

橡胶密封材料在中小航空发动机上的应用及典型失效形式分析

祝才军, 孙勇, 陈芳芳

(中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘要: 橡胶材料具有优异的密封特性, 成为中小航空发动机不可或缺的密封材料。本文主要介绍了橡胶密封材料在中小航空发动机上的应用和典型的密封失效形式与分析, 并对中小航空发动机橡胶密封材料及制品进行了展望。

关键词: 橡胶密封; 中小航空发动机; 应用

引用论文: 祝才军, 孙勇, 陈芳芳. 橡胶密封材料在中小航空发动机上的应用及典型失效形式分析 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(6): 58-61.

中图分类号: TQ330.42

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)06-0058-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.06.013

0 概述

橡胶材料具有优异的密封特性, 广泛应用于中小航空发动机空气、滑油、燃油、液压油等系统密封。橡胶密封材料分为液态橡胶密封剂和固态橡胶材料, 其中固态橡胶密封材料按照密封形式分为静态密封和动态密封, 静态密封件主要包括 O 形密封圈、橡胶与金属组合密封垫块等, 用于空气、燃油、滑油系统密封; 动态密封件主要包括皮碗 (旋转轴唇形密封圈) 和密封环, 用于旋转轴的油气密封, 橡胶密封制品结构如图 1 所示。

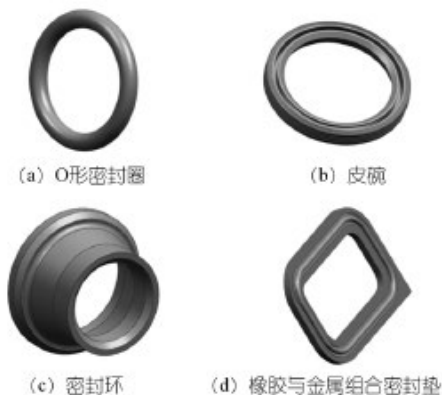


图 1 橡胶密封制品

1 橡胶密封材料在中小航空发动机上的应用概况

航空发动机用橡胶密封材料的选择主要以其服役

工况为依据, 目前, 航空发动机上使用的橡胶密封材料主要有丁腈橡胶、氟橡胶、硅橡胶、氟硅橡胶。随着航空技术的不断发展, 航空发动机不断朝着大功率、长寿命的趋势发展, 航空发动机的区域温度、介质等工况更加苛刻, 全氟醚橡胶以其优异的性能受到关注, 开始逐步应用于航空发动机。

1.1 氟橡胶

氟橡胶是指主链或侧链的碳原子上含有氟原子的一类高分子弹性体, 目前航空发动机上应用的氟橡胶主要有 F275、F370、FX-4、FX-16、FX-17 等氟橡胶, 工作温度一般为 $-20\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于其具有优异的耐化学介质、耐热和耐燃油等特性, 应用于航空发动机的滑油、燃油系统密封, 多以传统的 O 形密封圈结构密封, 如某涡桨发动机输出机匣组件用 FX-17 氟橡胶 O 形密封圈固定滑油密封。同时, 氟橡胶具有摩擦系数较低, 用于空气、液压油、滑油系统的高速旋转轴或滑动密封, 如某涡轴发动机测扭基准轴 FX-17 氟橡胶密封环用于高速旋转轴的油气密封; 某涡桨发动机 FX-16 氟橡胶皮碗, 用于输出轴机匣组件中旋转轴滑油密封。

1.2 硅橡胶

硅橡胶是主链由硅氧键组成, 侧基是由有机基团

作者简介: 祝才军 (1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事非金属材料 and 树脂基复合材料应用技术工作。

构成的一类半无机半有机化合物，具有的高弹性、耐高低温、耐老化等，但硅橡胶耐油、耐溶剂性能差，因此，主要用于气体系统的密封。目前，航空发动机上应用的硅橡胶由液态密封剂和固态密封材料两种。

