方法生成。材料、材料标准、材料性能数据三者缺一不可。

## 飞机动力装置安装系统环境的特点

动力装置在飞机中的安装环境属于恶劣环境，具有典型的大转载、强振动、高低温特点，同时也有湿热、盐雾、霉菌、酸性大气、沙尘、防火等环境适应性要求。

### 大转载、强振动、高低温、防火性安装环境

在功能上动力装置安装系统属于减振与力传递系统，应满足飞机在各种工况下产生振动时仍正常工作，在全生命周期内不因经受长期振动而出现故障。在应急着陆情况下应不破损和脱落危及乘员的安全，不使任何撤离设施失效并影响乘员撤离，不会穿透油箱、管路或损坏相邻系统而引发火灾或伤害性的爆炸，在坠撞安全试验条件中保证安装系统的连接可靠性<sup>[6]</sup>。同时，安装系统区域属于火区，是飞机安全的关键设备，应具有一定的防火性能，系统应在承受不低于1100℃的火焰环境后仍能满足必要的力学支撑功能，必要时橡胶材料应具有不易燃及自熄的特性。

动力装置在飞机中的安装环境属于高温区，即飞机飞行过程中受局部高温环境影响的区域，温度高于71℃，包括动力装置邻近高温区、短舱部位等。一般要求温度范围在-55~120℃，短时诱发高温可达200~250℃。同时，由于此环境为非气密区，动力装置安装系统应能适应在-73℃飞行环境条件下短时间持续使用，还应能保证在

温度冲击环境后可以正常工作，并具有低气压和高温、高湿二者循环作用的环境适应能力。

### 其他通用机载环境适应性要求

动力装置安装系统环境应具有典型的机载设备耐湿热、盐雾、霉菌、酸性大气的要求。包括在高温和高湿环境下的适应性，在黑曲霉、黄曲霉、杂色曲霉、绳状青霉、球毛壳霉和短柄皱霉等典型菌种环境下的适应性，以及在标准的中性或者酸性盐雾下的适应性。

在飞行、维护和停机等大部分状态下，动力装置环境都不会直接受到雨水冲击，但可能由于机体非气密舱上部结构密封失效或冷凝产生滴水情况，因此安装系统环境还应具有满足滴水条件下正常工作的要求。

动力装置安装系统不属于暴露在飞机机舱外的机载设备，但仍需要在起飞和着陆阶段暴露于外部沙尘环境下，以及在地面使用/维护时也可能暴露于沙尘环境中工作。

## 橡胶材料性能标准规范的建立

飞机动力装置安装系统环境复杂，

对橡胶材料的性能提出了苛刻的指标要求，针对这种特殊环境下的橡胶材料，材料标准规范的建立十分重要。一般而言，航空橡胶材料性能标准规范中应包含材料的基本性能、功能性能、环境适应性性能、热老化性能、疲劳性能等。而动力装置安装系统适用的橡胶材料是一种阻尼功能材料，还需要对材料的阻尼性能指标进行规范。

### 基本性能规范的建立

橡胶材料的基本性能包括5项核心指标，即材料硬度、拉伸强度、拉断伸长率、撕裂强度与压缩永久变形。对基本性能的测试已经拥有成熟的测试标准体系，在适航审定过程中，一般采用美国材料与试验协会（ASTM）标准。

### 环境适应性性能规范的建立

依据动力装置安装系统所处环境，橡胶制品的环境适应性性能应对振动、噪声、冲击、坠撞、高温、低温、高度、盐雾、湿热、霉菌、沙尘、结冰、流体等多重环境进行考核。在适航审定时，橡胶材料的耐高温性能可依据ASTM D573进行，测试其在高温环境中的性能变化；耐低温性能



动力装置安装环境适用橡胶材料性能及寿命矩阵

可依据 ASTM D2137 进行, 测试其在低温下是否发生脆性变化, 保证橡胶制品在低温环境下的使用安全; 耐液体性能可依据 ASTM D471 进行, 测试其在不同液体环境中材料的溶胀率或性能变化; 盐雾、湿热、霉菌等其他性能一般可依据 RTCA/DO-160 进行测试。

