

产品·设计

氟醚橡胶O形密封圈耐航空发动机润滑油性能的研究

杨睿, 赵文博, 王珍, 陆明, 刘金岭, 苏正涛*

(中国航发北京航空材料研究院 中国航发减振降噪材料及应用技术重点实验室, 北京 100095)

摘要:选取2种不同氟含量的氟醚橡胶制备标准O形密封圈(24.99 mm×3.53 mm),重点考察2种O形密封圈的物理性能和耐飞马II号、长城4050和FDS-655-HTS航空发动机润滑油性能。结果表明:采用较高氟含量的氟醚橡胶(牌号VPL85730)制备的O形密封圈在3种航空发动机润滑油中的性能变化不大,而采用较低氟含量的氟醚橡胶(牌号PL855)制备的O形密封圈仅在飞马II号润滑油中的性能保持性较好;当O形密封圈在润滑油中的性能变化较大时,其胶料中炭黑与橡胶基体会发生脱离。

关键词:氟醚橡胶;O形密封圈;航空发动机润滑油;耐润滑油性能

中图分类号:TQ333.99;TQ330.4⁺²

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2022)01-0050-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2022.01.0050



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

现代航空发动机正朝高推重比、高性能、高可靠的方向发展,作为航空发动机“血液”的航空润滑油,身兼数职,在发挥润滑作用的同时,还要发挥清洁、密封、冷却、腐蚀控制和缓冲等作用。若润滑油失效,发动机将会受到严重损害。因此,为了提高发动机的安全可靠,世界各国都在不断研制高性能航空发动机润滑油^[1-3]。美国颁布了航空发动机润滑油规范MIL-L-23699,将符合规范的发动机润滑油称为II型润滑油,并将II型润滑油划分为标准型、防腐型与热氧稳定型。不同类型II型润滑油适应航空发动机不同使用工况^[4-6]。

氟醚橡胶是由偏氟乙烯、四氟乙烯、全氟烷基乙烯基醚等单体共聚制备的多元含氟弹性体。与普通氟橡胶相比,氟醚橡胶由于侧链含醚键(提高了分子链柔性),不仅改善了耐低温性能,而且保持了含氟橡胶的耐介质性能,是目前耐低温和耐介质综合性能最优的橡胶材料之一^[7-10],是航空

发动机润滑系统的可选密封材料^[11-15]。

本工作选取航空发动机润滑系统中常用的 T_{R10} (回缩10%对应的温度)为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 级氟醚橡胶作为研究对象,采用2种不同氟含量的氟醚橡胶制备出标准O形密封圈,重点考察2种O形密封圈的物理性能和耐3种航空发动机润滑油性能,以期为 T_{R10} 为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 级氟醚橡胶作为航空发动机润滑系统的密封材料使用提供支持。

1 实验

1.1 原材料

氟醚橡胶,牌号PL855,氟质量分数为0.64, T_{R10} 为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$;牌号VPL85730,氟质量分数为0.67, T_{R10} 为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,苏威(上海)有限公司产品。炭黑N990,赢创德固赛(中国)有限公司产品。氧化锌,工业级,海顺新材料有限公司产品;三烯丙基异氰脲酸酯(助交联剂TAIC)和2,5-二甲基-

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21991125)

作者简介:杨睿(1990—),男,河南濮阳人,中国航发北京航空材料研究院工程师,博士,主要从事航空橡胶材料及其工程应用研究。

*通信联系人(ztsu@263.net)

引用本文:杨睿,赵文博,王珍,等.氟醚橡胶O形密封圈耐航空发动机润滑油性能的研究[J].橡胶工业,2022,69(1):50-54.

Citation: YANG Rui, ZHAO Wenbo, WANG Zhen, et al. Study on aeroengine lubricating oil resistance of fluoroether elastomer O-ring seal[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(1): 50-54.

2,5-双(叔丁基过氧基)己烷(硫化剂双2,5),化学纯,湖南以翔科技有限公司产品。飞马II型号润滑油,MIL-L-23699标准型,埃克森美孚公司产品。长城4050润滑油,相当于MIL-L-23699标准型,中国石化石油化工科学研究院产品。FDS-655-HTS润滑油,相当于MIL-L-23699热氧稳定型,孚迪斯石油化工(葫芦岛)有限公司产品。

1.2 试验配方

氟醚橡胶 100,炭黑N990 40,氧化锌 5,助交联剂TAIC 3,硫化剂双2,5 1。采用牌号为PL855和VPL85730的氟醚橡胶胶料配方编号为FM-855和FM-85730。

