

变电设备密封材料老化试验研究

麻守孝¹, 邓 军², 黎大健³, 周海林⁴, 汪 扬⁴, 陈学云⁴

(1. 青海大学新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 南网超高压公司电力科研院, 广东 广州 510663; 3. 广西电网有限责任公司, 广西 南宁 530023;

4. 大唐青海能源开发有限公司, 青海 西宁 811800)

摘要: 由变电设备密封件性能劣化而导致的事故占比超 60%。掌握变电设备密封件老化机理和寿命预估是预防此类事故发生的关键。开展了变电设备密封材料的老化试验, 选择变电设备典型的五种橡胶密封件材料, 开展温度、温度与机械振动叠加影响因素下的老化试验研究。以硬度、拉伸强度、压缩永久变形率和外观检查为性能评价指标, 来评估橡胶密封材料的老化机理和老化情况。结果表明温度对五种材料的拉伸强度、压缩永久变形性能有较为显著的影响, 而机械振动对五种材料的压缩永久变形性能影响不大。

关键词: 变电设备; 密封材料; 老化; 性能

Study on aging test of sealing materials for substation equipment

MA Shouxiao¹, DENG Jun², LI Dajian³, ZHOU Hailin⁴, WANG Yang⁴, CHEN Xueyun⁴

(1. Key Laboratory of Intelligent Operation of New Energy Power System, Ministry of Education Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Power Research Institute of South Grid Ultra High Voltage Company, Guangzhou 510663, China; 3. Guangxi Power Grid Company Limited, Nanning 530023, China;

4. Datang Qinghai Energy Development Company Limited, Xining 811800, China)

Abstract: More than 60% of accidents are caused by deterioration of seals in substation equipment. Mastering the aging mechanism and life estimation of seals for substation equipment is the key to preventing such accidents. The aging test of substation equipment sealing materials is carried out, five typical rubber sealing materials for substation equipment is Selected, and the aging test research under the superimposed influence factors of temperature, temperature and mechanical vibration is carried out. Hardness, tensile strength, compression permanent deformation rate, and appearance inspection are used as performance evaluation indexes to assess the aging mechanism and aging of rubber sealing materials. The results show that temperature has a more significant effect on the tensile strength and compression permanent deformation properties of the five materials. And mechanical vibration has little effect on the compression permanent deformation performance of the five materials.

Key words: substation equipment; sealing material; aging; performance

0 引言

中的变电设备的安全稳定运行也特别重要。特别随着现代工业的发展, 高压直流输电系统是在青藏高原地区复杂运行环境下, 由于其长期

国家自然科学基金(52167020); 青海省基础研究计划项目(2023-ZJ-933M)

暴露在大温差、紫外线照射强和化学腐蚀等恶劣环境中，密封材料的老化问题成为了变电设备维护和安全运行的关键问题。目前应用最广的橡胶类密封材料虽然具备弹性好、寿命长、耐腐蚀性好、制造工艺简单和成本低等优势，但是在工程实际中，由于橡胶密封材料加工、贮存和使用过程中时常因温度、腐蚀、振动和应力等诸多环境因素及其质量变化带来的影响，使橡胶材料常常会不可避免地发生老化，导致其性能下降甚至直接失效^[1-2]。

橡胶的老化通常是由两方面的因素引起的。一方面是高分子的材料结构，例如分子链结构、化学成分及物理结构，增塑剂、抗氧剂、交联剂及有机溶剂等添加剂作用对材料的影响^[3]；另一方面是由于大气环境的影响，比如氧气、臭氧、气温、相对湿度、机械力、温度、电场以及振动。研究橡胶老化的过程，对于开发防老化技术，提高材料的防老化性能，预测橡胶密封材料的使用寿命，以及新型长寿命、高可靠性橡胶材料等的研发，都有着非常重要的意义^[4]。

目前检测手段主要有红外线热像仪、超声波探测仪和激光扫描仪等，但这些技术只能对密封材料的状态进行测试，并不能对其使用寿命进行评估^[5]。也有文献提出使用计算机仿真软件，对密封材料展开力学、热学和化学等方面的分析，再利用数值计算的方式对密封材料的剩余寿命进行评估，但这种方法只对材料内部运动规律进行了描述^[6]。随后又陆续出现了热空气加速老化、人工气候加速老化、湿热老化、臭氧加速老化、烟雾腐蚀和人工抗霉等试验方法^[7-10]。

尽管国内外都开展了卓有成效的研究，但大部分实验未曾进行过多种类材料在单一因素影响和多因素影响下的对试实验，对试验的性能评估存在一定的局限性。因此，本文通过设计变电设备密封材料的老化试验，选择变电设备典型的五种橡胶密封件材料，开展温度、湿度与机械振动叠加影响因素下的老化试验研究。选取硬度、拉伸强度、压缩永久变形率和外观检查作为性能评价指标，来评估橡胶密封材料的老化机理和老化

情况，研究影响橡胶密封材料老化的主要因素，从而为专业人员进行老化治理提供借鉴，使橡胶材料得到更科学合理的使用，提升其在青藏地区复杂运行环境下的使用性能与寿命，保障电力系统安全稳定运行。

