

多因素耦合下建筑给排水橡胶密封材料压缩回弹与耐久性

胡晓娟^{1,2}

(1. 福建漳发建设有限公司, 漳州 363000; 2. 福州大学, 福州 350100)

摘 要: 为了保障管道密封可靠性、延长管道使用寿命, 以某市政给排水管道改造工程为背景, 选取三元乙丙橡胶 (EPDM)、丁腈橡胶 (NBR)、硅橡胶 (SR) 及氢化丁腈橡胶 (HNBR) 四种常用密封橡胶材料, 基于规范要求设计多因素耦合试验方案, 系统研究了压缩率、温度、介质、老化时间对材料压缩回弹性能及耐久性能的影响规律。研究表明: 压缩率在 20%~30% 区间时, SR 回弹率最高 (达 92.35%~98.12%), EPDM 的综合性能最优; 温度升至 70℃ 时, HNBR 与 NBR 压缩永久变形率超过 15%, 回弹率低于 85%; 污水介质中 SR 变形率仅增 0.68%, EPDM 增加 1.14%; 热空气、介质及臭氧耦合老化下, SR 拉伸强度保留率达 90.36%, EPDM 为 86.75%, NBR 仅 75.48%, 综合性能排序为 SR > EPDM > HNBR > NBR。研究明确了 20%~30% 压缩率、70℃ 为性能拐点, 建立了多因素耦合下性能衰减规律, 为工程选材与寿命设计提供依据。

关键词: 建筑给排水; 密封橡胶; 压缩回弹; 耐久性; 多因素耦合; 压缩永久变形

中图分类号: TU532.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0155-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.023

Compression Resilience and Durability of Rubber Sealing Materials for Building Water Supply and Drainage under Multi-Factor Coupling

HU Xiaojuan^{1,2}

(1. Fujian Zhangfa Construction Co., Ltd., Zhangzhou 363000, China;

2. Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: In order to ensure the reliability of pipeline sealing and extend the service life of pipelines, taking a municipal water supply and drainage pipeline renovation project as the background, four commonly used sealing rubber materials were selected: ethylene propylene diene monomer (EPDM), nitrile rubber (NBR), silicone rubber (SR), and hydrogenated nitrile rubber (HNBR). Based on standard requirements, a multi-factor coupled test scheme was designed to systematically study the effects of compression rate, temperature, medium, and aging time on the material's compression rebound performance and durability. The research results show that when the compression rate is in the range of 20%~30%, SR has the highest rebound rate (92.35%~98.12%), while EPDM has the best overall performance; when the temperature rises to 70℃, the compression permanent deformation rates of HNBR and NBR exceed 15%, and their rebound rates are below 85%; in a sewage medium, the deformation rate of SR increases by only 0.68%, and EPDM by 1.14%; under coupled aging of hot air, medium, and ozone, SR retains 90.36% of its tensile strength, EPDM 86.75%, and NBR only 75.48%, with overall performance ranking SR >

建筑结构

EPDM>HNBR>NBR. The study identified a compression rate of 20%~30% and 70℃ as performance turning points, and established the rules of performance degradation under multi-factor coupling, providing a basis for engineering material selection and lifespan design.

Key words: building water supply and drainage; sealing rubber; compression rebound; durability; multi-factor coupling; permanent compression deformation

0 引言

给排水管道是建筑基础设施的重要组成部分,其密封性关乎水资源节约及环境质量^[1]。橡胶材料作为管道接口密封的核心构件,长期服役于压力、温度、水质介质、微生物等多因素耦合的复杂工况中,易出现压缩永久变形增大、回弹能力衰减等问题,进而引发管道渗漏、接口失效等工程隐患^[2]。据统计,国内给排水管道因密封材料失效导致的渗漏事故占总事故的23.7%,年经济损失超过45亿元,老旧管道中密封材料性能衰退尤为突出^[3]。