1.3 主要设备和仪器

SY-6215-C型开炼机,东莞市世研精密仪器设备有限公司产品;TY-7006型平板硫化机,江苏天源试验设备有限公司产品;Barofix III型显微IRHD硬度计,德国Bareiss公司产品;T-2000型拉力试验机,济宁同创机械有限公司产品;101A-2E型老化烘箱,上海锦玫仪器设备有限公司产品;JSM-7500F型扫描电子显微镜(SEM),日本JEOL公司产品。

1.4 试样制备

混炼在开炼机上进行,氟醚橡胶先塑炼,包辊后加入炭黑N990及氧化锌,混炼均匀后加入助交联剂TAIC和硫化剂双2,5,薄通8遍后,再进行出片。

将混炼胶停放24 h后压制为标准O形密封圈(24.99 mm×3.53 mm)。试样采用两段硫化,一段硫化条件为160 °C×15 min,二段硫化条件为200 °C×4 h。

1.5 测试分析

(1) IRHD硬度。采用显微IRHD硬度计按照GB/T 6031—2017测试O形密封圈的IRHD硬度(M型)。

(2) 拉伸性能。采用拉力试验机按照GB/T 5720—2008测试O形密封圈的拉伸性能。

(3) 耐热空气老化性能。采用老化烘箱按照GB/T 3512—2014进行O形密封圈的耐热空气老化试验。

(4) 压缩永久变形。按照GB/T 5720—2008测试O形密封圈的压缩永久变形,压缩率为25%。

(5) 耐航空发动机润滑油性能。按照GB/T 1690—2010测试O形密封圈的耐航空发动机润滑油性能。

(6) SEM分析。试样的拉伸断面进行喷金处理,采用SEM观察试样的拉伸断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 硫化特性

FM-855和FM-85730 O形密封圈混炼胶的硫化特性如表1所示。

表1 FM-855和FM-85730 O形密封圈混炼胶的硫化特性(160 °C)

Tab.1 Vulcanization characteristics of FM-855 and FM-85730 O-ring seal compounds at 160 °C

项 目	FM-855	FM-85730
$F_L/(dN \cdot m)$	1.7	1.5
$F_{max}/(dN \cdot m)$	29.5	28.2
$F_{max}-F_L/(dN \cdot m)$	27.8	26.7
t_{10}/min	0.8	0.9
t_{90}/min	4.0	4.1

由表1可见,FM-855和FM-85730 O形密封圈混炼胶的硫化特性相差不大。

2.2 物理性能

FM-855和FM-85730 O形密封圈的物理性能如表2所示。

表2 FM-855和FM-85730 O形密封圈的物理性能

Tab.2 Physical properties of FM-855 and FM-85730 O-ring seals

项 目	FM-855	FM-85730
IRHD硬度/度	69	72
拉伸强度/MPa	15.1	13.1
拉断伸长率/%	223	159
$T_{R10}/^{\circ}C$	-30.5	-31.0
压缩永久变形(200 °C×22 h)/%	9	10
275 °C×70 h热空气老化后		
IRHD硬度变化/度	-4	-6
拉伸强度变化率/%	-9.3	-21.1
拉断伸长率变化率/%	+9.1	+11.5
质量变化率/%	+1.2	+1.4

由表2可见:与FM-855 O形密封圈相比,FM-85730 O形密封圈的硬度稍高,拉伸强度和拉断伸长率较低, T_{R10} 相当,即耐低温等级相当,高温压缩永久变形相近。275 °C×70 h热空气老化后,FM-85730 O形密封圈的硬度和拉伸强度分别降

低6度和21.1%,而FM-855 O形密封圈的硬度和拉伸强度分别降低4度和9.3%,说明FM-855 O形密封圈的耐高温性能更优异。

2.3 耐航空发动机润滑油性能

FM-855和FM-85730 O形密封圈的耐航空发动机润滑油性能如表3所示。

表3 FM-855和FM-85730 O形密封圈的耐航空发动机润滑油性能
Tab.3 Aeroengine lubricating oil resistances of FM-855 and FM-85730 O-ring seals

项 目	FM-855	FM-85730
飞马II号润滑油浸泡后		
IRHD硬度变化/度	-3	-2
拉伸强度变化率/%	+0.7	-3.4
拉断伸长率变化率/%	+12.1	-3.5
体积变化率/%	+14.7	+3.8
压缩永久变形/%	10	15
长城4050润滑油浸泡后		
IRHD硬度变化/度	-6	-2
拉伸强度变化率/%	0	+8.0
拉断伸长率变化率/%	+1.7	+10.4
体积变化率/%	+11.8	+5.2
压缩永久变形/%	6	12
FDS-655-HTS润滑油浸泡后		
IRHD硬度变化/度	-6	-2
拉伸强度变化率/%	+6.6	+5.4
拉断伸长率变化率/%	+10.9	+9.0
体积变化率/%	+12.7	+5.9
压缩永久变形/%	4	12

