

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.020

往复密封工况下聚四氟乙烯材料性能

李国一, 叶素娟, 王培杰

(广州机械科学研究院有限公司, 国家橡塑密封工程技术研究中心, 广州 510700)

摘要: 为找出往复密封失效原因, 提高往复密封件使用寿命, 采用动态热机械分析仪、高低温摩擦磨损试验机研究了密封材料聚四氟乙烯 (PTFE) 在不同温度和压力下的物理力学、摩擦磨损和耐油等性能, 并采用模拟台架测试了密封件的泄漏量、抗挤出性、磨损和压缩变形等性能。结果表明, 随着温度提高, PTFE 材料的硬度下降, 压缩变形量增加, 储能模量下降, 虽然对密封效果有利, 但密封材料容易被挤出; PTFE 材料在油润滑条件下摩擦系数和磨损率很小, 随着温度提高, 摩擦系数和磨损率有增大趋势, 但影响不大; 台架测试显示高压下往复密封的主要失效原因为密封件被挤出, 可以通过降低密封间隙、增加挡圈或提高材料硬度来提高密封件的抗挤出性。

关键词: 聚四氟乙烯; 摩擦磨损性能; 往复密封; 高温高压; 台架测试

中图分类号: V255+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0108-05

Properties of Polytetrafluoroethylene under Reciprocating Sealing Condition

Li Guoyi, Ye Sujuan, Wang Peijie

(Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute Co., Ltd., National Engineering Research Center of Rubber and Plastic Sealing, Guangzhou 510700, China)

Abstract : In order to find out the causing of failure and improve the life of seal, the physical mechanical, friction and wear, oil resistance properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) used at different temperature and pressure were studied by DMA, high and low temperature friction and wear testing machine and so on. The leakage, extrusion, wear and compression deformation of step-seal were tested by reciprocating sealing test rig. The results show that the hardness of PTFE decreases, compression deformation increases, storage modulus decreases with the temperature increased, which may cause extrusion of the seal in high temperature and high pressure. The friction and wear of PTFE with oil lubrication are low, but increase with the increasing of temperature while has little effect. The test rig shows that extrusion is the key factor causing the failure of reciprocating seals at high pressure, which can be improved by decreasing the seal gap, adding backup ring or increasing the hardness of sealing material.

Keywords : PTFE ; friction and wear properties ; reciprocating seal ; high temperature and high pressure ; test rig

往复密封件影响着液压元件的精确运行和动作的有效执行, 因此围绕着其开展的密封寿命和可靠性研究非常多^[1-2]。密封失效的原因错综复杂, 包括结构设计不合理、材料失效 (磨损、挤出、疲劳等)、使用工况恶劣等。目前对往复密封的研究主要在于数值模拟和结构优化^[3-6], 密封材料的研究则侧重于各种填料填充改性^[7-9], 对密封材料特别是往复密封工况下的性能研究较少。

密封材料是影响密封寿命和可靠性重要的因

素, 研究密封材料性能特别是应用工况下的材料特性, 对密封失效模式和原因分析, 具有重要的指导意义。目前常用的密封材料是橡胶弹性体, 比如橡胶 O 形圈是简单有效的密封结构形式, 然而其高压下易挤出, 且存在摩擦阻力大、易老化疲劳失效等缺点, 显然满足不了液压系统高压化和大功率化的要求。聚四氟乙烯 (PTFE) 密封材料具有抗高压挤出、低摩擦阻力、耐磨损等特点, 是往复密封未来的发展方向。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2001604), 广州市科技计划项目 (201906010041)

通讯作者: 李国一, 高级工程师, 主要研究方向为橡塑密封材料改性及密封寿命与可靠性 E-mail: liguoyi@gmeri.com

收稿日期: 2020-05-14

引用格式: 李国一, 叶素娟, 王培杰. 往复密封工况下聚四氟乙烯材料性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):108-112.

Li Guoyi, Ye Sujuan, Wang Peijie. Properties of polytetrafluoroethylene under reciprocating sealing condition[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):108-112.