1 试验方法和步骤

1.1 老化试验方案

选择变电设备典型的五种橡胶密封件材料：丁腈橡胶、丙烯酸酯橡胶、氟橡胶、氟硅橡胶和氢化丁腈橡胶，开展温度、湿度与机械振动叠加影响因素下的老化试验研究。

选取硬度、拉伸性能、压缩永久变形率和外观检查（是否龟裂）作为性能评价指标，采用正交试验方法，通过温度与振动叠加作用下加速橡胶密封材料老化，在一定时间内，对其老化前和老化后的性能进行比较。

1.2 橡胶密封材料老化性能测试方法

通过硫化车间制备圆柱形、细长条橡胶试样和哑铃形试样。橡胶的性能主要有：硬度、拉伸性能、抗撕裂性能、压缩永久变形性能、有效弹性和滞后损失性能等。

硬度测试以邵尔硬度衡量，测量仪器选取绍尔LX-A硬度计。用德国Acculab -ALC电子分析天平来测量质量，其准确度为0.001 g。尺寸测试需用准确度为0.01 mm的游标卡尺测量压缩形变率，拉伸性能测试在Instron5965拉伸测试仪上进行，拉伸速度分别为40 mm/min 和80 mm/min，测量应变时采用引伸计，夹在试样的标距位置，测量应变十分准确。

2 橡胶密封材料长时热空气老化试验

2.1 试验条件

(1) 试验工装

由于橡胶密封件在实际使用时长期在受压状态下工作，为了研究橡胶材料在受压状态下的性能变化规律，本项目设计了对橡胶材料实施预载荷的夹具，如图1和图2所示。夹具1的上下钢板

大致尺寸为长240 mm×30 mm×18 mm；夹具2上下钢板大致尺寸为250 mm×250 mm×18 mm。

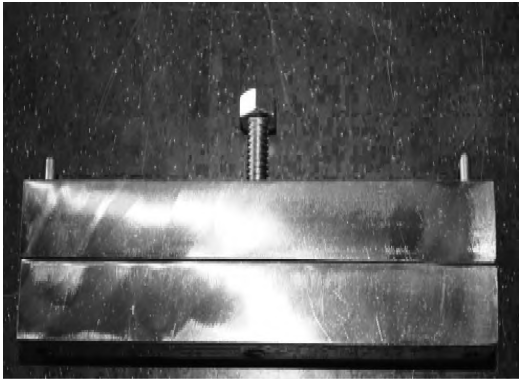


图 1 机械应力预载荷夹具 1
Fig. 1 Mechanical stress preload fixture 1

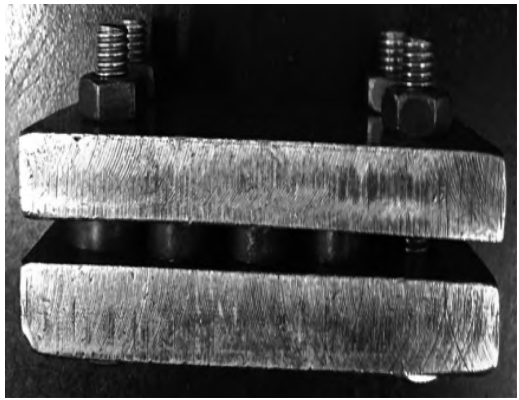


图 2 机械应力预载荷夹具 2
Fig. 2 Mechanical stress preload fixture 2

(2) 试验设备

用老化箱来提供恒温条件，箱内有温度控制装置，控制温度的准确度在±1 K以内。将密封装置放置在老化箱内主要是利用老化箱的温控功能，能提供不同的恒定温度。本试验采用CLM科技有限公司生产的老化箱，老化箱工作室尺寸为Φ450 mm×450 mm×500 mm，温度波动不大于0.5 K，将橡胶试验放入老化箱，设置好试验温度即可进行试验。

2.2 橡胶密封材料热空气老化现象及性能研究

本项目对五种橡胶密封件材料分别在60 ℃及60 ℃叠加机械振动的工况下的压缩永久变形进行了试验分析，测试时间为1天、7天、14天、21天和28天，分别见表1及表2。

表 1 60 ℃ 下五种橡胶密封件材料的压缩
Tab. 1 60 ℃ under the compression of five kinds of rubber seal materials

材料名称	样品编号	压缩前试样的高度 h_0	试样恢复后的高度 h_1				
			1	7	14	21	28
HN7550	1	6.1	6.04	5.93	5.87	5.82	5.78
	2	6.11	6.04	5.94	5.87	5.82	5.78
	3	6.12	6.06	5.94	5.87	5.83	5.79
A0380	1	6.3	6.2	6.06	5.96	5.9	5.85
	2	6.28	6.18	6.04	5.96	5.9	5.83
	3	6.35	6.23	6.08	6	5.94	5.88
F75GLJD	1	6.29	6.25	6.18	6.14	6.12	6.11
	2	6.23	6.2	6.16	6.12	6.1	6.1
	3	6.22	6.19	6.14	6.1	6.08	6.07
FQ70LBYQ	1	6.19	6.16	6.11	6.08	6.07	6.06
	2	6.15	6.12	6.08	6.05	6.04	6.03
	3	6.14	6.11	6.07	6.05	6.03	6.02
N7040	1	6.2	6.07	5.96	5.9	5.84	5.79
	2	6.15	6.03	5.91	5.85	5.8	5.77
	3	6.21	6.07	5.95	5.9	5.83	5.81