目前,学者围绕橡胶密封材料的压缩回弹与耐久性开展了大量研究。在压缩回弹方面,海维深等^[4]通过试验,研究了降弹剂改良材料性能,发现掺量6%时强度最优,复掺粉煤灰可显著降低回弹率;张晓东等^[5]以回弹率为核心,探讨并提出了湿喷混凝土控制技术;张欢等^[6]采用试验与模型预测手段,分析了苯基阻尼硅橡胶材料的压缩回弹性,发现其压缩永久变形随着温度或者湿度的上升而增大;朱建鲁等^[7]梳理了氢环境下密封圈研究进展,分析了材料与失效关键问题,指出了当前研究的薄弱环节;魏驰原等^[8]基于压缩热老化法,研究了发泡硅橡胶热老化性能,以压缩回弹率作为重要参数对密封用发泡硅橡胶材料进行了寿命评估;赵张帆等^[9]通过有限元分析与试验,研究了管卡密封性能,得出接触压力随压缩量增大。在耐久性研究方面,沈建青等^[10]基于试验手段,分析了聚氨酯与橡胶粉复合材料抗高温变形性能,得出掺量8%时性能最优的结论;胡晓珍^[11]研究了建筑密封材料耐霉菌耐久性测试的新方法,并验证了新方法的可控性;王媛等^[12]通过水热加速老化试验,分析了盾构橡胶密封垫防水耐久性,总结了其老化机理;李春漫等^[13]为提高密封材料的耐久性,基于冷冻干燥与溶液浸渍法,研究了改性的纳米纤维素/PLA复合材料;顾鸿文等^[14]通过时温等效原理与试验手段,对材料进行了密度、纵向回缩率等通过性测试,并对

材料的最终使用寿命进行了研究;徐锋等^[15]基于模拟外载的热氧老化装置,分析了聚乙烯管老化行为。提出了外载加速老化倍数。尽管现有研究取得了较大成果,但多数侧重单一因素影响分析,缺乏给排水管道工程在多因素耦合作用下的性能演化规律分析。同时,针对给排水领域常用密封材料在压缩、温度、介质及老化等因素耦合下的衰减机制仍需深入研究。

基于此,以某城区老旧给排水管道改造工程为依托,针对四类常用给排水密封橡胶材料,通过标准化试验,开展多因素耦合下的压缩回弹与耐久性试验。通过定量分析材料的性能变化规律,以期给排水工程实践中密封材料的科学选型与性能优化提供参考。

1 工程概况

某城区老旧给排水管道改造工程,覆盖面积12.5 km²,涉及DN100~DN600管道,总长89.6 km(给水52.3 km、排水37.3 km)。管道服役环境复杂:给水压力0.3~1.6 MPa(局部达2.0 MPa),排水多为无压或低压;年温差28℃,地下管段温度15~22℃,裸露管段受环境温度影响显著;给水pH值6.8~7.5、氯离子≤50 mg/L,排水pH值5.5~9.0且含油污、微生物等;地下管段受土壤微生物及湿度侵蚀,裸露管段受紫外线和臭氧老化。工程要求密封橡胶材料在多因素耦合下服役寿命≥20年,压缩永久变形率≤15%、变形率增量≤8%,回弹率≥85%、老化后拉伸性能保留率≥80%。

2 试验设计

2.1 试验材料

试验材料选取建筑给排水管道常用四种密封橡胶材料,分别为三元乙丙橡胶(EPDM)、丁腈橡胶(NBR)、硅橡胶(SR)、氢化丁腈橡胶(HNBR),经硫化成型为标准试样。材料基本参数依据GB/T 528-2023《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》、GB/T 531.1-2008《硫化橡胶或热塑性

橡胶压入硬度试验方法》（第 1 部分：邵氏硬度计法（邵尔硬度）测试，结果见表 1。

表 1 试验材料基本性能参数
Table 1 Basic properties of test materials

材料 类型	邵氏 A 硬度/HA	拉伸 强度/MPa	断裂伸长 率/%	密度 /(g/cm ³)	适用温度 范围/℃
EPDM	65±2	18.5±0.5	480±20	1.15±0.02	-40~150
NBR	70±2	20.2±0.6	420±15	1.18±0.02	-30~120
SR	60±2	8.5±0.3	650±25	1.12±0.02	-60~200
HNBR	75±2	25.8±0.7	380±15	1.21±0.02	-35~160