注:润滑油浸泡条件为200℃×70h。

由表3可以看出:与FM-855 O形密封圈相比,FM-85730 O形密封圈耐飞马II号、长城4050和FDS-655-HTS润滑油的性能更好,表现为3种润滑油浸泡后硬度变化和体积变化率更小。这是因为FM-85730的氟含量更高,因此其O形密封圈更能抵抗介质侵蚀。

对比经润滑油浸泡后FM-855和FM-85730 O形密封圈的体积变化和压缩永久变形可得:FM-85730 O形密封圈的体积变化率较小,但压缩永久变形较大;FM-855 O形密封圈的体积变化率较大,但压缩永久变形较小。这是由于FM-855中氟含量较低,其O形密封圈受到润滑油的侵蚀更严重,进而导致橡胶分子间距增大,分子链活动能力增大,O形密封圈受压缩后的弹性增强,而且

体积的增大也抵消了一部分压缩永久变形。FM-85730 O形密封圈的情况则相反。

根据上述分析可推断,润滑油对氟醚橡胶的侵蚀程度是决定FM-855和FM-85730 O形密封圈耐润滑油性能的根本因素,也间接决定了氟醚橡胶O形密封圈在航空发动机润滑系统中的密封性能。如在某些情况下,虽然使用一定时间的氟醚橡胶O形密封圈的压缩变形较小,但O形密封圈有可能已发生较大的体积膨胀,若继续使用,则可能被挤入沟槽间隙,进而导致其破坏及密封失效。

从表3还可以看出:经飞马II号、长城4050和FDS-655-HTS润滑油浸泡后FM-85730 O形密封圈性能变化基本处于同一水平,这说明FM-85730 O形密封圈适于在上述3种航空发动机润滑油中工作;经长城4050和FDS-655-HTS润滑油浸泡后FM-855 O形密封圈的硬度变化较大,降低了6度。在实际的密封工况下,O形密封圈的硬度会使得其密封能力降低,导致密封失效,因此FM-855 O形密封圈不适合在长城4050和FDS-655-HTS润滑油中使用。

2.4 SEM分析

航空发动机润滑油浸泡前后的FM-855 O形密封圈的拉伸断面形貌如图1所示。

由图1(a)和(b)可以看出:润滑油浸泡前FM-855 O形密封圈拉伸断面存在少数孔洞,这可能是拉伸应力作用下胶料中部分炭黑颗粒与氟醚橡胶基体脱离导致的;润滑油浸泡前FM-855 O形密封圈拉伸断面的胶料中除了因拉伸导致脱离的炭黑之外,其余炭黑仍牢固地嵌在橡胶基体中。由图1(c)和(d)可见,FM-855 O形密封圈经飞马II号润滑油浸泡后,胶料中炭黑与氟醚橡胶基体的界面仍未被破坏,物理交联作用仍存在,炭黑仍能起到补强作用。如图1(e)和(f)可见,FM-855 O形密封圈经长城4050润滑油浸泡后,拉伸断面处的孔洞缺陷增多,胶料中炭黑与橡胶基体已发生脱离,物理交联作用被破坏,炭黑补强结构受到破坏。

从图1还可以看出,长城4050润滑油对FM-855 O形密封圈的侵蚀作用比飞马II号润滑油更显著,这与FM-855 O形密封圈耐航空发动机润滑油性能分析结果一致。