表 2 60 ℃ 及振动下五种橡胶密封件材料的压缩
Tab. 2 60 ℃ and vibration under the compression of five kinds of rubber seal materials

材料名称	样品编号	压缩前试样的高度 h_0	试样恢复后的高度 h_1				
			1	7	14	21	28
HN7550	1	6.11	6.04	5.92	5.85	5.8	5.77
	2	6.11	6.04	5.92	5.85	5.8	5.72
	3	6.1	6.04	5.91	5.84	5.8	5.77
A0380	1	6.3	6.18	6.04	5.94	5.88	5.81
	2	6.29	6.17	6.03	5.93	5.87	5.82
	3	6.3	6.18	6.04	5.94	5.88	5.83
F75GLJD	1	6.25	6.2	6.15	6.12	6.1	6.08
	2	6.23	6.18	6.13	6.1	6.08	6.07
	3	6.23	6.19	6.14	6.1	6.08	6.07
FQ70LBYQ	1	6.19	6.14	6.11	6.08	6.07	6.03
	2	6.18	6.14	6.08	6.05	6.04	6.03
	3	6.18	6.14	6.07	6.05	6.03	6.02
N7040	1	6.16	6.03	5.9	5.85	5.79	5.75
	2	6.16	6.02	5.9	5.85	5.79	5.75
	3	6.15	6.02	5.89	5.84	5.79	5.74

2.2.1 硬度变化规律

橡胶材料的硬度是反映其抵抗变形能力的重要指标。本试验对取样后对橡胶试样进行邵氏A硬度测定，每个取样测量点共测量1个试样，每

个试样的测量点为1个。五种橡胶密封件材料在100℃、125℃和150℃温度下热空气老化时材料的硬度随老化时间变化的规律曲线如图3~图7所示。

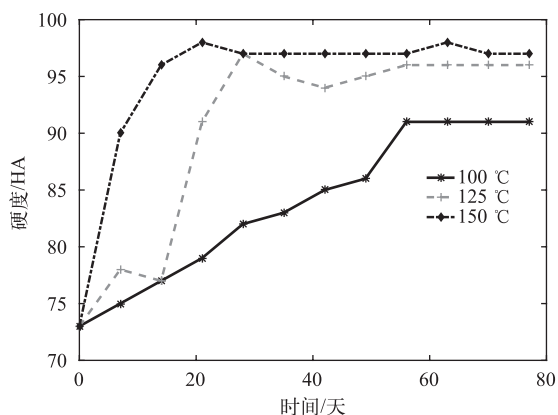


图3 丁腈橡胶老化试验硬度随时间变化规律

Fig. 3 The variation law of hardness over time in the aging test of nitrile rubber

由图3可知,丁腈橡胶N7040在各温度下硬度随老化时间的延长而增大,在老化初期增长得比较快;温度越高,硬度值增长越快,达到稳定硬度时硬度值最大。当达到稳定硬度时:100℃下,在56天后比未老化试样的硬度值增大18个硬度值;125℃下,在28天后比未老化试样的硬度值增大23个硬度值;150℃下,在21天后比未老化试样的硬度值增大24个硬度值。

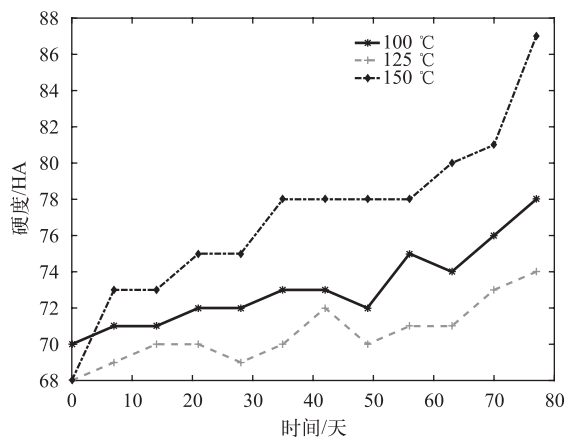


图4 丙烯酸酯橡胶老化试验硬度随时间变化规律

Fig. 4 The variation law of hardness over time in the aging test of acrylic rubber

由图4可知,丙烯酸酯橡胶A0380在各温度

下硬度随老化时间的延长而增大,在老化初期增长得比较慢,随着老化时间的延长增长,速度明显变大;温度越高,硬度值增长越快,最终达到的硬度值更大。硬度在77天内保持增长趋势,在100℃、125℃和150℃温度下,77天后比未老化试样的硬度值分别增大8个、6个和21个硬度值。