2.2 试验思路

试验基于建筑给排水管道密封橡胶材料的实际服役工况，构建“压缩率、温度、介质、老化时间”四因素耦合试验体系，分两个阶段开展研究。压缩回弹性能试验选取 15%、20%、25%、30%、35%、40% 六种压缩率，在 23、40、50、60、70、90 ℃ 温度条件及自来水、生活污水两种介质中，测试材料的压缩永久变形率和回弹率，分析各因素对弹性恢复能力的影响规律。耐久性能试验则基于压缩回弹试验确定的最优工况，进一步开展热空气老化（70、100 ℃）、介质浸泡（自来水、生活污水）及臭氧老化（50 ppm）耦合试验，测定老化后材料的硬度变化率、拉伸强度保留率、断裂伸长率保留率及压缩永久变形率增量，进而分析材料的耐久性能衰减机制。

2.3 试验设备

试验设备依据相关标准配置，确保测试精度与试验结果的可靠性，主要设备及参数见表 2。

表 2 主要试验设备及参数
Table 2 Main experimental equipment and parameters

设备名称	型号	技术参数	执行标准
压缩永久变形试验机	XLB-350	压缩率精度±1%，温度控制±1 ℃	GB/T 7759.1—2015
邵氏硬度计	LX-A	测量范围 0~100HA，精度±1HA	GB/T 531.1—2023
万能材料试验机	WDW-10	负荷精度±0.5%，拉伸速率 500 mm/min	GB/T 528—2023
热空气老化箱	401B	温度范围 RT~200 ℃，控温精度±1 ℃	GB/T 3512—2014
臭氧老化试验箱	QL-100	臭氧浓度 0~100 ppm，精度±5 ppm	GB/T 7762—2014
恒温恒湿箱	DHS-100	温度控制±0.5 ℃，湿度控制±3% RH	GB/T 2941—2018
测厚仪	CH-10	测量范围 0~10 mm，精度±0.01 mm	GB/T 2941—2018

2.4 试验步骤

试验材料按标准制备为圆柱形试样，直径 25±0.5 mm，高度 12.5±0.5 mm，用于压缩回弹与耐久性测试；同时制备哑铃型试样 GB/T 528—2023《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》，用于拉伸性能测试。试样在标准环境（23±2 ℃，50%±5%RH）中调节 16 h，消除内应力。

2.4.1 压缩回弹试验步骤

测量试样初始厚度 h_0 ，取 3 次测量平均值；将试样置于压缩夹具中，按设定压缩率 15%、20%、25%、30%、35%、40% 固定，放入对应温度 23、40、50、60、70、90 ℃ 的恒温箱中，分别在自来水、生活污水介质中浸泡，保持 22 h。

达到设定时间后，取出试样，在标准环境中自由恢复 30 min，测量最终厚度 h_1 。

计算压缩永久变形率 C ：

$$C = [(h_0 - h_1)/(h_1 - h_s)] \times 100\% \tag{1}$$

式中： h_s 为压缩状态下理论最小厚度， $h_s = h_0 \times$ 压缩率。

计算回弹率 R ：

$$R = (h_1/h_0) \times 100\% \tag{2}$$

每组试验平行测试 3 个试样，试验结果取平均值±标准差。

2.4.2 耐久性试验步骤

热空气老化试验：将试样放入 70、100 ℃ 热空气老化箱，分别老化 72、120、168、216、336 h，取出后在标准环境中调节 2 h，测试拉伸强度、断裂伸长率保留率；介质浸泡试验：将试样分别浸泡于自来水、生活污水中，在 50 ℃ 恒温下分别保持 72、120、168、216、336 h，取出后擦拭干净，测试拉伸强度、断裂伸长率保留率及压缩永久变形率增量；臭氧老化试验：将试样置于臭氧浓度 50 ppm、温度 40 ℃ 的臭氧老化箱中，分别暴露 24、72 h，观察表面龟裂情况，并测试拉伸强度、断裂伸长率保留率。