航空发动机润滑油浸泡前后FM-85730 O形

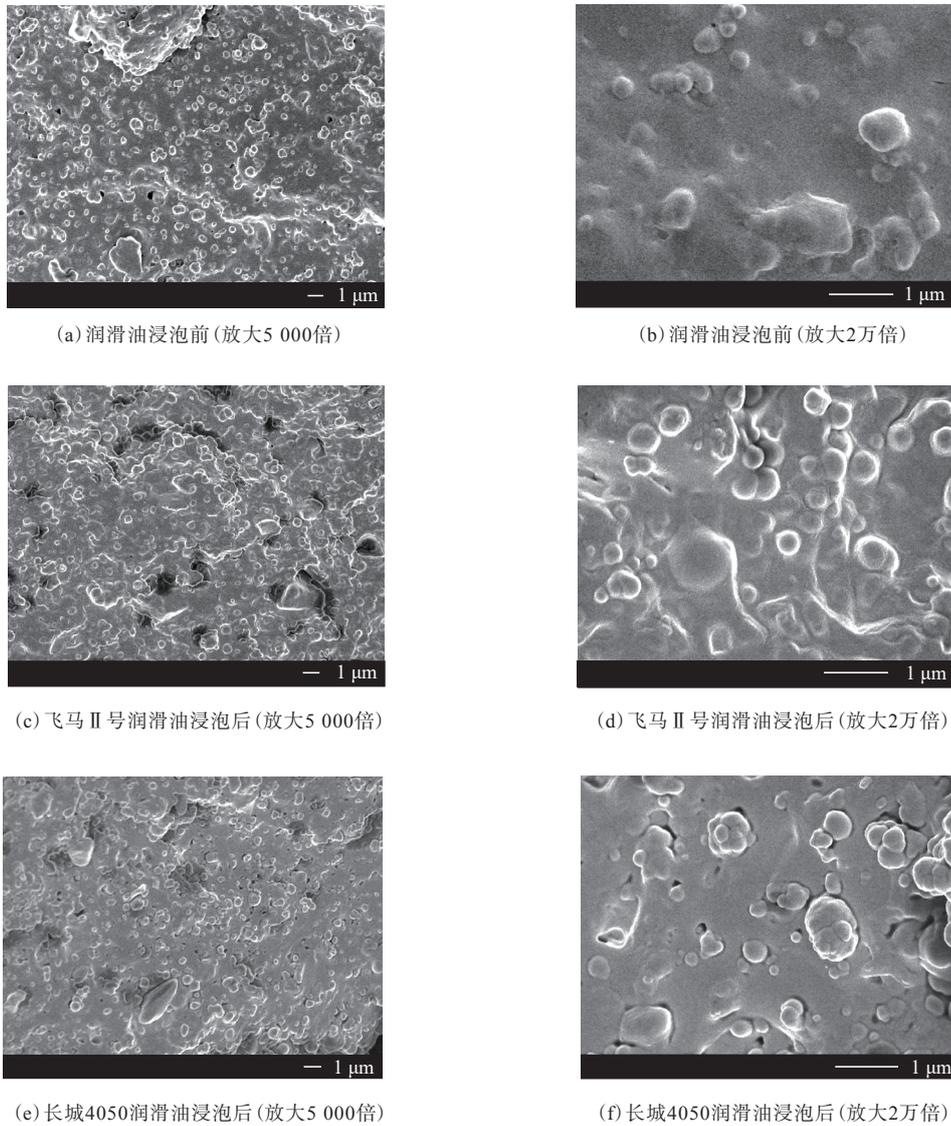


图1 浸入航空发动机润滑油前后FM-855 O形密封圈的拉伸断面形貌

Fig.1 Tensile section morphologies of FM-855 O-ring seals before and after immersion in aeroengine lubricating oils

密封圈的拉伸断面形貌(本文未示出)分析表明,经3种润滑油浸泡后,其拉伸断面的胶料中炭黑与氟醚橡胶基体结合良好,未出现界面脱离现象。

3 结论

(1) 经 $275\text{ }^{\circ}\text{C}\times 70\text{ h}$ 热空气老化后,FM-85730 O形密封圈的IRHD硬度和拉伸强度分别降低6度和21.1%,而FM-855 O形密封圈的IRHD硬度和拉伸强度分别降低4度和9.3%,故FM-855 O形密封圈的耐高温性能更优异。

(2) FM-85730 O形密封圈耐飞马Ⅱ号、长城4050和FDS-655-HTS润滑油中的性能更好,表现

为硬度变化和体积变化率较小;FM-855 O形密封圈仅耐飞马Ⅱ号润滑油的性能更好,FM-85730 O形密封圈适合在3种航空发动机润滑油中工作。

(3) 当航空发动机润滑油对O形密封圈的侵蚀效应明显时,会导致其胶料中炭黑与橡胶基体脱离,并破坏物理交联作用,表现为氟醚硫化胶的性能明显衰减。

参考文献

- [1] 谢凤,范鸿宇,刘广龙,等.航空涡轮发动机对润滑油的性能要求与发展趋势[J].合成润滑材料,2009,36(3):20-25.
XIE F, FAN H Y, LIU G L, et al. Performances demand and