### 阻尼性能规范的建立

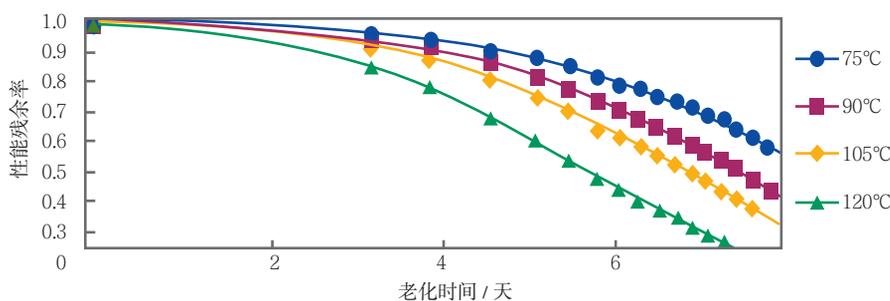
动力装置安装系统中橡胶材料主要用于振动控制及减振降噪, 其功能性能即为阻尼性能指标。阻尼性能的测定没有广泛认可的 ASTM 标准, 航空工业强度所制定了《硫化橡胶或热塑性橡胶阻尼性能的测定》(ASRIC/QS 029—2023) 标准, 热动态机械分析仪 (DMA) 可用于动力装置安装系统中橡胶材料的阻尼性能的测定, 并给出具体的试验件规格, 试验条件及合格判据。针对动力装置安装系统的橡胶材料, 可按照上述试验方法测试性能指标, 并进行材料特性试验, 多批次验证指标的稳定性与可靠性, 依据统计方法确定出橡胶材料科学合理的性能指标值。

## 橡胶材料寿命标准规范的建立

随着航空航天和尖端军事装备研发领域对动力装置安装系统橡胶产品可靠性的要求越来越高, 橡胶寿命的定量评定方法研究已成为橡胶应用研究中的一个重要内容。橡胶产品的寿命不仅有类似于金属产品的疲劳寿命指标, 还有老化寿命指标。

### 老化寿命机理

橡胶产品常因受热、空气中的氧和臭氧、阳光、风、雨、雪、水分, 以及使用过程各种机械应力作用或化学溶剂的侵蚀, 使得化学结构受



基于 Boltzmann 函数拟合老化参数

到破坏, 变得疲软或硬脆龟裂、表面粗糙、力学性能下降, 随时间推移逐渐丧失使用价值。动力装置安装系统所使用的橡胶材料一般很少受到阳光直射以及雨雪的覆盖, 绝大部分是受到热氧老化侵蚀导致安装节失效。因此, 可通过橡胶材料的热空气老化性能来表征橡胶材料的老化寿命。热空气加速老化寿命试验是一项较为通用成熟的老化寿命测试方法, 其原理为基于阿累尼乌斯 (Arrhenius) 公式进行外推计算的方法。

航空工业强度所研发的航空橡胶材料已通过了多项加速老化寿命测试分析, 并形成基于热加速老化模型的航空阻尼硅橡胶储存寿命分析软件, 橡胶材料寿命可达15年以上。

### 疲劳寿命曲线及产品寿命推算方法的建立

目前, 橡胶材料的疲劳寿命并没有成熟通用的测定与考核方法。当前可用的验证方法主要包括基于连续介质力学理论的裂纹萌生疲劳寿命分析方法与基于断裂力学理论的裂纹扩展寿命分析方法。

前者由于标量形式的疲劳预测因子无法准确评估复杂加载条件下橡胶材料内部真实的损伤状况和裂纹萌生情况, 仅对单轴加载方式和简单幅值周期性载荷条件下的橡胶

构件疲劳试验结果有较好的预测性, 在多轴、变幅载荷加载条件下, 寿命预测的准确性常和试验结果有较大差异, 预测出的疲劳危险区域位置和实际情况也会出现较大偏差, 因此预测橡胶材料的疲劳寿命存在很大的局限性。

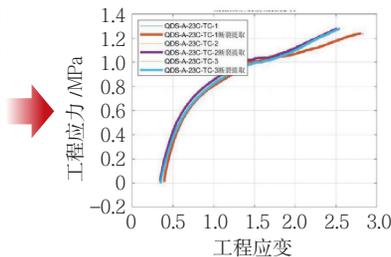
断裂力学的概念最先由格里菲斯在1920年首次提出, 格里菲斯在研究金属疲劳问题时提出: 缺口固体的机械能与裂纹表面能满足能量守恒定律; 裂纹扩展是储存在变形固体内部的能量转换到新的裂纹表面的过程。基于断裂力学的方法建立的能量平衡方程是基于整个固体而言的, 不需要裂纹尖端的应力应变场信息, 这种方法被广泛用于聚合物材料的疲劳问题研究中。里夫林和托马斯将格里菲斯的方法应用于橡胶材料撕裂问题的研究中, 他们发现橡胶材料的疲劳裂纹扩展速率由每单位裂纹面积内的应变能变化量唯一确定, 这一变化量被称为材料的撕裂能 (tearing energy) 或能量释放率 (energy release rate)。