3 压缩回弹试验结果分析

3.1 不同压缩率对材料压缩回弹性能的影响

由图 1 可知，在标准温度（23 ℃）、自来水介质条件下，四种材料的压缩永久变形率随压缩率增大呈加速上升趋势，回弹率则呈现下降趋势。低压缩

建筑结构

率 (15%~20%) 下, 分子链变形小, 变形率低于 8%, 回弹率高于 96%, 材料间最大差值仅 3.4%, 差异不显著。进入常用压缩率区间 (20%~30%), 变形率增幅明显加快, SR 变形率始终最低 (从 3.30% 增至 5.40%), HNBR 最高 (从 8.20% 增至 12.55%); 回弹率方面, SR 表现最优, 从 98.12% 降至 92.35%, 降低 5.77%; EPDM 次之, 回弹率从 96.25% 降至 89.76%, 降低 6.49%; 而 NBR 与 HNBR 的回弹率分别下降 7.5%、8.44%, 且 HNBR 在压缩率 30% 时回弹率达 85.12%, 反映出其抗压缩疲劳性较弱。当压缩率达 40% 后, NBR 与 HNBR 的变形率分别为 16.8%、18.9%, 超过 15% 的工程限值; 同时, 所有材料的回弹率下降明显, 均低于 85% 工程要求, 弹性恢复能力显著降低。整体变化表明, SR 在全压缩率范围内保持最高回弹率, 适合对弹性要求苛刻的场合; EPDM 在 25%~30% 常用区间内综合性能与成本优势明显, 是给排水工程的最优选择; NBR 与 HNBR 在高压压缩率下性能劣化显著, 仅适用于低压缩率或静态密封场景。

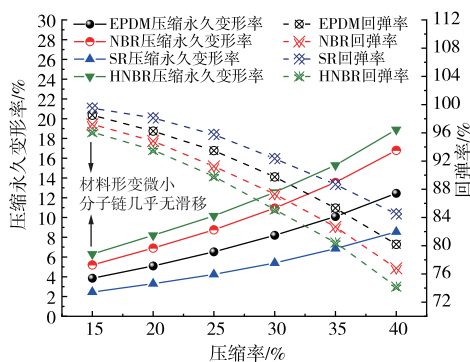


图1 不同压缩率下材料压缩回弹性能变化曲线

Fig. 1 Variation curves of material compression and rebound performance under different compression rates

3.2 不同温度对材料压缩回弹性能的影响

由图2可知, 在 25% 压缩率、自来水水质条件下, 四种材料的压缩永久变形率随温度升高而加速上升, 回弹率相应加速下降, 且降幅逐段增大。常温 (23℃) 情况下, SR 变形率仅 4.24%、回弹率最优, 达 95.76%; 40℃ 时各材料变形率平均增加 1.0%~1.2%, 差异较小。当温度升高至 50~70℃ 时, HNBR 与 NBR 性能显著恶化。HNBR 变形率从 13.58% 增至 17.23%, 超过 15% 的工程限值, 回弹率

降至 83%, 低于 85% 的工程限值; 而 SR 与 EPDM 的变形率低于 11%、回弹率高于 89%, 表现出优异的耐热性。当温度升至 90℃ 极端工况时, HNBR 变形率高达 21.87%、回弹率仅 78.13%, 完全失效; SR 变形率达 10.68% (最低), 但回弹率降至 89.32%。数据变化表明, 温度每升高 20℃, SR 变形率平均增幅最小 (3.22%), EPDM 次之 (3.57%), NBR (5.09%) 与 HNBR (5.85%) 最大。因此, 在给排水高温工况下应优先选用 SR 或 EPDM, 避免使用 NBR 和 HNBR。

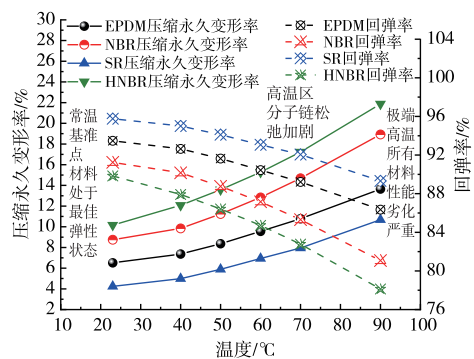


图2 不同温度下材料压缩回弹性能变化曲线

Fig. 2 Variation curve of material compression resilience performance at different temperatures

