文章编号：1003-1480（2026）01-0043-06

沉雷器O型密封圈气密性失效机理及氟醚橡胶改进验证

王 振，高江康成，王兴宇，张 恒，刘 超，王 端

（中北大学环境与安全工程学院，山西 太原，030051）

摘 要：为明晰某型沉雷器在质量一致性检验过程中频繁出现“水密合格、气密失效”故障的内在机理，本研究运用故障树分析（FTA）、有限元仿真以及验证试验相结合的闭环方法展开深入探究。研究结果显示：该故障的根本原因在于 O 形密封圈材料的选择存在不合理性。具体而言，GX2-50 硅橡胶在承受 2.5 MPa 外水压时，会产生 0.988 mm 的不可逆挤出位移，此位移超出了密封槽 3.5 mm 宽度所设定的安全裕度。当将材料替换为 FM-1D 氟醚橡胶后，最大位移降低至 0.756 mm，且始终处于密封槽内。在进行 0.1 MPa 气密检测时，未观察到气泡逸出现象。针对 10 发验证弹，无论采用“水密-气密”或者“气密-水密-再气密”的测试顺序，密封可靠度均达到 100%。此外，经过 70 ℃、240 h 的加速老化处理后，其压缩永久变形率仅为 13.8%，满足 GJB 150.9A-2009 关于长期贮存的相关要求。

关键词：沉雷器；O 型密封圈；气密失效；故障树分析；FM-1D 氟醚橡胶；高压动密封

中图分类号：TJ450.3 ；TQ560.5 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.007

The Air Tightness Failure Mechanism of the O-ring of the Sunken Mine Device Detonator and the Improvement Verification of Fluoroether Rubber

WANG Zhen，GAO Jiang-kangcheng，WANG Xing-yu，ZHANG Heng，LIU Chao，WANG Duan

（ School of Environment and Safety Engineering，North University of China，Taiyuan，030051）

Abstract： To clarify the intrinsic mechanism behind the frequent occurrence of "hydrostatic test passed but air tightness failed" during the quality consistency inspection of a specific sunken mine device, this study employed a closed-loop approach integrating fault tree analysis (FTA), finite element simulation, and verification tests. The results reveal that the root cause of the failure lies in the inappropriate material selection for the O-ring seal. Specifically, when subjected to an external hydrostatic pressure of 2.5 MPa, the GX2-50 silicone rubber exhibited an irreversible extrusion displacement of 0.988 mm, exceeding the safety margin defined by the 3.5 mm width of the sealing groove. After replacing the material with FM-1D fluoroether rubber, the maximum displacement was reduced to 0.756 mm, remaining entirely within the groove. During the 0.1 MPa air tightness test, no bubble leakage was observed. For the 10 validation units, regardless of whether the testing sequence followed "hydrostatic-air tightness" or "air tightness-hydrostatic-re-air tightness" ,the sealing reliability reached 100%. Furthermore, after accelerated aging at 70 ℃ for 240 hours, the compression set rate was only 13.8%, meeting the long-term storage requirements specified in GJB 150.9A-2009..

Key words： Sunken mine device; O-ring seal; Air tightness failure; Fault tree analysis; FM-1D fluoroether rubber; High-pressure dynamic sealing

沉雷器[1]作为一种水下作业装置，主要应用于海 军领域。该装置启动后，可使搭载它的产品进水自毁，

收稿日期：2025-01-16

作者简介：王振（2000-），男，在读硕士研究生，主要从事火工品产品及相关技术研究。

通讯作者：王端（1973-），男，教授，主要从事火工品产品及相关技术研究。

引用本文：王振，高江康成，王兴宇，等. 沉雷器 O 型密封圈气密性失效机理及氟醚橡胶改进验证[J]. 火工品, 2026(1):43-48.