在进行橡胶材料测试时, 可通过试验测定得出橡胶材料的最大撕裂能、疲劳裂纹扩展等参数, 分析计算给出橡胶材料的疲劳寿命图谱, 即材料应变-寿命曲线。

基于橡胶材料应变-寿命曲线,



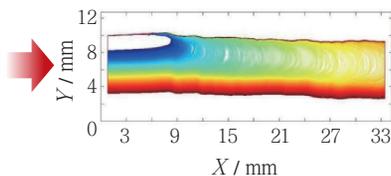
最大撕裂能试验



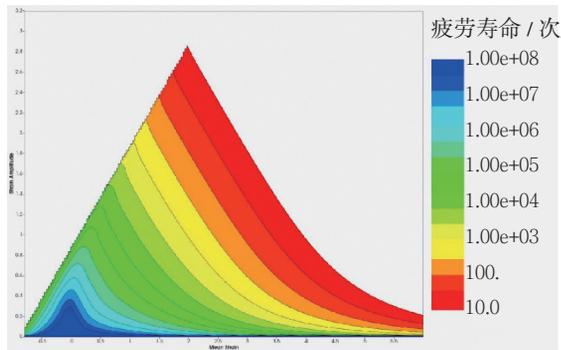
最大撕裂能试验结果



疲劳裂纹扩展试验



疲劳裂纹扩展试验结果



橡胶材料应变-寿命曲线

### 橡胶材料疲劳寿命测试

即可对动力装置安装节及整个安装系统进行寿命分析，给出其理论疲劳寿命，辅以产品/系统疲劳试验校核，最终得到准确的产品疲劳寿命。

### 结束语

当前，国外航空动力装置安装系统采用的AMS橡胶标准已发展成熟，

且经过多型号适航审定，标准体系完整性、内容全面性和产品适用性都已得到验证，而动力装置安装系统适用的国产橡胶材料标准较少且大多没有经过适航审定，材料规范的制定仍处于探索阶段，材料没有统一且通用的适航验证方法。研究动力装置安装系统橡胶材料适航规

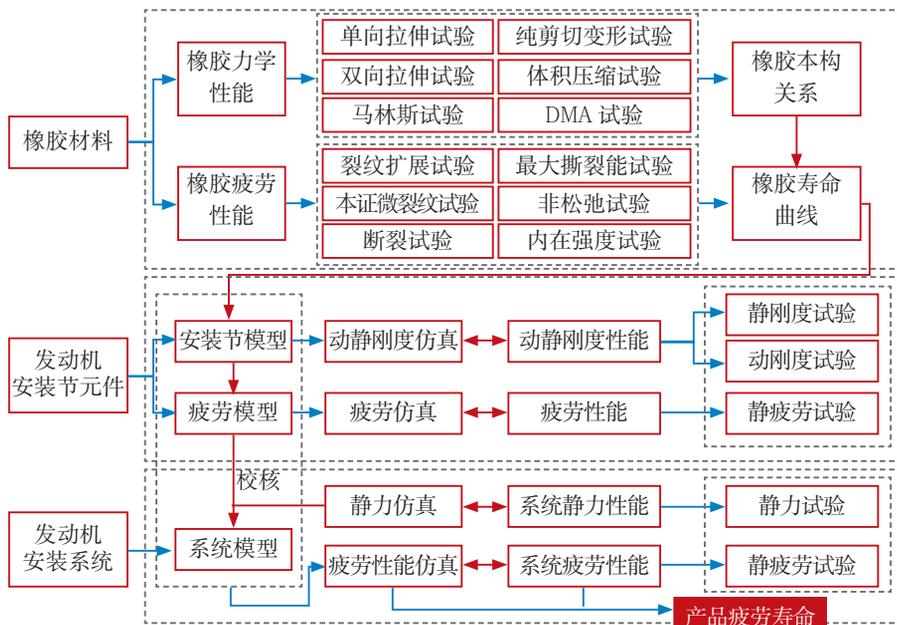
范的建立方法，对国产橡胶材料的标准化具有指导意义。

**航空动力**

(师永宁，中国飞机强度研究所，高级工程师，主要从事飞机振动控制技术研究)

### 参考文献

- [1] 陈巍.橡胶材料在航空发动机上的应用[J].特种橡胶制品, 2014, 35(4):74-76.
- [2] 袁文明,刘颖.民机材料适航要求与标准化需求[J].航空标准化与质量,2010(2):19-36.
- [3] 王婧,韩秀峰.航空发动机含氟橡胶标准现状分析与发展建议[J].标准评价,2021,576(2):218-223.
- [4] 孙淑玲.商用航空发动机适航审定与标准化[J].航空标准化与质量,2019(3): 7-10.
- [5] 沈小明,陈挺.民用航空材料适航审定[J].材料工程,2017,45(11):139-142.
- [6] 王妙全.国内航空发动机材料工艺标准体系构建思路探讨[J].中国标准化,2017(17):85-89.



动力装置安装系统疲劳寿命矩阵