笔者针对往复密封工况需要耐高低温(-54~150℃)、耐高压(35 MPa)、耐液压油等要求,从温度、压力、介质等方面开展密封材料 PTFE 的物理力学和摩擦磨损性能研究,并进行往复运动密封件模拟台架性能研究,从而为高压往复密封件的寿命和可靠性研究提供材料性能参考。

1 实验部分

1.1 原材料

PTFE:M-18F,平均粒径 25~40 μm,大金氟化工有限公司;

青铜粉:663,石家庄京元粉末材料有限责任公司;

二硫化钼:F-0,上海胶体化工厂。

1.2 仪器设备

高速混合机:XH-5L 型,江苏常州市宝润欣鸿机械厂;

液压机:Y32-50 型,广东南海市中联液压机械厂;

烧结炉:RFX-150 型,浙江乐清市虹港炉业有限公司;

车床:CA6140 型,沈阳第一机床厂;

拉力试验机:BTC-EXOPTIC 型,德国 Zwick/Roell 公司;

摩擦磨损试验机:CFT-I 型,兰州中科凯华科技开发有限公司;

硬度计:Zwick-3117 型,德国 Zwick/Roell 公司;

动态热机械分析(DMA)仪:242E 型,德国 Netzsch 公司;

往复试验台:广州宝力特液压技术有限公司。

1.3 试样制备

将 PTFE 和青铜粉、二硫化钼等按一定比例加入到高速混合机中混合均匀,取一定量的混合粉料在 40~60 MPa 压力下压制成型,取出后放到烧结炉中在 370~380℃下烧结数小时,烧结后在车床上加工成各种规格的试样进行性能测试。

1.4 性能测试与表征

邵 D 硬度按 GB/T 2411-2008 测试;压缩变形按 GB/T 1041-2008 测试;拉伸强度和断裂伸长率按 GB/T 1040-2006 测试。

DMA 测试:测试温度 -100~200℃,升温速率 5℃/min,频率 1 Hz。

耐油性能按 GB/T 11547-2008 测试。

摩擦系数、体积磨损率按 ASTM G99-17 测试:销-盘式,液压油润滑,往复行程 ±12 mm,试验速度 0.2 m/s,载荷 50 N,时间 120 min,磨损质量直接用分析天平测量,体积磨损率按式(1)计算。

$$V = \Delta m / [\rho (L \cdot F)] \times 1000 \quad (1)$$

式中:V——体积磨损率,mm³/(N·mm);

Δm——磨损质量,g;

ρ——试样密度,g/cm³;

L——滑行距离,mm;

F——载荷,N。

往复运动密封件性能:参考 GB/T 32217-2015,活塞杆直径 Φ100 mm,表面镀铬,表面粗糙度 Ra = 0.2~0.4,丁腈橡胶(NBR)O形圈,PTFE 密封环。用量杯测量往复密封试验后的泄漏量;用游标卡尺测量密封环初始厚度 h₀ 和往复运动后的厚度 h,磨损和压缩变形率=(h₀-h)/h₀×100%,其中 h₀=3.5 mm;密封环的挤出宽度用游标卡尺测量;测试过程中待活塞杆温度平衡后,用测温仪测量活塞杆上的最高温度。

2 结果与讨论

液压往复密封工况要求 PTFE 材料摩擦系数低,耐磨高,耐航空液压油,有一定的耐压和抗挤出性,并且需要耐受 -54~150℃ 的温度,因此测试材料在不同温度下的物理力学性能、摩擦磨损性能和耐油性能,对提高密封件的使用寿命和可靠性具有重要的指导意义。

2.1 物理力学性能

(1) 硬度和压缩变形。

硬度和压缩变形关系着材料抵抗变形的能力,特别是高压下对密封件的使用寿命和可靠性有很大的影响。图 1 为不同温度 PTFE 复合材料的硬度和 35 MPa 压力下的压缩形变。从图 1 可知,随着温度提高,材料的硬度降低。常温 23℃ 下材料的邵 D 硬度为 66,在低温 -54℃ 下达到 78,而在 150℃ 高温