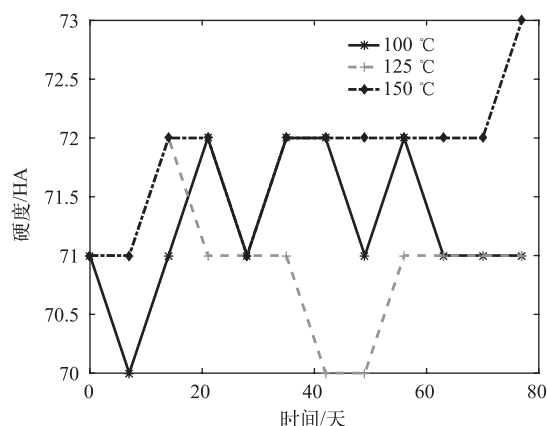


图5 氟橡胶老化试验硬度随时间变化规律

Fig. 5 The variation law of hardness over time in the aging test of fluororubber

由图5可知,氟橡胶F75GL在各温度下硬度随老化时间的延长而基本保持不变,硬度值保持在70~73范围内。

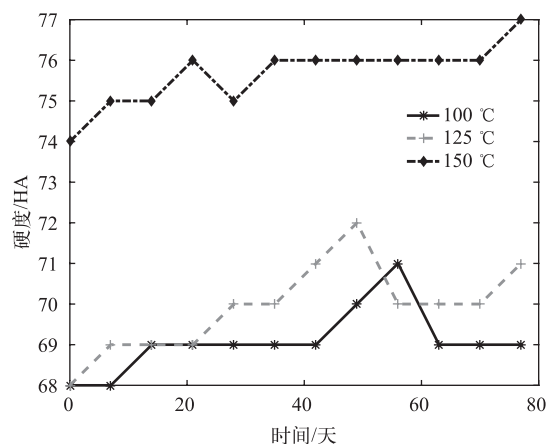


图6 氟硅橡胶老化试验硬度随时间变化规律

Fig. 6 The variation law of hardness over time in the aging test of fluorosilicone rubber

由图6可知,氟硅橡胶FQ70LBYQ在各温度下硬度随老化时间的延长而缓慢增长,老化试验过程中仅增大2~3个硬度值。

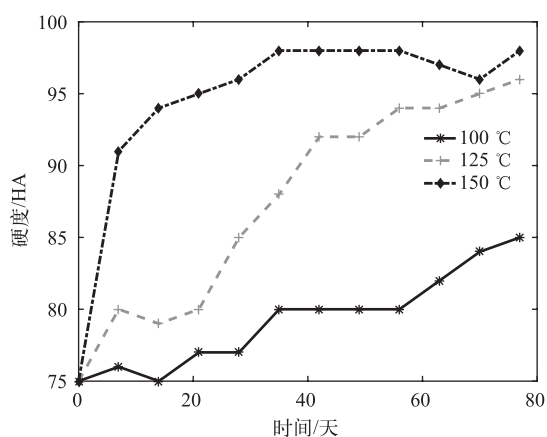


图7 氢化丁腈橡胶老化试验硬度随时间变化规律

Fig. 7 The variation law of hardness over time in the aging test of hydrogenated nitrile rubber

由图7可知, 氢化丁腈橡胶HN7550在各温度下硬度随老化时间的延长增大, 在老化初期增长得比较快; 温度越高, 硬度值增长越快, 最终达到的硬度值更大。硬度在77天内保持增长趋势, 在100 °C、125 °C和150 °C温度下, 77天后比未老化试样的硬度值分别增大10个、21个和23个硬度值。

2.2.2 拉伸强度变化规律

本实验对橡胶试样进行拉伸强度测定, 每个取样测量点共测量3个试样, 取算术平均值作为拉伸强度实际值, 拉伸速率为40 mm/min。五种橡胶密封件材料在100 °C、125 °C和150 °C温度下热空气老化时材料的拉伸强度随老化时间变化的规律曲线如图8~图12所示。

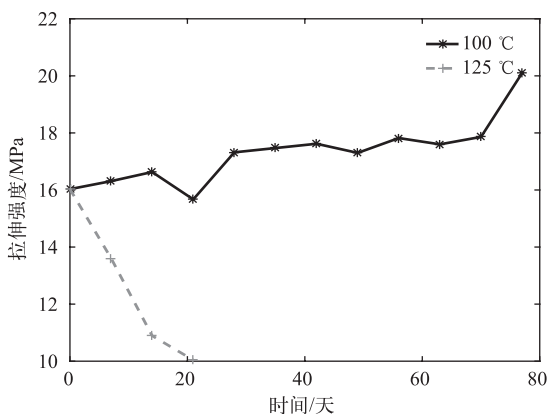


图8 丁腈橡胶老化试验拉伸强度随时间变化规律

Fig. 8 The variation law of tensile strength over time in the aging test of nitrile rubber

由图8可知, 丁腈橡胶N7040在125 °C下21天达到完全老化的程度, 在150 °C下7天即达到完全老化的程度。丁腈橡胶N7040在高温下抗老化能力较差。

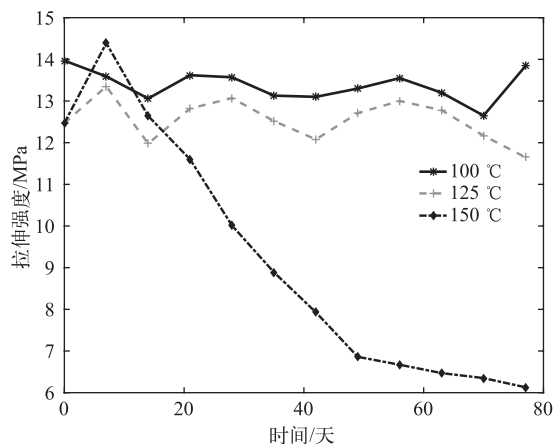


图9 丙烯酸酯橡胶老化试验拉伸强度随时间变化规律

Fig. 9 The variation law of tensile strength over time in the aging test of acrylic rubber