从而避免被打捞后造成信息泄露。在某型沉雷器装配过程中进行密封性检验时，出现了密封性失效的故障。为解决此故障，本文围绕沉雷器的工作原理、试验流程、故障表现、装配工序、零件尺寸以及 O 型密封圈材料性能展开分析，明确了故障成因，并在此基础上实施改进。通过试验，验证了改进方法的可行性。

1　某型沉雷器结构与密封性要求

某型沉雷器[1]的结构如图 1 所示，其主要由活塞、固定销、电起爆器以及低通滤波器等关键部件构成。

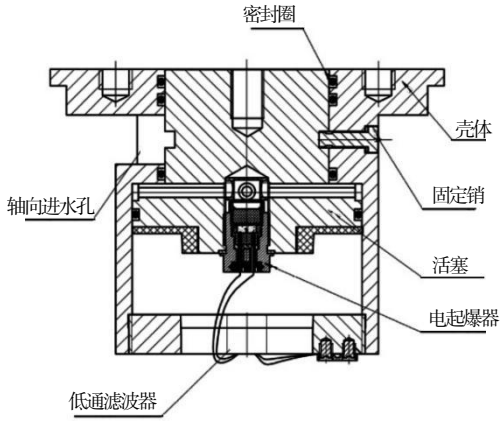


图 1　某型沉雷器结构图

Fig.1　Structure diagram of a type of sunken mine device

1.1　工作原理

该型沉雷器是依据拔销器的工作原理设计[2]，当沉雷器接收到外部指令（即通入额定电流）时，电起爆器启动并生成高压气体。高压气体在封闭腔内做功，使得固定销瞬间承受超出其极限强度的剪切力而发生断裂，进而致使活塞回缩，进水孔打开，海水得以流入装置内部，以此实现沉底自毁功能。为确保沉雷器能够正常运行，需严格确保其密封性，涵盖水密性与气密性。若任一方面未能满足要求，产品将提前失效，无法实现预期功能。

1.2　密封性试验方法

1.2.1　水密性试验

开展水密性试验时，首先将沉雷器置于密封腔体内并加以固定。使用注水装置向密封腔体内注入水，直至腔体内水压达到 2.5 MPa，并维持该压力 30 min。随后取下产品进行检查：若固定销未发生变形且内部未出现进水现象，则判定其满足水密性要求；反之，则判定为水密性失效。

1.2.2　气密性试验

在开展气密性试验时，首先将沉雷器倒置并固定于密封腔体内，在产品表面倒入适量的水。随后，运用注气装置向密封腔体内注入空气，使内部气压提升至 0.1 MPa，并维持该压力 30 min。在此时间段内，观察是否有气泡产生：若未观察到气泡产生，则判定该产品满足气密性要求；反之，则判定为气密性失效。

1.2　故障现象

在实际测试过程中，发现某编号的沉雷器未通过气密性试验。具体表征为：在保压时间段内，有气泡从产品表面溢出，这表明该产品存在泄漏点，如图 2 所示。

（a）正常产品　　（b）故障产品

图 2　故障现象对比图

Fig.2　Symptom comparison diagram

图 2（a）为正常产品，图 2（b）为故障产品，对比可见，故障产品表面出现明显气泡，说明其密封性能不达标。

2　故障分析

2.1　故障树建立

故障树分析法（FTA）[3]作为一种有效的故障分析与风险评估工具，在众多领域得到了广泛应用。它借助图形化形式，清晰地呈现了事件之间的因果关联，利于理解和分析。针对某型沉雷器在密封性检测过程中出现的漏气故障，结合产品的加工工艺、装配过程及结构组成进行分析，推断出导致该故障的主要因素可能为零件加工误差过大以及密封措施失效。为了快速且精准地找到故障原因，建立了故障树并进行了详

细分析，结果如图 3 所示。

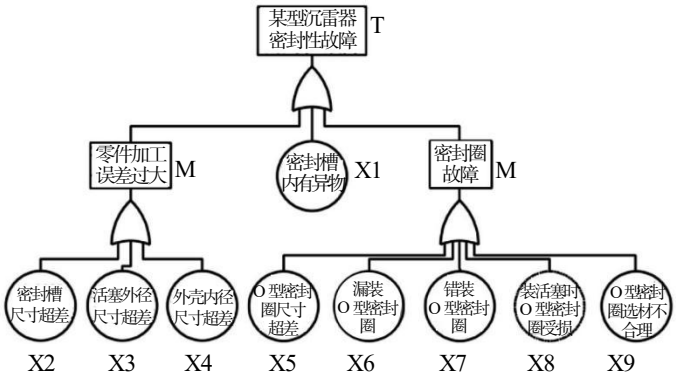


图 3　故障树分析图

Fig.3　Fault tree analysis diagram

2.2　底事件分析

通过对故障沉雷器的拆解与检查，逐项排除底事件的可能性：

异物检查：拆解后对各部件表面及密封腔内部进行检查，均未发现异物，排除底事件 X1。

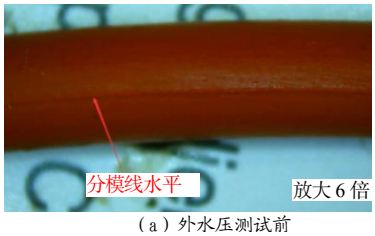
尺寸公差检查：采用游标卡尺和内沟槽卡尺对密封槽深度、宽度、活塞外径及壳体内径进行测量，结果均处于图纸规定的公差范围之内，排除底事件 X2、X3 和 X4。