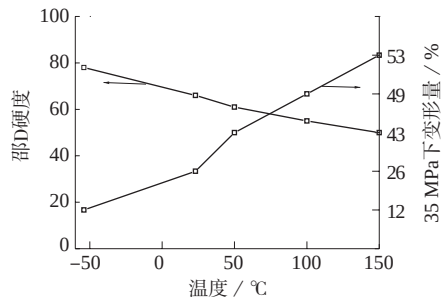


图 1 不同温度 PTFE 复合材料的硬度和压缩形变

时下降到50。在高温下,材料变软有被挤出的风险。从35 MPa下材料的压缩形变量也可知,高温下材料的压缩形变量增大,从常温23℃时的26%增大到150℃时的53%。

(2) 动态力学性能。

DMA 常被用来研究聚合物的玻璃化转变、结晶、交联、相分离以及分子链各层次的运动等,是研究聚合物分子运动极为有用的方法。密封件往往需要在不同的环境温度下承受动态应力,因此研究密封材料的动态力学性能对分析密封件的使用寿命和可靠性具有重要的意义。图2为PTFE复合材料的DMA曲线。从图2可知,PTFE复合材料的储能模量随着温度的提高而降低。在常温23℃下PTFE复合材料的储能模量为1392 MPa,而高温150℃下储能模量下降为186 MPa。对密封件来说,储能模量越低,可压缩性越好,密封效果越好,因此PTFE复合材料适合在高温下使用。

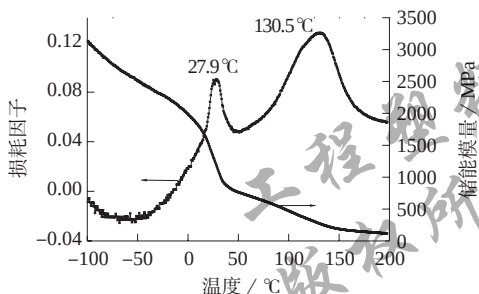


图2 PTFE复合材料的DMA曲线

从图2损耗因子曲线可知,PTFE复合材料的 α 转变温度在130.5℃,这是PTFE的玻璃化转变温度; β 转变温度在27.9℃,这是PTFE的晶型转变温度^[10]。

(3) 拉伸性能。

拉伸性能为材料的基本力学性能,不同温度下材料的拉伸性能不同。图3为不同温度下PTFE复合材料的拉伸强度和断裂伸长率。从图3可知,随着温度提高,PTFE复合材料的拉伸强度下降;断裂

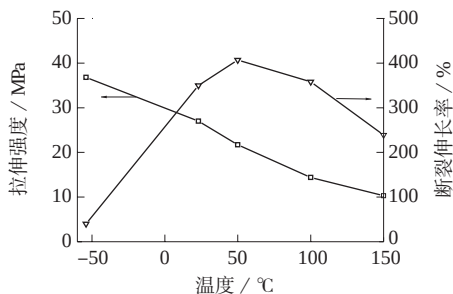


图3 不同温度下PTFE复合材料的拉伸性能

伸长率先增大后减小,在温度为50℃左右时断裂伸长率最大。这是因为随着温度提高,PTFE分子之间的结合力逐渐减弱,因此拉伸强度下降。

2.2 摩擦磨损性能

液压元件作往复运动,对密封材料提出了低摩擦系数和耐磨损要求。PTFE材料具有低摩擦特性,但耐磨损性比较差,因此对其进行改性,改性后的PTFE耐磨损性提高上千倍以上。测试不同温度下密封材料的摩擦系数和体积磨损率,找出密封件在高温下是否出现异常磨损,从而在材料配方设计时考虑散热问题。

图4为不同温度下PTFE复合材料的摩擦系数。从图4可知,随着温度升高,材料的摩擦系数呈增大趋势。在23℃,液压油润滑下,PTFE复合材料滑动稳定阶段的摩擦系数为0.03;当温度升高到150℃,摩擦系数增大到0.05左右。这是因为高温下,PTFE的分子链活动增加,分子间相互作用力增强,因此摩擦系数有所增大。但由于有液压油的润滑,在摩擦过程中及时将摩擦生热冷却,因此摩擦系数增大幅度不高。