3.3 不同介质对材料压缩回弹性能的影响

由图3可知, 在 25% 压缩率、70℃ 条件下, 从自来水切换至生活污水后, 四种材料的压缩永久变形率均增大, 回弹率均减小, 表明污水中的油污、酸碱及微生物对橡胶分子链产生了侵蚀与溶胀作用, 加速了黏弹性变形。其中, 由于 NBR 耐油性较差、在含油污水中易发生溶胀导致分子链滑移加剧, 其变形率由 14.69% 增至 17.85%, 增长了 3.16%, 回弹率由 85.31% 降至 82.15%, 降低了 3.16%, 性能劣化最为显著。HNBR 变形率从 17.23% 增至 19.64%, 增长 2.41%, 虽然其耐油性优于 NBR, 但分子链饱和度相对较低, 污水中的复杂介质仍能渗透破坏交联网络。EPDM 变形率从 10.78% 升至 11.92%, 仅增长 1.14%, 回弹率从 89.22% 降至 88.08%, 表现出优异的耐酸碱和耐微生物侵蚀能力。SR 最稳定, 由于其饱和的非极性分子链结构, 对污水介质中的极性物质具有天然抗性, 变形率从 7.95% 微增至 8.63%, 仅增长 0.68%, 回弹率仅下降

建筑结构

0.68%。整体变化表明,排水管道污水工况下,工程中应优先选用 SR 或 EPDM,避免 NBR 在含油污环境中的过早失效。

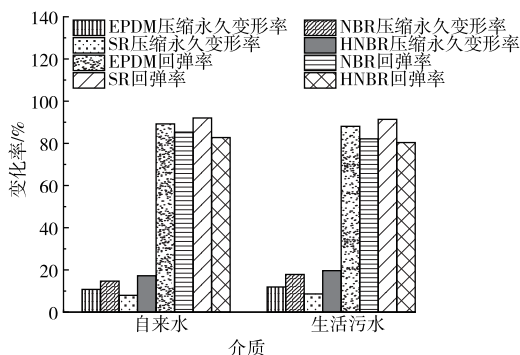


图3 不同介质中材料压缩回弹性能变化曲线

Fig.3 Variation curves of material compression and rebound performance in different media

3.4 多因素耦合下材料压缩回弹性能综合对比

由图4可知,在25%压缩率、70℃生活污水的多因素耦合工况下,四种材料的压缩回弹性能呈现显著差异。由于SR饱和非极性分子链结构,在热、水、油污及微生物的联合侵蚀下仍能保持优异的弹性恢复能力,其压缩永久变形率最低(8.63%),远低于15%的工程限值,回弹率最高(91.37%)。EPDM次之,变形率11.92%、回弹率88.08%,同样满足工程要求,其耐热和耐介质性良好,但分子链中少量不饱和双键在高温污水中仍会发生轻微交联副反应,导致性能略逊于SR。NBR与HNBR的变形率分别高达17.85%和19.64%,均已超标,回弹率为82.15%和80.36%。NBR因耐油性差,在

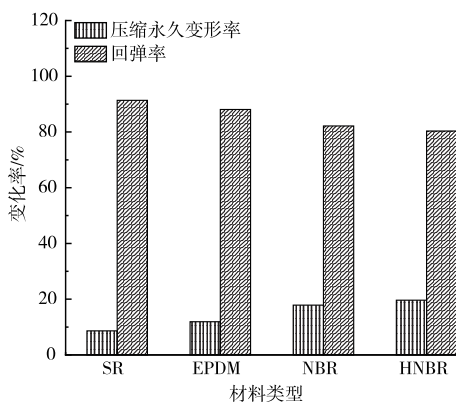


图4 多因素耦合下材料压缩回弹性能变化曲线

Fig.4 Variation curve of material compression and rebound performance under multi-factor coupling

含油污水中发生显著溶胀和分子链滑移;HNBR虽耐油性优于NBR,但较高的分子链饱和度在高温污水环境中仍不足以抵抗介质渗透和热氧化双重作用,性能衰减严重。综合排序为SR>EPDM>HNBR>NBR,再次验证了在给排水管道复杂工况(热、污水)下,应优先选用SR或EPDM,不宜使用NBR和HNBR。