O 型密封圈安装检查：经确认，所有产品的 O 型密封圈均安装正确，排除底事件 X6 和 X7。

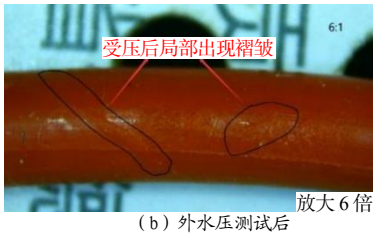
O 型密封圈完整性检查：将故障产品中的 O 型密封圈取下进行检查，未观察到表面破裂或断裂现象，排除底事件 X8。

O 型密封圈尺寸校验：依据 GB/T 3452.1-2005 液压气动用 O 型密封圈 第一部分：尺寸系列公差[4]中 G 系列的相关规定，经测量，壳体孔径为 49.99 mm，O 型密封圈内径 d_1 应为（50 ± 0.48） mm，截面直径 d_2 应为（2.65 ± 0.09） mm。实际测量所得值分别为 d_1=50.1 mm，d_2=2.59 mm，均处于公差范围内，故排除底事件 X5。此外，考虑到 O 型密封圈分模线位置会对其密封性能产生影响，该批次采用 45°分模法进行制备[5]。

电镜观察对比分析：针对经过水密试验的 O 型密封圈与未投入使用的 O 型密封圈开展电镜观察，观察结果如图 4 所示。由图 4 可见，未经水密试验的 O 型密封圈表面光滑平整，而经过水密试验的密封圈表面出现了褶皱现象，故而不能排除底事件 X9。基于此推断，O 型密封圈的选材缺乏合理性，致使其在承受 2.5 MPa 的外水压之后出现了超限损伤情况，无法满足气密性要求，最终引发了密封性失效问题。



（a）外水压测试前



（b）外水压测试后

图 4　进行过外水压测试前后 O 型密封圈对比图

Fig.4　Comparison of O-ring before and after external hydraulic test

2.3　仿真分析

在该产品中，O 型密封圈采用动密封形式，用于实现活塞与壳体之间的密封。其密封原理是通过活塞与壳体对 O 型密封圈的挤压变形实现密封效果[6]。密封结构如图 5 所示。

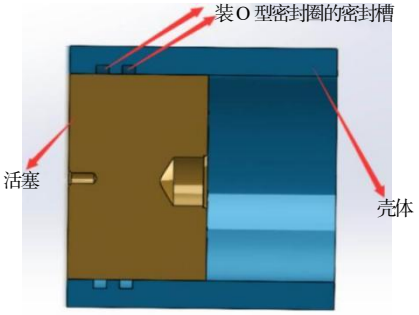


图 5　O 型密封圈密封结构示意图

Fig.5　Schematic diagram of O-ring structure

为验证故障分析的准确性，采用 COMSOL 软件建立 O 型密封圈的工作环境模型（采用二阶 Mooney-Rivlin 模型，C_{10}=0.48 MPa，C_{01}=0.12 MPa），仿真模型如图 6 所示。

首先对模型材料参数予以定义，随后模拟实际使用环境，于外侧施加固定约束，以此模拟密封槽内的状态；在内表面施加来自活塞于 *XY* 平面的挤压力以

及 Z 方向 2.5 MPa 外水压等效应力，并将位移方向限定于 Z 轴。最后对模型进行网格划分，网格划分如图 7 所示。仿真计算在设定的收敛容差内顺利完成，表明求解过程稳定可靠，仿真结果如图 8 所示。

