第 49 卷 第 2 期：484-492 高电压技术 Vol.49, No.2: 484-492
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221422

极端运行环境温度下模拟机车电缆与附件绝缘界面压力的松弛特性

王 霞，叶洵知，吴 超，苗 哲，吴 锴
（西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710115）

摘 要：近年来，高速机车用柔性电缆终端在极端环境温度下事故频发，严重影响了铁路运输安全性。为此，根据实际机车运行的极端运行环境温度(–40~90 ℃)，通过对比与分析电缆附件用硅橡胶材料在高温、低温及高低温循环过程中的弹性模量变化及其扩张态下的应力松弛特性，探讨了极端运行环境温度对电缆与附件绝缘界面压力的影响规律。研究结果表明：扩张态的硅橡胶材料在高温 90 ℃下的面压松弛率近 30%，在低温–40 ℃下的面压松弛率约 10%~20%，而在高低温循环(–40~90 ℃) 120 h 后，面压松弛率高达 50%。因此，极端环境温度下电缆与附件绝缘界面压力的大幅度下降或将对机车电缆终端的绝缘性能产生显著影响。

关键词：柔性电缆终端；硅橡胶；极端运行环境温度；界面压力；应力松弛

Relaxation Characteristics of Simulated Interfacial Pressure Between Locomotive Cable and Accessory Under Extreme Ambient Operating Temperatures

WANG Xia, YE Xunzhi, WU Chao, MIAO Zhe, WU Kai
(State Key Laboratory of Electric Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710115, China)

Abstract: In recent years, accidents in flexible cable terminals for high-speed locomotives have occurred frequently under extreme ambient operating temperatures, which has seriously impaired the safety of railway transportation. According to the extreme temperature (–40~90 ℃) of actual locomotive operation, the influence of extreme temperature on the interface pressure of cable and accessory insulation is discussed by comparing and analyzing the elastic modulus change of silicone rubber materials used in cable accessories in the process of high temperature, low temperature, and high-low temperature cycle and the stress relaxation characteristics under the expansion state. The results show that the interface pressure relaxation rate of the expanded silicone rubber material is nearly 30% at a high temperature of 90 ℃, is 10%~20% at a low temperature of –40 ℃ , and is as high as 50% after 120 h of high-low temperature cycles (–40~90 ℃). Therefore, a significant decrease in the interface pressure of cable and accessory insulation under extreme temperatures may have a significant impact on the insulation performance of locomotive cable terminals.

Key words: flexible cable terminal; silicone rubber; extreme operating temperature; interface pressure; stress relaxation

0 引言

随着我国高速铁路的飞快发展，不仅对电气化铁路的供电系统提出了更加严苛的要求，也在考验车载电气设备的安全可靠性。机车组车顶连接受电弓的高压电缆及其终端，需要长期承受高速和长距离运行中产生的高风阻、频繁的震动冲击、高低温、气压变化等复杂的运行环境[1]，对电缆终端的可靠性造成了严重的威胁[2]。近期研究表明，机车柔性电缆终端在高寒环境下发生故障的事故更为频繁，严重影响了机车的正常运用和铁路安全运输的可靠性。

国内外针对高寒环境对车载柔性电缆终端影响的研究普遍发现：低温环境下橡胶材料物理性质的差异(包括弹性模量、自由空间体积等)很容易导致绝缘界面结构不匹配，进而引发局部放电，存在一定安全隐患[3-7]。而对于极端运行环境温度对橡胶材料性能的影响，目前研究相对匮乏，主要集中于对橡胶材料进行硬度测量、物理机械性能测试、压缩耐寒系数测定、动态热机械分析测试以及对材料进行加速老化试验等[8-12]。上述研究或聚焦于极端运行环境温度对柔性电缆终端结构的影响，或着重

基金资助项目：国家自然科学基金(52077171)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077171).