4 耐久性试验结果分析

4.1 热空气老化对材料耐久性能的影响

由图5可知,在25%压缩率、70℃热空气老化条件下,四种材料的拉伸强度保留率与断裂伸长率保留率均随老化时间延长而下降。老化初期(0~72 h),分子链发生氧化交联,SR性能下降最小,拉伸强度保留率为95.68%;NBR下降最快,达87.12%。72~168 h期间,交联密度增加导致材料变脆,NBR拉伸强度保留率降至80.34%,断裂伸长率保留率仅74.58%,而SR仍保持91%以上,表现出优异的抗热氧能力。168~336 h阶段,氧化链断裂,性能加速衰减:NBR拉伸强度保留率从80.34%降至72.58%,降低7.76%,断裂伸长率保留率从74.58%降至65.32%,远低于80%的工程限值;HNBR同样劣化至78.35%;EPDM降至82.16%,临界达标;而SR仍保持86.79%和83.46%,满足长期高温服役要求。整体变化表明,在70℃长期热空气工况下,推荐使用SR和EPDM;NBR与HNBR不宜用于超过168 h的连续高温密封。

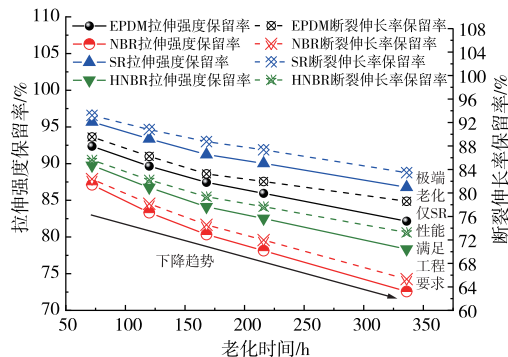


图5 热空气老化下材料耐久性能变化曲线

Fig.5 Curve of material durability changes under hot air aging

4.2 介质浸泡老化对材料耐久性能的影响

由图6可知,在50℃、生活污水介质中浸泡不

建筑结构

同时间后,四种材料的拉伸强度与断裂伸长率保留率呈下降趋势,变形率增量呈上升趋势。浸泡初期(0~72 h),SR性能最优,拉伸强度保留率为97.50%,变形率增量仅0.95%;由于NBR中的丁二烯链段易被污水中的油污和微生物溶胀,其性能最差,拉伸强度保留率为90.80%,变形率增量达2.45%。120~168 h阶段,增塑剂持续析出,NBR拉伸强度保留率降至88.65%,变形率增量达4.58%,而SR拉伸强度保留率仍保持96.78%以上,优势明显。216 h后,溶胀与水解协同加剧:NBR拉伸强度保留率骤降至84.50%,变形率增量达6.85%;HNBR同步劣化至88.50%,EPDM降至92.00%,而SR为95.00%,表现最佳。到336 h极端浸泡时,仅SR满足工程要求(拉伸强度保留率 $\geq 80\%$,变形率增量 $<5\%$),EPDM拉伸强度保留率89.56%,临界达标;而NBR与HNBR均已失效。整体变化表明,给排水长期污水工况下应优先选用SR或EPDM,不宜使用NBR。

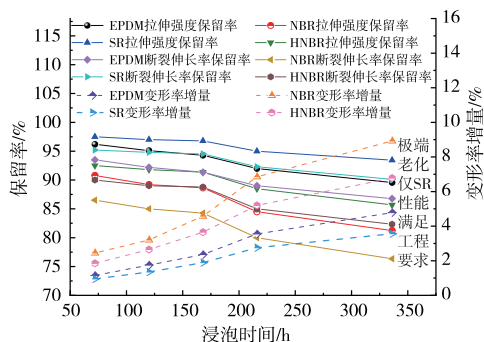


图6 介质浸泡老化下材料耐久性能变化曲线
Fig. 6 Curve of changes in material durability under dielectric soaking aging

4.3 臭氧老化对材料耐久性能的影响

由图7可知,在臭氧浓度50 ppm、40℃条件下,臭氧老化不同时间后,四种材料的拉伸强度与断裂伸长率保留率均呈现下降趋势,且下降速率与分子链不饱和度正相关。暴露24 h时,NBR因主链含大量碳碳双键,已出现微裂纹,拉伸强度保留率达90.12%;而EPDM和SR因饱和链结构,无龟裂且拉伸强度保留率分别达95.68%和97.89%。36~48 h阶段,NBR裂纹扩展为明显龟裂,拉伸强度保留率降至86.72%(较24 h降低3.4%),HNBR虽经氢化但仍存在少量不饱和键,48 h时开始出现微裂纹,拉