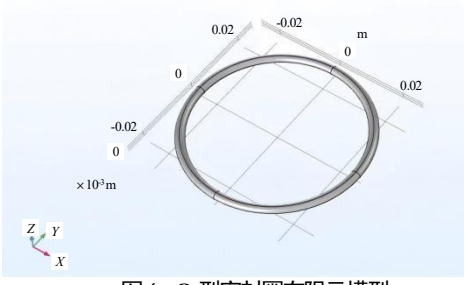


图 6 O 型密封圈有限元模型

Fig.6 Simulation model of the O-ring

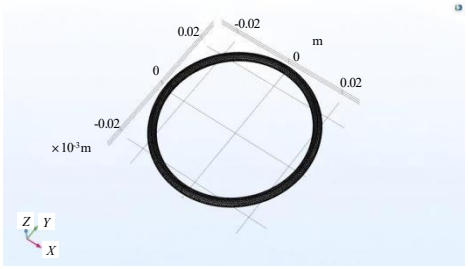


图 7 网格划分图

Fig.7 Meshing diagram

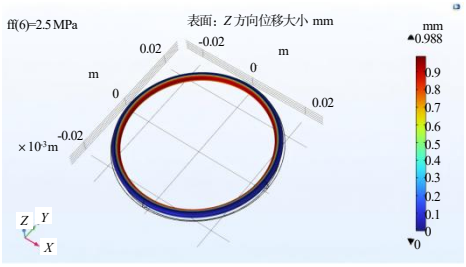


图 8 O 型密封圈在 2.5 MPa 外水压作用下的 Z 方向位移分布

Fig.8 The Z-direction displacement distribution of the O - ring under the action of an external

从图 8 的仿真结果可知，在 2.5 MPa 的外水压作用下，O 型密封圈在 Z 方向的最大位移达到 0.988 mm。此时，密封槽宽度为 3.5 mm，O 型密封圈初始直径为 2.6 mm。这一现象表明，由 GX2-50 硅橡胶制成的 O 型密封圈在承受 2.5 MPa 外水压的情况下，可能会出现挤出密封槽并遭受剪切的情况，进而无法满足气密性的相关要求。

2.4 试验验证

为验证故障原因定位与仿真结果的准确性，选取 10 发产品进行试验。首先，对这些产品的尺寸进行测量，确保其处于图纸规定的公差范围之内，规避因尺寸问题引发的密封性失效情况。其次，整个装配过程严格遵循工艺要求执行，防范人为因素导致的故障[7]。选用同一硫化批次的 O 型密封圈，以消除工艺波动的影响。设计不同的测试顺序来模拟实际服役流程，将这 10 发产品划分为两组进行试验，试验结果如表 1 所示。

表 1 故障因素验证试验结果（原批次 O 型密封圈）

Tab.1 Failure factor verification test results（Original batch -ring seals）

组别	测试顺序	测试结果
I	水密性测试→气密性测试	水密性合格， 气密性有 3 发失效
II	气密性测试→水密性测试 →气密性测试	第 1 次气密性合格，水密性合格，第 2 次气密性有 2 发失效

通过对 I 组试验结果的观察可知，在水密性测试过程中，产品内部未出现进水情况，表明原批次 O 型密封圈能够满足水密性要求。然而，在后续开展的气密性测试中，有 3 发产品出现了密封性失效现象。II 组试验结果显示，在未进行水密性测试而先进行气密性测试时，产品的密封性表现良好；但在进行水密性测试之后，有 2 发产品出现了密封性失效情况。基于此可以判定，该批次 O 型密封圈在承受 2.5 MPa 外水压后遭受了不可接受的损伤，致使其无法通过后续的气密性试验，最终引发了密封性失效故障。上述两组试验成功复现了产品故障，验证了故障定位的准确性。

3 改进措施与验证

3.1 材料选型优化

原批次 O 型密封圈以 GX2-50 硅橡胶作为基础材料。参照《机械设计手册》[8-9]中的橡胶材料选用指南，具体内容如表 2 所示。

表 2 橡胶材料的选用指南（部分）

Tab.2 Selection of rubber (part)

使用要求	天然橡胶	聚硫橡胶	硅橡胶	氟橡胶	氯化聚乙烯橡胶
高强度	A			B	
耐磨	B		C	B	B
防震	A		B		
气密	B	AB	C	AB	
耐热			A		
耐寒	B		A		
电绝缘	A		A		
磁性	A				
耐水	A	C	B	AB	B

注：选用顺序可按 A→AB→B→C 进行。

由表 2 可知，在水密与气密应用场景中，氟橡胶的选用优先级高于硅橡胶。基于此，选用 FM-1D 氟醚橡胶替代 GX2-50 硅橡胶来制备新批次 O 型密封圈。氟醚橡胶凭借其卓越的密封性能以及良好的耐腐蚀、耐氧化、耐高低温与电绝缘性能，已在航空航天、化工等领域得到广泛应用[10-11]。两种橡胶关键性能参数对比如表 3 所示。