液态硅橡胶密封剂主要有单组分 GD414 密封剂和双组分 XJ55 密封剂，单组分 GD414 密封剂主要用于海军发动机螺柱密封防护腐蚀介质；双组分 XJ55 密封剂的工作温度为 $-60\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，主要用于航空发动机压气机机匣与燃烧室机匣结合面密封。液态密封剂具有良好的填充性，能够填补结合面上凹凸不平的间隙，经硫化反应，其交联成三维结构的硅橡胶弹性体，阻断漏，从而起到密封效果。

固态密封硅橡胶材料主要有 6146 一般用途硅橡胶和 SE6180 耐高温硅橡胶，6146 一般用途硅橡胶工作温度为 $-60\sim +250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，如某发动机燃气发生器上应用 6146 一般用途硅橡胶 O 形圈进行固定密封。SE6180 耐高温硅橡胶工作温度可达 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，如某涡轴发动机压气机组件用 SE6180 硅橡胶 O 形圈固定密封。

1.3 氟硅橡胶

氟硅橡胶是通过在聚硅氧烷分子结构上引入含氟侧基而得到，其不仅保留了硅橡胶的优异性能，还兼具氟橡胶的耐有机溶剂等特性。目前，航空发动机上应用的氟硅橡胶主要有 XJ56 液态氟硅橡胶密封剂和固态密封材料 FS6265 氟硅橡胶，工作温度一般为 $-55\sim +200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

XJ56 液态氟硅橡胶密封剂能够填补结合面上凹凸不平的间隙，经硫化反应，其交联成三维结构的硅橡胶弹性体，阻断泄露，从而起到密封效果，主要用于滑油、燃油系统等结合面密封，如某发动机附件传动组件与燃滑油泵调节器结合面密封。

FS6265 氟硅橡胶广泛用于燃油密封垫块等重要部位，主要结构为 O 形圈和复合垫块，如某发动机燃油喷嘴上应用 FS6265 氟硅橡胶 O 形圈密封；某涡轴发动机燃油供放油管密封垫块组件由 FS6265 氟硅橡胶与 2A11 铝合金使用 AFS-R-A001 胶粘剂热硫化粘接而成，起密封燃油作用。

1.4 全氟醚橡胶

全氟醚橡胶是 20 世纪 70 年代开发的一种含氟弹性体，由四氟乙烯、全氟甲（氧）基乙烯基醚和少量带硫化点的第三单体共聚而成，由于其具有与聚四氟乙烯类似的骨架结构，主链上碳碳键基本被外围的氟原子所保护，使得全氟醚橡胶具备了优越的耐化学

介质性；相对于普通氟橡胶而言，其分子主链上完全不含碳氢键，极大地提升了其耐高温性能，此外，其分子结构中含有长而柔顺的醚键侧链，显著降低了玻璃转化温度 T_g ，因此，其又具有卓越的热稳定性、耐低温性，工作温度为 $-50\sim +300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。目前，航空发动机上应用的全氟醚橡胶主要有 FM-1、FM-5、FM-9、FF7501A 等全氟醚橡胶，由于全氟醚橡胶价格昂贵，一般用于航空发动机 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温区域的有机溶剂密封，如某涡轴发动机用 FF7501A 全氟醚橡胶 O 形圈油气固定密封。

1.5 丁腈橡胶

丁腈橡胶是由丁二烯与丙烯腈单体在水乳液中聚合而成，目前，航空发动机上应用的丁腈橡胶主要由 5080、5260、5470、P214 等类型，丁腈橡胶结构密实，强度较高，但其耐臭氧性不好，加工性较差，主要用于液压油、喷气燃料、滑油系统的活动密封零件或静止固定密封，工作温度一般为 $-50\sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，如某涡桨发动机灭火接头用 5260 丁腈橡胶固定封严空气和灭火液。

丁腈橡胶为传统通用橡胶材料，目前主要应用于老旧型号航空发动机上。橡胶材料伴随着航空发动机技术的进步而不断发展，丁腈橡胶密封材料逐渐被淘汰，从以某涡轴发动机为代表的第四代航空发动机开始，大量使用高性能的氟硅、氟醚、氟橡胶密封材料，不再使用丁腈橡胶密封。