伸强度保留率降至90.05%。老化60 h时,NBR性能加速劣化,拉伸强度保留率仅85.22%,断裂伸长率保留率为81.26%,低于85%的工程限值;此时,HNBR微裂纹增多,拉伸强度保留率为88.95%;而EPDM与SR始终无龟裂,72 h时拉伸强度保留率分别达91.24%和94.58%,表现出卓越的抗臭氧能力。整体变化表明,在裸露给排水管道等臭氧老化工况下,应优先选用EPDM或SR,不宜使用NBR;HNBR仅适用于短期或低浓度臭氧环境。

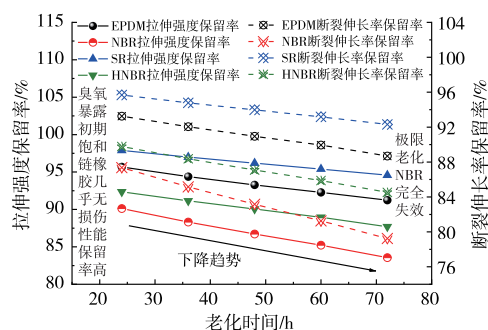


图7 臭氧老化下材料耐久性能变化曲线
Fig. 7 Curve of material durability changes under ozone aging

4.4 多因素耦合老化下材料耐久性能综合对比

由图8可知,在热空气-介质-臭氧三因素耦合老化工况下(70℃热空气、50℃污水浸泡168 h、50 ppm臭氧老化24 h),四种材料的耐久性能差异显著。由于SR材料饱和分子链对热、介质和臭氧的联合抵抗能力较强,其硬度变化率最小(4.25%),拉伸强度保留率达90.36%,断裂伸长率保留率为87.58%,变形率增量仅5.12%,各项指标均远优于工程限值(拉伸性能保留率 $\geq 80\%$,变形率增量 $\leq 8\%$)。EPDM次之,硬度变化率为6.89%,拉伸强度保留率达86.75%,变形率增量为7.35%,仍然满足工程要求;但分子链中少量双键在热-介质-臭氧协同下发生一定程度氧化,性能略逊于SR。HNBR硬度变化率为9.78%,拉伸强度保留率为81.23%,接近80%临界值,变形率增量为9.86%(>8%),表明其虽经氢化但仍存在部分不饱和键,在臭氧与热污水双重攻击下加速劣化。此外,NBR材料高不饱和度导致热氧、溶胀和臭氧龟裂协同失效,其性能表现最差,硬度变化率增至13.56%,拉伸强度保留率仅75.48%,断裂伸长率为71.32%,变形率增量高达12.68%,完全不满足工程要求。综合耐久性能

建筑结构

排序为：SR > EPDM > HNBR > NBR，在给排水复杂老化工况下应优先选用 SR 或 EPDM。

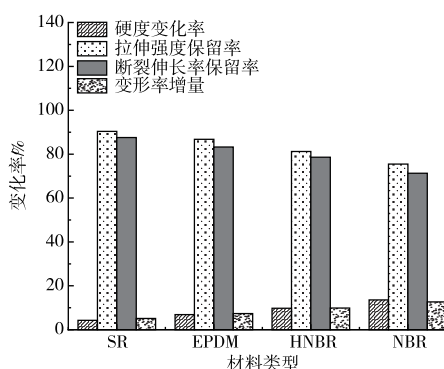


图8 多因素耦合下材料耐久性能变化曲线

Fig. 8 Variation curve of material durability performance under multi-factor coupling

5 结论

以某城区老旧给排水管道改造工程为依托，选取 EPDM、NBR、SR、HNBR 四种密封橡胶材料，开展压缩率、温度、介质及老化时间多因素耦合试验，系统研究其对压缩回弹性能与耐久性能的影响规律，并基于试验结果提出了材料选型建议，得出以下主要结论：