于极端环境温度对橡胶材料静态机械性能的影响，而极端运行环境温度对电缆与附件橡胶绝缘界面压力的影响，特别是机车高速运行过程的大温差变化，对柔性电缆终端橡胶绝缘应力松弛特性的影响导致电缆终端界面压力的变化，尚未见报道。

柔性电缆终端在实际的使用过程中始终处于扩张状态，即有一定的形变量，因此电缆终端的橡胶绝缘会发生应力松弛现象[13]。本文根据实际机车运行环境(–40~90 ℃)，通过对比与分析电缆附件用硅橡胶材料在高温、低温及高低温循环过程中的弹性模量变化及其扩张态下的应力松弛特性，探讨了极端运行环境温度对电缆与附件绝缘界面压力的影响规律。研究结果对我国高速机车用柔性电缆终端的材料选型、故障机理分析及其长期运行可靠性评估具有一定的工程参考价值，并能提供一定的理论依据。

1　电缆终端用橡胶材料的高低温特性

1.1　试样制备

采用广州高力电缆附件公司提供的甲基乙烯基硅橡胶试片，此种硅橡胶直接用于机车电缆及附件制造中。试样尺寸为 10 cm×10 cm, 厚度分别为 1 mm 和 5 mm，试验前在 180 ℃高温烘箱中静置 4 h 完成二次硫化以达到实际使用性能。

1.2　高温下硅橡胶材料的力学拉伸特性

根据国标 GB13022—1991，将实验所用 1 mm 厚硅橡胶试片裁成标准哑铃型，使用 CMT4503–5 kN 电子万能试验机(CMT–4503，MESTER, 瑞士)分别在 25 ℃(室温)和 50、70、90 ℃下进行单轴拉伸试验，并计算其线性范围的弹性模量值。拉伸速率为 200 mm/min。

1.3　低温下硅橡胶材料的动态力学特性

根据国标 GB/T 9871—2008，将试验所用的 1 mm 厚硅橡胶试片剪裁成两边平行的小长条状，使用动态热机械分析仪(DMA242E，NETZSCH, 上海)测试硅橡胶材料的玻璃化转变温度等信息，动态力频率为 1 Hz，试验温度范围为–110~20 ℃。

1.4　低温下硅橡胶材料的力学松弛特性

利用动态热机械分析仪的松弛模式进行测试，将软件设置为两次不同温度下的松弛模式测试，即一个温度下测试结束后紧接着变温进行下一个温度下的测试。完成软件参数设置后设定固定的形变量(电缆附件安装后的内绝缘扩径率一般在 120%~150%，故本文的形变量选为 120%和 150%两组)，首先测量在室温 25 ℃恒温条件下，维持该形变量所需的静态力随时间的变化，在此温度下恒温 1 h。该温度下试验完成后，并不对试样进行调整，快速将试验温度骤降到某一固定温度(5 次试验所选的温度分别为 25、0、–20、–40、–60 ℃)，继续测试其松弛性能，恒温时间仍为 1 h。

测试结束后，计算不同温度下硅橡胶材料的应力剩余率，绘制剩余率与时间的关系图。其中应力剩余率计算方法为

$$R=\frac{\sigma_0-\sigma_t}{\sigma_0} \tag{1}$$

式中：R 为应力剩余率；σ_0 为试验初始时刻的应力, MPa；σ_t 为在试验 t 时刻时测得的应力，MPa。

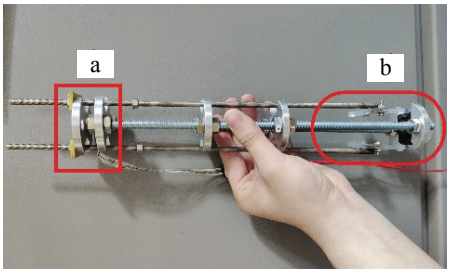
2　模拟实际电缆附件的硅橡胶在扩张态下的面压松弛特性

结合机车电缆终端的运行环境特点，利用外置压力传感器，本文设计了一种模拟测量实际电缆附件橡胶绝缘在扩张状态下界面压力测量的机械装置，实测了扩张态的硅橡胶绝缘在极端环境温度(–60~90℃)下的面压变化规律。