2 典型橡胶密封失效形式与分析

2.1 间隙咬伤

间隙挤出是橡胶密封件最常见的失效形式，液气气动系统由于运动等原因必然有间隙，橡胶密封件在系统压力的作用下，被推向无压力或低压力的一侧和沟槽边接触，产生变形，一部分被挤入密封间隙，引起 O 形圈局部应力集中，在运动过程中被切掉，造成 O 形圈的间隙咬伤^[1]，如图 2。如某涡桨发动机用 5260 丁腈橡胶 O 形圈，在压力作用下被迫挤入与安装槽之间的间隙从而引起间隙咬伤。O 形圈的硬度对于间隙咬伤有较大的影响，系统压力越高，密封圈硬度越小，咬伤现象越严重。间隙咬伤往往是未协调好橡胶密封圈胶料硬度、工作压力、密封间隙三者之间的关系，O 形圈胶料硬度、工作压力、密封间隙三者取值关系如表 1 所示^[2]。

5260 丁腈橡胶的硬度为 67 ± 5 ，经分析将其更换

成硬度为 80 ± 5 的 5080 丁腈橡胶，5080 橡胶 O 形圈已装该涡桨发动机使用 2 年余，密封良好。

表 1 O 形橡胶密封圈工作压力、硬度、密封间隙的关系

工作压力 /MPa	橡胶硬度 /HSA		
	70	80	90
	密封间隙 / (半径 /mm)		
0~5	0.15~0.10	0.20~0.15	0.25~0.15
5~10	0.10~0.06	0.15~0.08	0.15~0.10
10~15	0.06~0.03	0.08~0.06	0.10~0.08
15~20	0.03~0.02	0.06~0.04	0.08~0.06

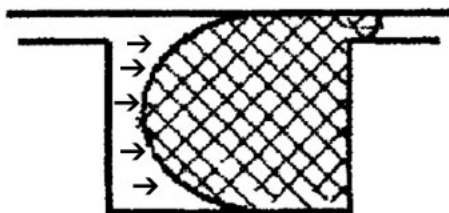


图 2 O 形圈的间隙咬伤

2.2 溶胀失效

溶胀失效是橡胶密封件在有机溶剂和高温的共同作用下发生溶胀，造成严重的永久塑性变形而失效，是航空发动机密封件主要失效形式之一。如某涡轴发

动机涡轮机匣密封用 F275 氟橡胶 O 形圈在工作温度约 $200\text{ }^\circ\text{C}$ ，飞马 II 号滑油为介质的条件下，胶圈溶胀，体积变大 30% 后挤入安装槽间隙造成咬伤，从而导致密封失效，如图 3 所示。

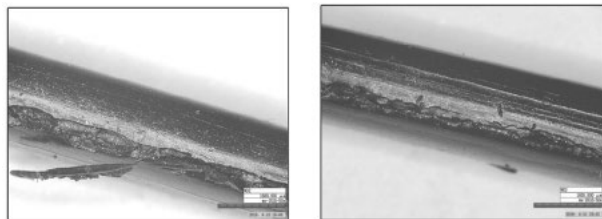


图 3 溶胀失效的 O 形圈

评估橡胶材料耐油体积溶胀性能等级的一个依据是橡胶材料的耐化学性，也就是橡胶材料与化学介质的兼容性，通常通过橡胶件放在化学介质中浸泡来评估，最主要、最直观的评估就是浸泡后橡胶体积溶胀率，一般评估结果参考表 2^[3]。

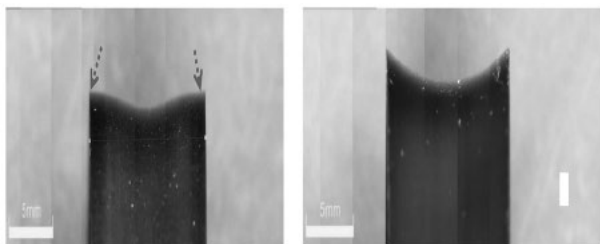
经分析将该涡轴发动机涡轮机匣密封用 O 形圈的胶料更换成飞马 II 号滑油的体积变化率 $\leq 5\%$ 的 FF7501A 全氟醚橡胶，密封良好。