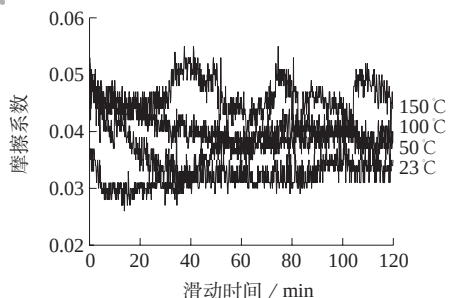


图4 不同温度下PTFE复合材料的摩擦系数

图5为不同温度下PTFE的体积磨损率。从图5可知,随着温度升高,改性PTFE的体积磨损率增大,也就是说磨损增大。这是因为温度升高时,材料硬度下降,抵抗压力能力下降,因此容易磨损^[11]。

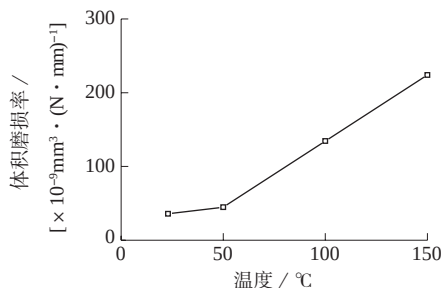


图5 不同温度下PTFE复合材料的体积磨损率

2.3 耐油性

纯PTFE的耐油性非常好,但是填充改性填

料可能对材料的耐油性能有所影响,而且不同的润滑油里面含有各种添加剂,对材料的性能也会有一定的影响。填充改性 PTFE 材料在 150℃ 液压油中浸泡 7 天后材料性能变化情况见表 1。从表 1 可知,PTFE 材料在液压油浸泡后,硬度无变化,10% 压缩强度、拉伸强度和断裂伸长率的变化率都非常小,在测试误差范围之内,可见液压油对填充改性 PTFE 的性能基本无影响,在实际使用过程中可不用考虑材料老化和溶胀对密封件使用寿命的影响。

表 1 PTFE 复合材料的耐油性能

项目	变化率 / %
硬度	0
10% 压缩强度	5.3
拉伸强度	1.9
断裂伸长率	3.3

2.4 往复运动密封件性能

密封件的密封效果和寿命虽然只能在实际使用过程中体现,但提前做一些密封模拟台架试验,理解密封件对材料的性能要求,及时做出一些防止密封过早失效的改进措施,对提高密封件的使用寿命和可靠性有重大的参考价值^[12-13]。笔者通过高压往复密封试验台,对轴用阶梯圈 100 mm × 115.1 mm × 6.3 mm 的试验产品初步评估材料的可行性,进一步验证密封材料。

密封件的结构和安装沟槽如图 6 所示,将改性 PTFE 制成的密封环与 O 形圈组成轴用阶梯圈,在模拟往复台架上进行密封性和寿命评估,其中密封圈的压缩率取 15%~20%,表 2 为其测试条件。

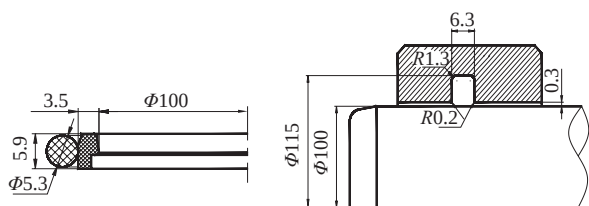


图 6 密封件的结构和安装沟槽图

表 2 往复运动密封件性能测试条件

项目	测试条件
润滑油	HM46 抗磨液压油
循环次数 / 万次	150
行程长度 / mm	± 200
总长度 / km	600
压力 / MPa	35
往复速度 / (m · s ⁻¹)	0.3
环境温度	室温