2.1　实验方法

本文使用特制的外置压力传感器模拟测量电缆附件界面压力，机械装置如图 1 所示，该装置很好地克服了传统内置传感器存在的温漂问题[14]，有利于实时测量电缆附件的面压与温度的变化规律。试样为长条形 5 mm 厚硅橡胶，宽度约为 10 mm。温度调控为可程式恒温恒湿试验箱，压力测量选用 MFF 薄膜压力测试系统。

利用图 1 这种机械装置，首先将硅橡胶长条状试样两边用夹具夹住，贴合在模拟电缆的半圆柱型合金柱上，调节试样拉伸状态改变其扩张率，完成试样在模拟测量面压装置上的安装(图 1 中 b 端)。



(a) 安置压阻薄膜传感器部分　(b) 模拟界面部分

图 1　模拟测量面压装置实物图

Fig.1　Diagram of the simulated interface pressure test device

然后将标定后的压阻薄膜传感器内置到图 1 装置的 a 端。最后将整个机械装置安置到烘箱上(模拟电缆与附件界面的一部分置于烘箱内，内置压阻薄膜传感器的一侧保持在烘箱外，如图 2 所示)。本文所用可程式恒温恒湿试验箱的温度可调控范围为–40~100 ℃，最大升/降温速率为 2 ℃/min。

测量结束后，以类似于应力剩余率 R 的表征方式来衡量面压松弛特性，即某时刻时面压的量与初始时刻面压的比值，称其为面压剩余率 R’。

2.2 高/低温下扩张态硅橡胶材料的面压松弛特性测量

测量步骤基本同前文 DMA 高低温测量。首先让扩张态的硅橡胶试样在室温下恒温保持 1 h，之后对烘箱进行升温或降温。高温测试温度分别为 25 ℃(室温)和 50、70 和 90 ℃，低温测试温度分别为 0、–20 及–40 ℃，在各温度下恒温保持 1 h。

2.3 高低温循环下扩张态硅橡胶材料的面压松弛特性测量

为使试验结果更符合实际机车电缆终端在运行环境中温度的骤变性，本文进行了高低温循环条件下扩张态橡胶界面的面压测量。试验所用装置及试样安装方法同 2.1 节，硅橡胶材料扩张率分别选为 125%和 150%两组。

试样安装完后，首先将试样置于烘箱内在室温下恒温保持 1 h，待其应力基本达到稳定值，消除室温下橡胶材料的应力松弛对测量结果的影响。

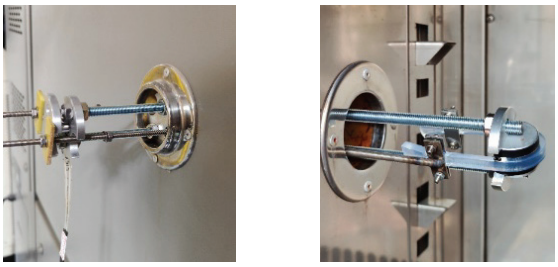
在橡胶材料的高低温循环试验环节，首先以 2 ℃/min 的变温速率将温度降低至–40 ℃，保持 2 h 后以同样的变温速率升温至 90 ℃，并同样保持 2 h 后再降至–40 ℃，再重复下一个循环。测试过程持续 120 h。

3 试验结果与分析

3.1 高/低温下的硅橡胶材料弹性模量的变化规律

图 3 所示为硅橡胶试样在高温范围(25~90 ℃)的力学拉伸特性。表 1 为由图 3 中线性拉伸区计算得到的弹性模量值 E'，代表了材料存储弹性形变能量的能力。由测量结果可知，硅橡胶材料的弹性模量随温度升高而略有降低，宏观上表现为温度升高，材料软化，微观上则对应于无定形橡胶材料分子链解缠结、柔顺性增强的结果。