表 3　两种橡胶材料性能参数对比

Tab.3　Comparison of some performance parameters of two kinds of rubber compound

性能指标	FM-1D 氟醚橡胶	GX2-50 硅橡胶
工作温度/℃	-55~250	-50~200
邵尔 A 硬度	75±5	49
拉断伸长率/%	≥110	500
脆性温度/℃	-55	≤-65
恒定压缩永久变形/%（热空气，200℃，24h，压缩率 20%）	28	38
拉伸强度/MPa	≥13	8.5

由表 3 可见，尽管硅橡胶具备更高的拉断伸长率，但在高压动密封工作条件下，材料的硬度与抗挤出能力更为关键。FM - 1D 氟醚橡胶拥有较高的邵尔 A 硬度（75 ± 5 ）以及较低的压缩永久变形率（28%），展现出更优良的密封保持能力。

从材料微观结构视角分析，氟醚橡胶分子主链中的 C－F 键键能高达 485 kJ・mol^{-1}，显著高于硅橡胶中 Si－C 键的 318 kJ・ mol^{-1}，这使得 C－F 键在应力作用下更不易断裂[10]。此外，借助分子动力学模拟发现，氟醚橡胶的刚性侧基致使其链段运动受到限制，交联网络更为致密，进而展现出更强的抗永久变形能力。FM - 1D 氟醚橡胶分子链含有高键能的 C – F 键，分子链刚性较大，交联网络致密且稳定，形成具备较强抗破坏能力的三维弹性体结构；而 GX2-50 硅橡胶的 Si - C 键能较低，分子链柔顺性较高，交联网络相对疏松，在长期高压应力作用下，易出现分子链滑移或交联点断裂现象，从而引发不可逆变形，对密封可靠性造成影响[12]。

3.2　仿真验证

基于上述材料性能剖析，运用 COMSOL 软件针对更换材料后的 O 型密封圈展开仿真分析。仿真模型与加载条件和 2.3 节保持一致，仅将材料置换为 FM - 1D 氟醚橡胶，并采用 Ogden 超弹性模型（$N=3$）予以描述。

仿真结果如图 9 所示，在 2.5 MPa 外水压作用下，O 型密封圈在 Z 方向的最大位移为 0.756 mm，该位移小于密封槽宽度（3.5 mm）与密封圈初始直径（2.6 mm）之间的间隙，这表明密封圈不会被挤出槽外，切实规避了剪切损伤风险。

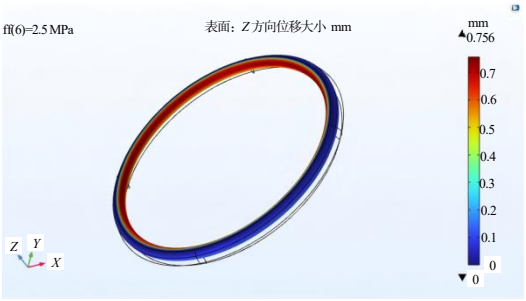


图 9　氟醚橡胶 O 型密封圈在 2.5 MPa 外水压下的 *Z* 方向位移分布

Fig.9　*Z*-direction displacement distribution of fluorinated ether rubber O-ring under 2.5 MPa external water pressure

3.3　试验验证

为验证改进措施的有效性，采用 FM-1D 氟醚橡胶，按照 45° 分模工艺制备新批次 O 型密封圈，并对成型工艺进行优化，以提高产品的一致性[13]。选取 10 件产品开展密封性能验证试验，分组方案及试验结果如表 4 所示。

表 4　改进后密封性能验证试验结果（FM-1D 氟醚橡胶 O 型密封圈）

Tab.4　The verification test results of the improved sealing performance（FM-1D fluoroether rubber O-ring seal）

组别	试验流程	样品编号	水密性测试结果	第一次气密测试	第二次气密测试
I	先进行水密性测试再进行气密性测试	I-1	1	1	-
		I-2	1	1	-
		I-3	1	1	-
		I-4	1	1	-
		I-5	1	1	-
II	先进行气密性测试	II-1	1	1	1
		II-2	1	1	1
	再进行水密性测试	II-3	1	1	1
		II-4	1	1	1
	再进行气密性测试	II-5	1	1	1