由图9可知, 丙烯酸酯橡胶A0380在三种温度下, 拉伸强度随老化时间的延长逐渐下降, 温度越高, 下降速率越快。在77天内, 100 °C和125 °C温度下拉伸强度保持在一定范围内, 150 °C温度下拉伸强度从12.5 MPa快速下降到6.1 MPa。

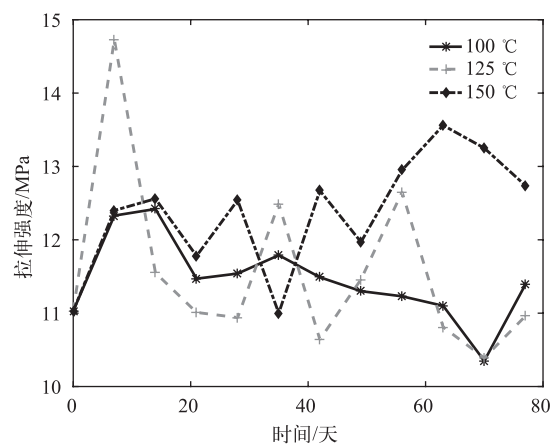


图10 氟橡胶老化试验拉伸强度随时间变化规律

Fig. 10 The variation law of tensile strength over time in the aging test of fluororubber

由图10可知, 氟橡胶F75GL在三种温度下, 拉伸强度随老化时间的延长保持在稳定范围, 基

本没有下降的趋势。

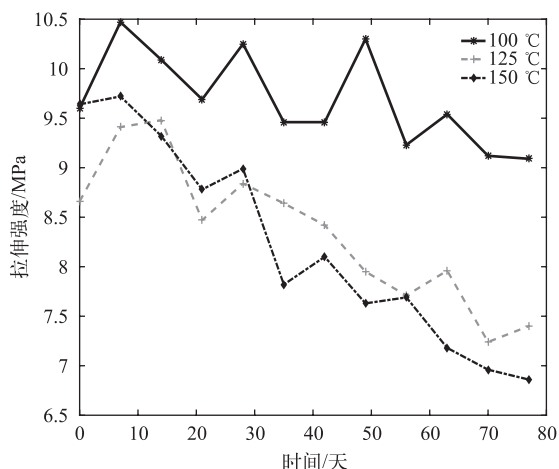


图 11 氟硅橡胶老化试验拉伸强度随时间变化规律

Fig. 11 The variation law of tensile strength over time in the aging test of fluorosilicone rubber

由图11可知, 氟硅橡胶FQ70LBYQ在三种温度下, 拉伸强度随老化时间的延长逐渐下降, 温度越高, 下降速率越快。

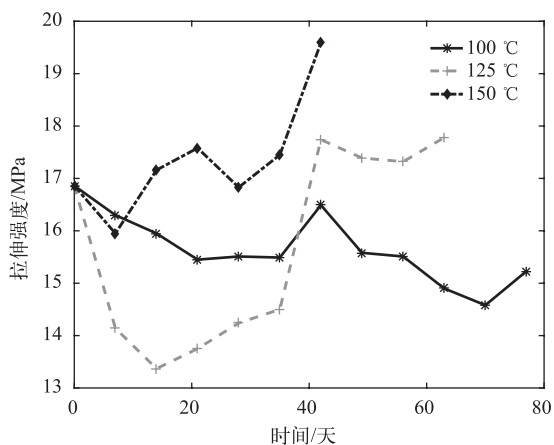


图 12 氢化丁腈橡胶 HN7550 老化试验拉伸强度随时间变化规律

Fig. 12 Changes in tensile strength over time during aging test of hydrogenated nitrile rubber HN7550

由图12可知, 氢化丁腈橡胶HN7550在125 °C下70天老化时间即达到完全老化的程度, 在150 °C下49天即达到完全老化的程度。

2.2.3 压缩永久变形变化规律

本实验取样后对橡胶试样进行压缩永久变形测定, 每个取样测量点共测量3个试样, 取算数平均值作为扯断伸长率的实际值。五种橡胶密封

件材料在100 °C、125 °C和150 °C温度下热空气老化时材料的压缩永久变形随老化时间变化的规律曲线如图13~图17所示。

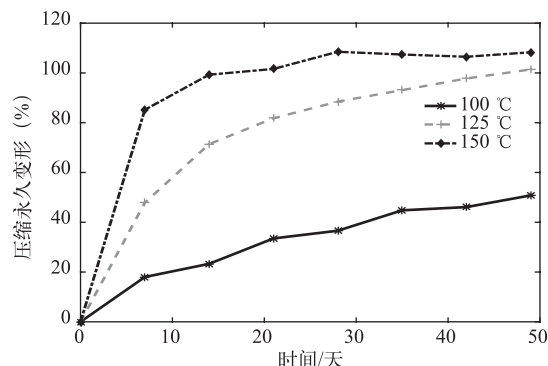


图 13 丁腈橡胶老化试验压缩永久变形随时间变化规律

Fig. 13 The variation law of compression permanent deformation with time in nitrile rubber aging test

由图13可知, 丁腈橡胶N7040在三种温度下, 压缩永久变形随老化时间的延长逐渐增大; 在老化初期, 压缩永久变形增加速率较大, 随老化时间的延长增加速率变缓; 温度越高, 增加速率越快。在100 °C、125 °C和150 °C温度下, 49天后压缩永久变形分别达到50%、101%和108%。