（1）压缩率对材料回弹能力影响显著。低压缩率（15%~20%）下四种材料性能差异较小；压缩率>30%后，NBR 与 HNBR 压缩永久变形率>15%，回弹率<85%，不满足工程要求；SR 在全压缩率范围内保持最优回弹率，EPDM 在 20%~30% 常用区间综合性能最佳。

（2）温度升高加速材料性能劣化。70℃以上时，HNBR 与 NBR 压缩永久变形率>15%，回弹率<85%；90℃时 HNBR 完全失效（回弹率 78.13%）。SR 与 EPDM 在高温下压缩永久变形率<11%、回弹率>89%，适用于给排水高温工况。

（3）污水介质加剧了橡胶分子链侵蚀。相比自来水，污水中 NBR 压缩永久变形率增加 3.16%，回弹率下降 3.16%，劣化最严重；SR 压缩永久变形率仅增 0.68%，回弹率仅降 0.68%，表现出优异的抗介质侵蚀能力，适合排水管道复杂介质环境。

（4）多因素耦合老化下，材料性能差异源于分子链饱和度：SR、EPDM 饱和链抗热、抗介质、抗臭氧能力强；NBR、HNBR 的不饱和键易氧化、溶

胀、龟裂，材料的耐久性差异显著。在热空气-介质-臭氧耦合作用下，SR 拉伸强度保留率为 90.36%、变形率增量为 5.12%，性能最优；EPDM（86.75%、7.35%）同样满足工程要求；NBR（75.48%、12.68%）完全失效。在给排水复杂工况下应优先选用 SR 或 EPDM，HNBR 仅适用于低臭氧、常温、非长期污水工况。

参 考 文 献

- [1] 周荃, 陈锦晶, 李俊叶. 样本特征混淆约束下建筑给排水管道典型缺陷检测 [J]. 中国测试, 2024, 50 (10): 167-174.
- [2] 张宁晓, 张莹. 矿区油气管道滑坡的稳定性分析及危险性评价 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (4): 81-86, 105.
- [3] 刘罗茜, 姜子涛, 聂超飞, 等. 甲醇长输管道腐蚀及密封材料溶胀的研究进展与展望 [J]. 腐蚀与防护, 2025, 46 (7): 83-88, 97.
- [4] 海维深, 李正虎, 和振海, 等. 降弹剂改善湿喷混凝土回弹率试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 19-23, 30.
- [5] 张晓东, 陈文渊, 冀亚峰. 隧道湿喷混凝土回弹率控制措施 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2022, 21 (2): 39-43.
- [6] 张欢, 徐弘达, 许文, 等. 湿热环境苯基阻尼硅橡胶加速老化与寿命预测研究 [J]. 宇航材料工艺, 2024, 54 (2): 130-135.
- [7] 朱建鲁, 张捷, 李玉星, 等. 纯氢/掺氢管道密封圈与密封垫性能研究进展 [J]. 油气储运, 2024, 43 (7): 730-739.
- [8] 魏驰原, 解静静, 史培鑫, 等. 密封用发泡硅橡胶的压缩老化及寿命评估 [J]. 中国塑料, 2023, 37 (12): 54-59.
- [9] 赵张帆, 石湘, 化怡龙. 海底管道维修管卡密封结构的性能分析及测试 [J]. 海洋工程, 2023, 41 (1): 101-109.
- [10] 沈建青, 容七英. 聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青材料抗高温变形研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 38-42.
- [11] 胡晓珍. 建筑密封材料耐霉菌耐久性检测的试验方法研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (5): 114-117.
- [12] 王媛, 周峰, 陈龙, 等. 盾构隧道管片接缝密封垫防水耐久性试验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (1): 129-137.
- [13] 李春漫, 张鑫, 常维纯, 等. 改性纳米纤维素气凝胶/聚乳酸复合材料的制备及耐候性能 [J]. 工程塑料应用, 2025, 53 (8): 182-188.
- [14] 顾鸿文, 李文春, 张萌, 等. 基于时温等效原理预测聚氯乙烯管材使用寿命 [J]. 现代塑料加工应用, 2025, 37 (6): 24-27, 36.
- [15] 徐锋, 李英杰, 杨居一, 等. 高温外载作用下聚乙烯燃气管道老化行为研究 [J]. 中国塑料, 2025, 39 (9): 75-80.