注：“1”表示密封性可靠；“0”表示密封性失效；“–”表示未进行该组试验。

从表 4 能够看出，无论测试顺序怎样，全部样品均通过了水密性与气密性考核，密封性能呈现出稳定且可靠的状态。针对剩余批次的产品依照规范开展例

行检验，结果均符合技术要求，这表明材料更换措施切实有效地解决了密封失效问题。

3.4 长期贮存性能评估

军用产品除需满足使用性能外，还应具备良好的长期贮存可靠性。依据 GJB 150.9A - 2009 军用装备实验室环境试验方法 第 9 部分：湿热试验[14]，对 FM - 1D 氟醚橡胶 O 型密封圈开展加速老化试验。试验条件为：温度 70 ℃，持续时间 240 h，采用高低温试验箱进行试验。后续将对老化后的样品进行硬度、拉伸性能及密封性测试，以评估其贮存寿命。

老化试验结束后，取出样品并测试其压缩永久变形率，最终测得其永久变形率为 13.8%，小于 15%，表明其性能满足使用要求。

4 结论

针对某型沉雷器在密封性试验中呈现的气密性失效问题，运用故障树分析、仿真计算与试验验证相融合的方法，系统性地开展了故障定位与改进研究。研究结果显示，原采用 GX2-50 硅橡胶制备的 O 型密封圈在承受 2.5 MPa 外水压后产生超限变形，进而致使密封结构受损，这是引发气密性失效的主要因素。

通过对材料性能进行对比分析，选用抗挤出能力更为优异、压缩永久变形更低的 FM-1D 氟醚橡胶替换原硅橡胶材料。有限元仿真结果表明，新密封圈在 2.5 MPa 外水压下的最大位移由 0.988 mm 降至 0.756 mm，未超出密封槽的容纳范围，具备良好的抗挤出特性。

试验验证结果显示，采用 FM - 1D 氟醚橡胶 O 型密封圈后，产品无论是在先进行水密试验后进行气密试验，还是先进行气密试验再承受水压载荷的工况下，均能维持可靠的水密与气密性能，密封失效故障得以彻底解决。同时，该材料满足军用环境下的长期贮存要求，已通过 70 ℃、240 h 加速老化试验的考核。

本研究提出的材料优化方案有效解决了高压动密封工况下的密封可靠性问题，为同类深水环境下工作的火工品密封设计提供了可参考的技术路径与工程实践依据。

参考文献：

[1] 王端,高一隆,李帅,等.某新型沉雷器设计研究[J].火工品,2019(3):1-4.

[2] 崔卫东,关翔云,惠蕾.拔销器的小型化设计[J].火工品,2006(2):17-19.

[3] 邵延峰,薛红军.基于故障树的可靠性数字仿真方法研究[J].机械强度, 2008(3):381-385.

[4] GB/T3452.1-2005 液压气动用 O 型密封圈 第一部分：尺寸系列公差[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[5] 张涛,孙洁,常英珂,等.某型拔销器功能失效分析[J].火工品,2021(3):16-19.

[6] 张心怡,贾均红,高飒飒,等.O 型橡胶密封圈动密封应力分布数值模拟研究[J].机械科学与技术,2023,42(10):1 745-1 752.

[7] 杨文,唐蕾,颜信飞,等.某型针刺起爆器解锁力超差故障原因分析及工艺改进[J].火工品,2017(2):15-18.

[8] 闻邦椿.机械设计手册：第 1 卷[M].北京：机械工业出版社,2017.

[9] 闻邦椿.机械设计手册：第 3 卷[M].北京：机械工业出版社,2017.

[10] 王宝成,张波,韦园思,等.全氟醚橡胶密封材料研究进展[J].润滑与密封,2024(7):1-10.

[11] 丁贝,王聚财,朱珠,等.某型液压缸活塞组合密封圈改进研制[J].特种橡胶制品,2024,45 (6):45-50.

[12] Xu X, Jia J, Li W, et al. Molecular dynamics simulation of fluorocarbon and silicone rubber under compression stress[J]. Computational Materials Science, 2020, 171: 109 227.

[13] 张东晋川,张晓峰,黄选民,等.氟橡胶 O 形密封圈预成型优化因素分析[J].橡塑技术与装备,2024,50(2):58-61.

[14] GJB 150.9A-2009，军用装备实验室环境试验方法 第 9 部分：湿热试验[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2009.