- developing trends of lubricants for aviation turbine engine[J]. Synthetic Lubricants, 2009, 36(3): 20–25.
- [2] 马玉红, 姚婷, 郝敬团, 等. 航空润滑油热氧化安定性研究[J]. 山东化工, 2013, 42(12): 50–53.
MA Y H, YAO T, HAO J T, et al. The research of thermal oxidation stability for aviation turbine oil[J]. Shandong Chemical Industry, 2013, 42(12): 50–53.
- [3] 刘双红, 王昆, 杨英炎, 等. 防腐型合成航空润滑油的研制[J]. 润滑与密封, 2010, 35(9): 112–117.
LIU S H, WANG K, YANG Y Y, et al. The development of synthetic aircraft lubricants of corrosion inhibiting[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(9): 112–117.
- [4] 吴森, 徐健. 军用高性能航空润滑油发展趋势研究[J]. 润滑油, 2015, 30(3): 5–7.
WU S, XU J. Study on development trend of military high performance aviation lubricating oil[J]. Lubricating Oil, 2015, 30(3): 5–7.
- [5] 陈卫兵. 航空涡轮发动机润滑油的发展趋势[J]. 润滑油与燃料, 2007, 17(3): 1–3.
CHEN W B. Development trend of aviation turbine engine lubricating oil[J]. Lubes & Fuels, 2007, 17(3): 1–3.
- [6] 杨颖, 宋岩, 苑伟康. 航空发动机润滑油应用研究进展[J]. 润滑油, 2013, 28(4): 6–9.
YANG Y, SONG Y, YUAN W K. Application and progress of aviation engine lubricant[J]. Lubricating Oil, 2013, 28(4): 6–9.
- [7] MAITI M, MITRA S, BHOWMICK A K. Effect of nanoclays on high and low temperature degradation of fluoroelastomers[J]. Polymer Degradation & Stability, 2008, 93(1): 188–200.
- [8] ARRIGONI S, MERLI F. New perfluoroelastomer for sealing at low temperatures[J]. Sealing Technology, 2010, 2010(9): 9–13.
- [9] KOURTAKIS K, BEKIARIAN P, BLACK G, et al. Novel thermal and photo curable anti-reflective coatings using fluoroelastomer nanocomposites and self-assembly of nanoparticles[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2016, 13(5): 1–10.
- [10] ROST H C. Biofuel compatibility of sealing materials at low temperatures[J]. International Polymer Science and Technology, 2017, 44(11): 435–437.
- [11] 王珍, 陆明, 孙霞容, 等. 氟醚橡胶长期老化性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(5): 4–10.
WANG Z, LU M, SUN X R, et al. Investigation on long-term aging properties of low-temperature fluoroelastomer[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(5): 4–10.
- [12] 刘金岭, 赵文博, 胡鹏飞, 等. 氟醚橡胶性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(5): 14–18.
LIU J L, ZHAO W B, HU P F, et al. Study on properties of low-temperature fluoroelastomer[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(5): 14–18.
- [13] PAZUR R J, CORMIER J G. Compatibility study of low-temperature-capable fluoroelastomers in jet fuels[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2015, 88(4): 660–675.
- [14] MCCARTHY E. Investigation of factors affecting the thermal expansion of perfluoroelastomer seal materials[J]. Sealing Technology, 2008, 2008(12): 7–10.
- [15] BANERJEE S S, BHOWMICK A K. Novel nanostructured polyamide 6/fluoroelastomer thermoplastic elastomeric blends: Influence of interaction and morphology on physical properties[J]. Polymer, 2013, 54(24): 6561–6571.

收稿日期: 2021-07-16

Study on Aeroengine Lubricating Oil Resistance of Fluoroether Elastomer O-ring Seal

YANG Rui, ZHAO Wenbo, WANG Zhen, LU Ming, LIU Jinling, SU Zhengtao

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Two kinds of low-temperature fluoroether elastomers with different fluorine mass fractions were selected to prepare standard O-ring seals (24.99 mm × 3.53 mm). The physical properties of two O-ring seals and their resistances to Mobil Oil II, Great Wall 4050 and FDS-655-HTS aeroengine lubricating oils were studied. The results showed that, the properties of the O-ring seals prepared with the fluoroether elastomer (brand VPL85730) which had a higher fluorine mass fraction had little change in the three kinds of aeroengine lubricants, while O-ring seals prepared with the fluoroether elastomer (brand PL855) which had a lower fluorine mass fraction maintained stable property only in Mobil Oil II. When the properties of O-ring seal changed greatly in the aeroengine lubricating oil, a considerable amount of carbon black could separate from the rubber matrix.

Key words: fluoroether elastomer; O-ring seal; aeroengine lubricating oil; lubricating oil resistance