表 2 橡胶体积溶胀评估表

描述	体积变化率 /%	注释
杰出	$< 10\%$	最佳的适用性，与液体接触时间几乎不存在任何影响。材料的性能和物理特性几乎不会发生变化，具有极佳的抗耐性能。
好	10~20	良好的适用性，与流体接触时，材料存在中度膨胀和物理特性的变化，可能适合静态应用
限用	20~40	适用性受限，与流体接触时，材料存在显著的体积膨胀和物理特性的变化，使用时应注意。
不可用	> 40	橡胶材料不适用该介质的应用。

2.3 老化失效

橡胶的老化主要是指橡胶制品在贮存或使用过程中，由于受到热、氧、光、臭氧、化学介质等外界因素的影响，发生物理和化学变化，使橡胶性能变劣而逐渐失去使用价值的现象^[4]。老化的橡胶密封件表现为表面龟裂、弹性下降、硬度增大或发粘变软、强度下降等。如某涡桨发动机燃油调节器用 P214 丁腈橡胶皮碗，工作时间 1 722 h，出现一定程度的老化，皮碗尺寸缩小、变形，导致密封失效。如图 4 所示。



(a) 故障件

(b) 新件

图 4 丁腈橡胶皮碗

应对橡胶密封件老化的办法通常是贮存时要密闭在阴凉处，远离热源，保持合适的温度和湿度，在保质期内使用；跟踪使用中的橡胶密封件，航空发动机到翻修期后要及时更换。

3 展望

中小航空发动机用橡胶密封材料用量及其制品尺寸虽小，但其性能水平与可靠性直接影响中小航空发动机的整体性能与可靠性，具有至关重要作用。经过多年的发展，航空发动机橡胶密封材料与技术取得了长足的进步，就现状而言，还存在着一些不足，展望如下：

(1) 结合航空发动机高温、有机油介质和高转速等工况特点，全面深入研究橡胶密封材料性能及使用寿命。目前在役的有些橡胶密封材料性能不够全面，整体性能掌握不全，使用寿命不详，无法预判航空发动机维修更换密封件的时间，根据预定用途，全面深

入研究橡胶密封材料性能和航空发动机工作条件下的使用寿命,为航空发动机的橡胶密封材料的应用及维修更换提供有利依据。

(2) 建立完善统一的航空发动机橡胶密封材料体系。目前同类的橡胶密封材料牌号很多,性能大同小异,为方便选材和橡胶制品的成型工艺设计,按照工艺和用途分类,简化航空橡胶密封材料体系,减少橡胶牌号。

(3) 开发具有更高综合性能的复合橡胶密封制品。目前中小航空发动机密封制品主要以传统的O形圈、皮碗、密封环等纯橡胶制品结构和少量的橡胶与金属复合结构,开展氟硅、氟醚等表面能低的橡胶表面处

理技术研究,开发橡胶与增强织物、聚四氟乙烯塑料等复合密封结构,实现功能集成化,满足航空发动机苛刻条件下密封需求。

参考文献:

- [1] 徐光华. O形密封圈的失效原因及防止措施[J]. 科技资讯, 2007,122(17):22.
- [2] 肖彬. 橡胶密封件常见失效形式分析[J]. 橡塑技术与装备, 2019,45(23):5-8.
- [3] 张翠彬. 橡胶O型圈的材料选择分析[J]. 中国设备工程, 2017,380(21):155-157.
- [4] 范丽雄. 橡胶的老化现象及其老化机理[J]. 化工设计通讯, 2018,44(08):55-66.

Application of rubber sealing materials in small and medium-sized aero-engines and analysis of typical failure modes

Zhu Caijun, Sun Yong, Chen Fangfang

(China Aecc South Industry Co. LTD., Zhuzhou 412002, Hunan, China)

Abstract: Rubber materials have become indispensable sealing materials for small and medium-sized aero-engines with their excellent sealing properties. This article primarily introduces the application of rubber sealing materials in small and medium-sized aero-engines, as well as typical forms and analysis of sealing failures. It also provides an outlook on rubber sealing materials and products for small and medium-sized aero-engines.

Key words: rubber seal; small and medium-sized aero-engine; application

(R-03)