表 3 为往复运动密封件性能测试结果。从表 2、表 3 可知,密封件在 35 MPa,往复速度 0.3 m/s,行程长度 ± 200 mm 下往复 150 万次,累计泄漏量

只有 20 mL,可见轴用阶梯圈在高压下具有良好的密封效果。这是因为 O 形圈提供了良好的压缩回弹性和接触应力,改性 PTFE 具有良好的耐磨性和低摩擦阻力特性,这样解决了高压下 O 形圈的摩擦阻力大和耐磨损性差等问题。

表 3 往复运动密封件性能测试结果

项目	测试结果
泄漏量 / mL	20
挤出宽度 / mm	0.5
磨损和压缩变形率 / %	5

密封件的挤出与密封间隙有关,间隙越小,越不容易被挤出,但对装备的加工精度要求比较高。在同样的挤出间隙下,可以通过密封件的结构设计或选择不同的密封材料提高其抗挤出性。一般材料的硬度越高,弹性模量越大,抗挤出性越好。因此,改性 PTFE 的抗挤出性比橡胶或聚氨酯弹性体要好。从抗挤出性看,密封件的挤出宽度达到 0.5 mm,挤出比较严重,见图 7,可知在高压 35 MPa 下密封件的主要失效模式为挤出^[14]。目前针对密封件挤出问题,主要有降低密封间隙、增加挡圈或提高密封材料的硬度等方法。降低密封间隙,意味着加工精度增加,加工成本大幅提高。增加挡圈是比较经济的方法,但密封沟槽空间会增加。提高材料的硬度也可以提高密封件的抗挤出性,但会造成密封效果下降。

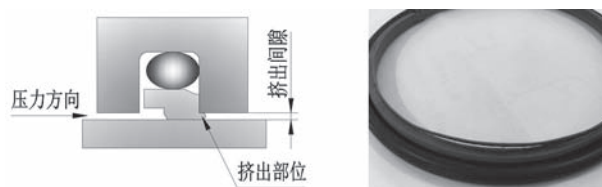


图 7 测试后密封件的挤出照片

从磨损和压缩变形看,密封环的磨损和压缩永久变形总计为 5%,用改性 PTFE 制成的密封环在往复运动过程中受到磨损和压缩的双重作用,导致密封环的厚度变小,整个密封所受的压缩率变小,接触应力下降,从而影响密封效果,因此考察材料的耐磨损性和耐压缩蠕变性非常重要^[15]。

图 8 为活塞杆温度随往复次数增加而变化的关系。从图 8 知,刚开始往复运动时处于磨合阶段,压缩率较大,接触应力较大,摩擦生热比较厉害,因此活塞杆温度比较高。随着往复次数的增加,压缩率变小,接触应力减小,摩擦生热降低,因此活塞杆温度下降,最终往复运动处于稳定摩擦阶段,活塞杆温度趋于稳定。

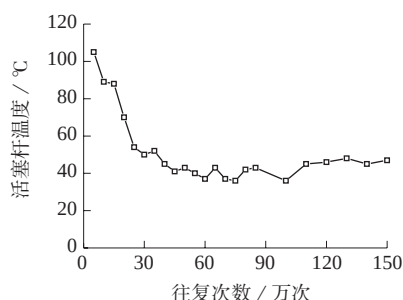


图8 活塞杆温度随往复次数的增加而变化关系

3 结论

(1) 随着温度提高,PTFE 复合材料的硬度下降,压缩形变量增加,储能模量下降,虽然对密封效果有利,但密封材料容易被挤出;随着温度提高,拉伸强度降低,断裂伸长率先增大后减小。

(2) 随着温度提高,PTFE 材料的摩擦系数有所增加,体积磨损率增加,但由于有油润滑,增加不明显;改性PTFE 材料的耐油性能非常好,液压油对填充改性PTFE 的性能基本无影响。

(3) 往复模拟台架试验显示,轴用阶梯圈的泄漏量较少,磨损和压缩变形率较低,但试验后密封件的挤出比较严重,可见高压下密封件的主要失效原因为密封件被挤出,可以通过降低密封间隙,增加挡圈或提高材料硬度来提高密封件的抗挤出性。