由于实验室内万能实验机没有配置低温试验腔，故无法测量低温下橡胶材料的力学性能。因此，



(a) 烘箱外的部分 (b) 烘箱内的部分

图 2 模拟测量面压装置在烘箱上的安置图

Fig.2 Diagram of the placed simulated interface pressure test device

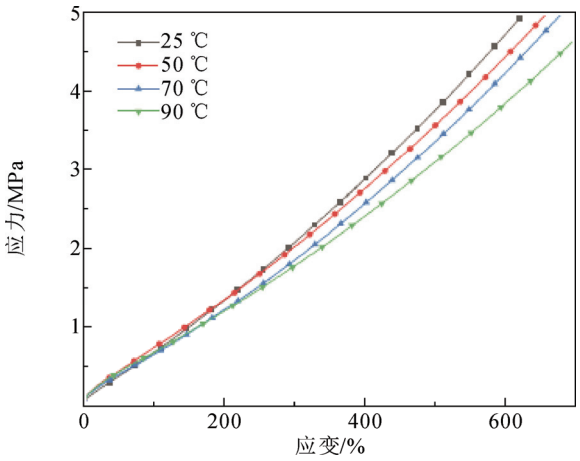


图 3 高温下硅橡胶力学拉伸特性

Fig.3 Mechanical tensile properties of silicone rubber at high temperatures

表 1 高温下硅橡胶的弹性模量

Table 1 The elastic modulus of silicone rubber at high temperatures

温度/℃	25	50	70	90
E'/MPa	0.587	0.548	0.520	0.499

本文采用 DMA 方法研究了硅橡胶材料的低温动态力学特性，测量结果如图 4 所示，其中 E'是弹性模量，E''为损耗模量，指在一个变化周期内材料消耗能量的能力，体现了材料的粘性特质。由图 4 可见，硅橡胶材料的玻璃化转变温度低于–40 ℃，这表明硅橡胶材料在高于–40 ℃的环境温度下不会发生明显的玻璃化转变。同时由图 4(b)和表 2 可见，从 0~–40 ℃范围内，硅橡胶的等效弹性模量 E''略有增加，而当降低到–60 ℃时，硅橡胶的弹性模量增加到 30 MPa。这表明在温度低于–40 ℃后发生了明显的玻璃化转变。