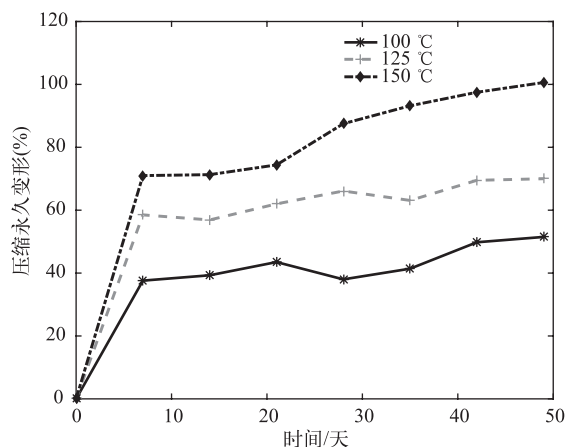


图 14 丙烯酸酯橡胶老化试验压缩永久变形随时间变化规律

Fig. 14 The variation law of compression permanent deformation with time in the aging test of acrylic rubber

由图14可知, 丙烯酸酯橡胶A0380在三种温度下, 压缩永久变形随老化时间的延长逐渐增大; 在老化初期时间, 压缩永久变形增加速率较大, 随老化时间的延长增加速率变缓; 温度越

高,增加速率越快。在100℃、125℃和150℃温度下,49天后压缩永久变形分别达到51.5%、70%和100.6%。

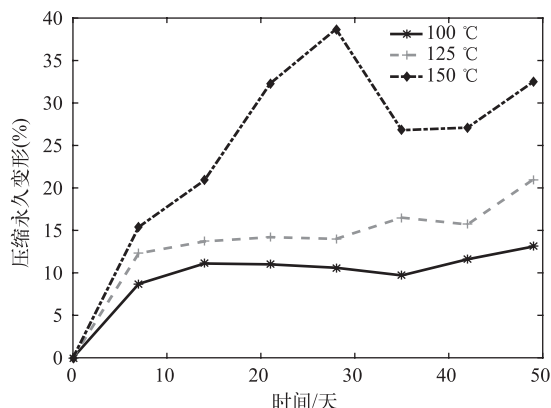


图 15 氟橡胶老化试验压缩永久变形随时间变化规律

Fig. 15 The variation law of compression permanent deformation with time in fluororubber aging test

由图15可知,氟橡胶F75GL在三种温度下,压缩永久变形随老化时间的延长逐渐增大;温度越高,增加速率越快。在100℃、125℃和150℃温度下,49天后压缩永久变形分别达到13.1%、21%和32.5%。

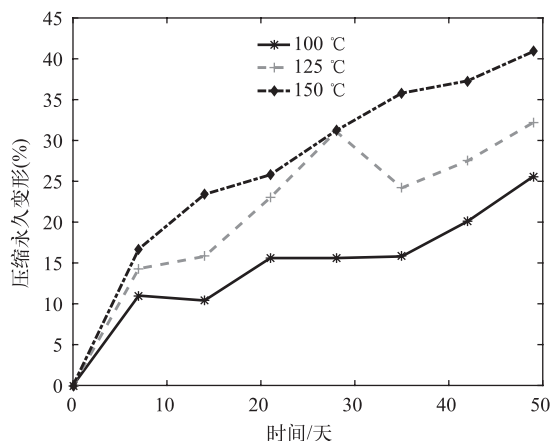


图 16 氟硅橡胶老化试验压缩永久变形随时间变化规律

Fig. 16 The variation law of compression permanent deformation with time in the aging test of fluorosilicone rubber

由图16可知,氟硅橡胶FQ70LBYQ在三种温度下,压缩永久变形随老化时间的延长逐渐增大;温度越高,增加速率越快。在100℃、125℃和150℃温度下,49天后压缩永久变形分别达到25.6%、32.2%和40.9%。

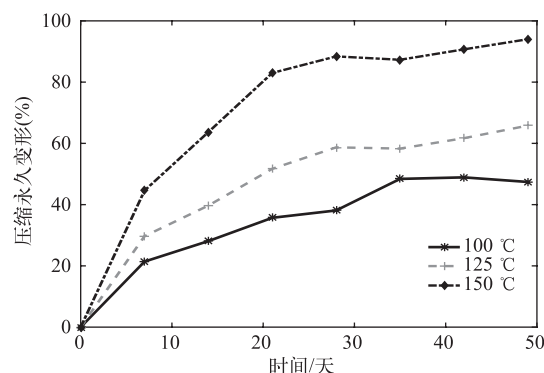


图 17 氢化丁腈橡胶老化试验压缩永久变形随时间变化规律

Fig. 17 The variation law of compression permanent deformation with time in the aging test of hydrogenated nitrile rubber

由图17可知,氢化丁腈橡胶HN7550在三种温度下,压缩永久变形随老化时间的延长逐渐增大;温度越高,增加速率越快。在100℃、125℃和150℃温度下,49天后压缩永久变形分别达到47.4%、65.8%和94%。

3 橡胶材料在热、机械振动条件下的性能对比试验

3.1 试验条件

(1) 试验样品及工装

丁腈橡胶、聚丙烯酸酯、氟橡胶、氟硅橡胶和三元乙丙橡胶试样各12个,每组试验选取3个平行试样,规格为 $\phi 13\text{ mm} \times 6.3\text{ mm}$ 。