参考文献

- [1] 黄兴,郭飞,叶素娟,等. 橡塑密封技术发展现状与趋势[J]. 润滑与密封,2020,45(6):1-6.
Huang Xing, Guo Fei, Ye Sujuan, et al. Research status and development trend of rubber and plastic sealing technology[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(6):1-6.
- [2] Nikas G K. Eighty years of research on hydraulic reciprocating seals: Review of tribological studies and related topics since the 1930s[J]. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol, 2010, 224: 1-23.
- [3] 赵秀棚,夏亚歌,魏俊华,等. 液压往复密封件磨损失效概率研究[J]. 润滑与密封,2020,45(2):105-109.
Zhao Xiuxu, Xia Yage, Wei Junhua, et al. Study on wear failure probability of hydraulic reciprocating seals[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(2):105-109.
- [4] 王军,廖瑶瑶,李永康,等. 基于混合润滑模型的往复密封动特性研究[J]. 润滑与密封,2020,45(2):50-55.
Wang Jun, Liao Yaoyao, Li Yongkang, et al. Investigations on the dynamic reciprocating sealing performance with partial lubrication model[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(2):50-55.
- [5] 张妙恬,时剑文,索双富,等. 基于斯特封的往复密封摩擦磨损界面性能实验研究[J]. 液压与气动,2019(11):99-104.
Zhang Miaotian, Shi Jianwen, Suo Shuangfu, et al. Experimental

study of friction and wear interface performance of reciprocating seal based on sterling seal[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(11):99-104.

- [6] 黄兴,夏迎松,黄乐,等. 往复密封数值仿真模型及试验验证[J]. 润滑与密封,2019,44(7):17-20.
Huang Xing, Xia Yingsong, Huang Le, et al. Numerical simulation model and experimental verification of reciprocating seal[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(7):17-20.
- [7] Bin Lin, Anying Wang, Tianyi Sui, et al. Friction and wear resistance of polytetrafluoroethylene-based composites reinforced with ceramic particles under aqueous environment[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2020, 1(8).doi:10.1088/2051-672X/ab6e23.
- [8] 李红波,赖亮庆,黄艳华,等. 聚酰亚胺填充PTFE密封材料的性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(11):30-35.
Li Hongbo, Lai Liangqing, Huang Yanhua, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):30-35.
- [9] 索军营,闵雅兰,潘剑锋,等. 针状硅灰石填充PTFE密封材料的性能[J]. 工程塑料应用,2018,46(8):12-17.
Suo Junying, Min Yalan, Pan Jianfeng, et al. Performance of acicular wollastonite filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8):12-17.
- [10] Wang Qihua, Zheng Fei, Wang Tingmer. Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum[J]. Cryogenics, 2016, 75:19-25.
- [11] Yes J, Zeng X R. Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures[J]. Tribol T, 2014, 57(3):382-386.
- [12] 王世强. 基于液压实验平台的液压往复密封技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
Wang Shiqiang. The reciprocating hydraulic seal technology research based on hydraulic test bench[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2013.
- [13] 张宗华,隋明丽,杜少光,等. 航空往复型密封件性能评价技术研究[J]. 液压气动与密封,2016(12):27-29.
Zhang Zonghua, Sui Mingli, Du Shaoguang, et al. Research on performance evaluation technology of reciprocating seal for aviation[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2016(12):27-29.
- [14] 李国一,刘建红. 往复轴用阶梯圈的台架试验及其寿命研究[J]. 液压气动与密封,2018(2):12-15.
Li Guoyi, Liu Jianhong. The study on life and bench test of step-seal for reciprocating shaft[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018(2):12-15.
- [15] 叶素娟,禹权,李国一,等. 密封用PTFE复合材料的压缩蠕变性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(2):88-92.
Ye Sujuan, Yu Quan, Li Guoyi, et al. Research on compressive creep properties of PTFE composites used for sealing[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):88-92.