(2) 试验设备

本试验项目试验设备有橡胶厚度计、老化试验箱和橡胶疲劳龟裂试验机。

(3) 试验测试项目

本项目选择压缩永久变形作为试验项目。压缩永久变形计算公式为

$$C\% = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, h_0 为试验前高度,单位为mm; h_1 为限制器高度,单位为mm; h_2 为试验后高度,单位为mm。

(4) 试验温度

对不同胶种橡胶密封材料,根据其耐热能力对高温试验温度做适当调整。

试验温度:丁腈橡胶常温90℃;聚丙烯酸

酯常温90℃；氟橡胶常温160℃；氟硅橡胶常温140℃；三元乙丙橡胶常温120℃。

(5) 压缩率

压缩率为25%。

(6) 压缩永久变形试验步骤

1) 选取3个平行试样, 测量试样中心部位的高度 h_0 。

2) 将试样放入所需压缩率的压缩永久变形试验工装中, 拧紧螺丝, 将装好试样的工装放置于预设的试验环境中开始计时。

3) 试验结束后, 对于常温试验, 应立即松开紧固件, 把试样放置于木板上, 在标准环境温度下, 自由状态下放置 (30 ± 3) min, 然后测量试样恢复后的高度 h_2 ; 对于高温试验, 应让夹具在室温下冷却30 min后松开紧固件, 把试样放置于木板上, 在标准环境温度下, 自由状态下放置 (30 ± 3) min, 然后测量试样恢复后的高度 h_2 。

3.2 试验结果

各胶料常温、常温振动试验、高温和高温振动试验压缩永久变形试验数据对比如图18~图22所示。

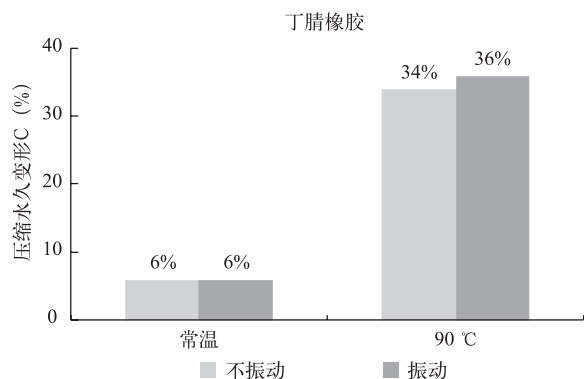


图18 丁腈橡胶常温、常温振动试验、高温、高温振动试验压缩永久变形试验数据对比

Fig. 18 Comparison of compression permanent deformation test data for nitrile rubber at room temperature, room temperature vibration test, high temperature and high temperature vibration test

由图18可知, 丁腈橡胶在常温条件下和常温振动条件下的压缩永久变形其中值相等, 在高温条件下的压缩永久变形其中值比高温振动条件下

低2%, 相差不大。但是在高温条件和高温振动条件下的压缩永久变形其中值比常温条件和常温振动条件下分别高28%和30%, 相差较大。

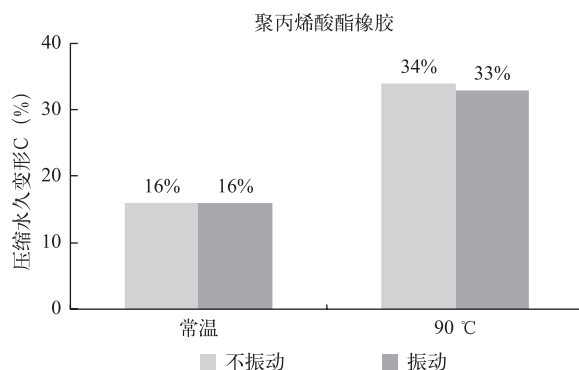


图19 聚丙烯酸酯橡胶常温、常温振动试验、高温、高温振动试验压缩永久变形试验数据对比

Fig. 19 Comparison of compression permanent deformation test data for polyacrylate rubber at room temperature, room temperature vibration test, high temperature, and high temperature vibration test

由图19可知, 聚丙烯酸酯橡胶在常温条件下和常温振动条件下的压缩永久变形其中值相等, 在高温条件下的压缩永久变形其中值比高温振动条件下高1%, 相差不大。但是在高温条件和高温振动条件下的压缩永久变形其中值比常温条件和常温振动条件下分别高18%和17%, 相差较大。

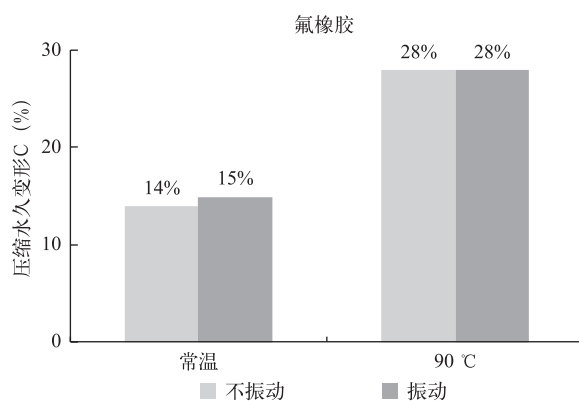


图20 氟橡胶常温、常温振动试验、高温、高温振动试验压缩永久变形试验数据对比

Fig. 20 Comparison of compression permanent deformation test data for fluororubber at room temperature, room temperature vibration test, high temperature, and high temperature vibration test

由图20可知，氟橡胶在常温条件下和常温振动条件下的压缩永久变形其中值相差不大，在高温条件下的压缩永久变形其中值与高温振动条件下相等。但是在高温条件和高温振动条件下的压缩永久变形其中值比常温条件和常温振动条件下分别高14%和13%，相差较大。

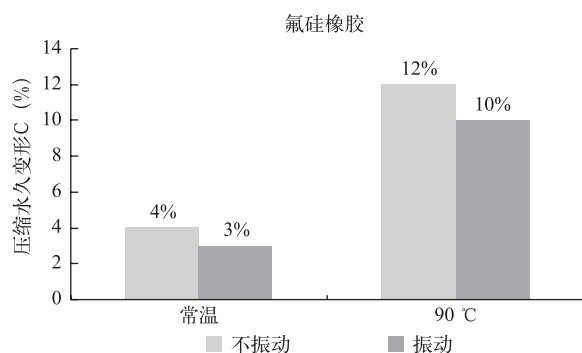


图 21 氟硅橡胶常温、常温振动试验、高温、高温振动试验压缩永久变形试验数据对比

Fig. 21 Comparison of compression permanent deformation test data for fluorosilicone rubber at room temperature, room temperature vibration test, high temperature, and high temperature vibration test

由图21可知，氟硅橡胶在常温条件下和常温振动条件下的压缩永久变形其中值相差不大，在高温条件下的压缩永久变形其中值与高温振动条件下也相差不大。但是在高温条件和高温振动条件下的压缩永久变形其中值比常温条件和常温振动条件下分别高8%和7%，相差较大。

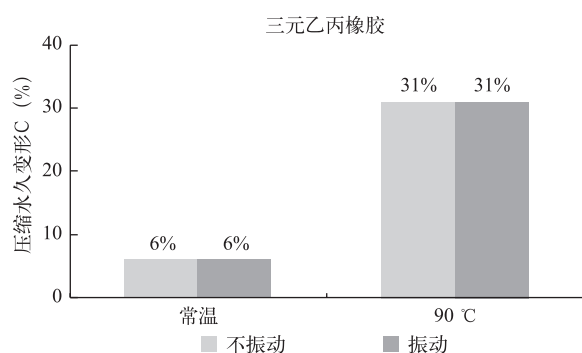


图 22 三元乙丙橡胶常温、常温振动试验、高温、高温振动试验压缩永久变形试验数据对比

Fig. 22 Comparison of compression permanent deformation test data for EPDM rubber at room temperature, room temperature vibration test, high temperature, and high temperature vibration test

由图22可知，三元乙丙橡胶在常温条件下和常温振动条件下的压缩永久变形其中值相等，在高温条件下的压缩永久变形其中值与高温振动条件下也相等。但是在高温条件和高温振动条件下的压缩永久变形其中值比常温条件和常温振动条件下分别高25%和25%，相差较大。

4 结束语

本文选择变电设备典型的五种橡胶密封件材料为对象，设计进行温度、温度与机械振动叠加影响因素下的橡胶密封件材料老化试验研究。选取硬度、拉伸强度、压缩永久变形率和外观检查等作为性能评价指标，评估橡胶密封材料的老化机理和老化情况，研究影响橡胶密封材料老化的主要因素。从实验结果显示：

- 1) 温度对五种材料的拉伸强度、压缩永久变形性能有较为显著的影响。随老化时间的延长，温度越高，拉伸强度越弱，压缩永久变形越明显。
- 2) 机械振动对五种材料的压缩永久变形性能没有影响。

参考文献

- [1] 孔令泽, 董可海, 陈思彤, 等. 橡胶介质老化研究进展[J]. 弹性体, 2019, 29(3): 73-77.
- [2] 高维, 杜钢, 范伟男, 等. 变压器密封用丁腈橡胶湿热老化特性及机理[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 608-617.
- [3] 汪俊. 橡胶密封材料热氧老化及寿命评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [4] 陈璐. 乙丙橡胶在机械应力下热老化特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [5] 袁兆奎, 吴天昊, 李楠, 等. 制动橡胶密封材料的性能优化及寿命预测[J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(15): 42-46.
- [6] 阙刚, 彭旭东, 沈明学, 等. 丁腈橡胶热空气老化力学性能分析及贮存寿命预测[J]. 润滑与密封, 2018, 43(2): 18-25.
- [7] 刘高君. 橡胶阻尼材料的老化行为与寿命预测研

- 究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
- [8] 彭启迪. 考虑松弛修正的氢化丁腈橡胶(HNBR)加速老化实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [9] 林安阁. 湿热老化条件下气缸动态摩擦特性试验与仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [10] 郭金柱. 橡胶O形圈密封结构老化状态的响应特性研究[J]. 西安: 西安工业大学, 2023.

作者简介

麻守孝(1985—), 男, 博士, 副教授/高工, 主要从事新型电力系统装备安全与智能化方向的研究工作。

邓军(1985—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事电网超高压试验研究工作。

陈学云(1985—), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究领域为新能源设备故障诊断、测试、安装调试。

(收稿日期: 2023-08-29)