值得注意的是，由于测量方法不同，力学拉伸和 DMA 所测的室温下弹性模量值并没有可对比

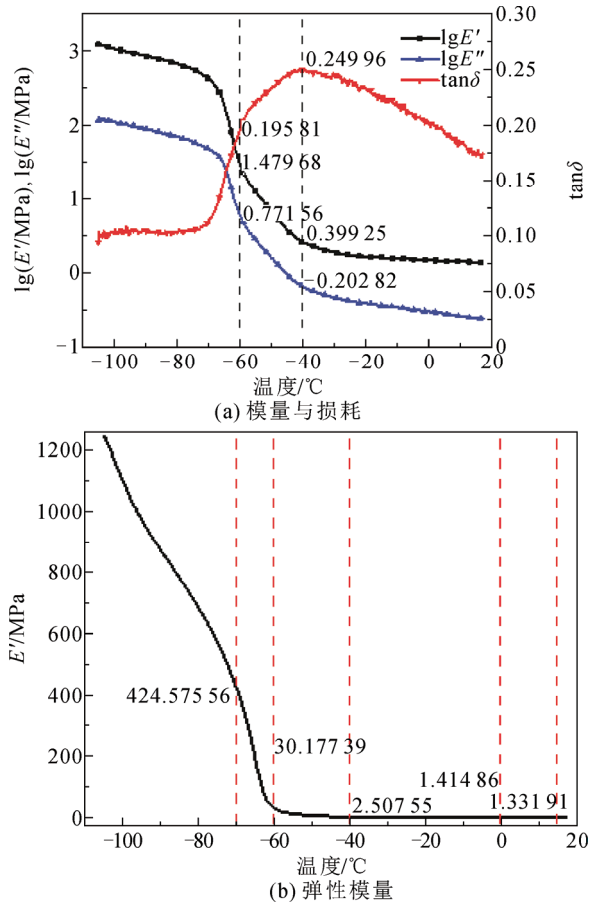


图 4　硅橡胶材料低温下的 DMA 测试曲线

Fig.4　DMA curve of silicone rubber at low temperatures

性。实际使用中硅橡胶材料的弹性模量测量一般以力学拉伸试验为准。本文中 DMA 测量结果仅作为低温下硅橡胶弹性模量变化趋势的参考。

3.2　低温下硅橡胶材料的应力松弛特性(DMA 测量)

图 5 所示为由室温降到不同低温下硅橡胶材料在 150%扩张率下的应力松弛特性。由图 5 中应力松弛曲线可见，扩张态的硅橡胶材料在低温下存在应力松弛现象。温度越低，应力剩余率 R 越小。

温度降低会引起硅橡胶材料的冷收缩，理论上会使得拉伸应力增大，但测试结果显示温度降低时，材料的应力发生了下降。这应当是构象熵、低温下橡胶玻璃化转变和应变诱导结晶降低应力以及冷收缩增加应力相互竞争的结果。推测应力显著减小的主要原因应是橡胶材料处于扩张状态时，温度场和拉伸场共同作用下的玻璃化现象以及应变诱导结晶效应[15-17]，即应力发生“冻结”。至于–60 ℃的恒温环境下，由于已超过材料常态下的玻璃化转变温度，事实上已非常接近玻璃态，但大幅度增加的弹性模量(见表 2)贡献了拉伸应力，使得后期应力剩余率略有上升。

表 2　硅橡胶材料低温下的弹性模量(DMA 测量)

Table 2　Storage modulus of silicone rubber at low temperatures (by DMA)

温度/℃	15	0	–40	–60
E'/MPa	1.332	1.415	2.508	30.177

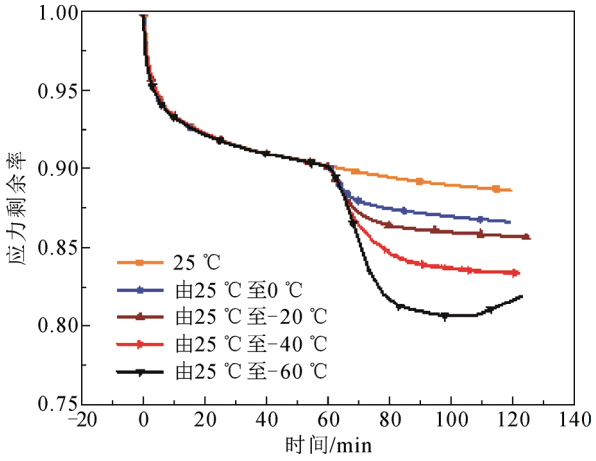


图 5　低温下 150%扩张状态硅橡胶应力松弛曲线

Fig.5　Stress relaxation curve of silicone rubber in 150% expanded state at low temperatures

表 3　低温下 150%扩张状态硅橡胶应力剩余率

Table 3　Stress residual rate of silicone rubber in 150% expanded state at low temperatures

时间/min	R				
	恒定 25 ℃	25~0 ℃	25—20 ℃	25—40 ℃	25—60 ℃
60	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902
80	0.895	0.874	0.864	0.847	0.818
100	0.890	0.870	0.860	0.837	0.806
120	0.886	0.866	0.857	0.834	0.816

图 6 所示为不同扩张率下的硅橡胶材料的应力松弛特性。由图 6 可见，硅橡胶材料的扩张率越大，应力松弛程度越大。这主要是因为扩张率越大，分子链的取向程度越大，应力衰减也就越多。且在 150%扩张率下，应力降低的程度更大，结合表 4 数据来看，低温下 150%扩张率下应力降低的程度要比 120%扩张率下大的多。

上述现象出现是因为 120%扩张率下温度降低引起的玻璃化和应变诱导结晶程度比 150%扩张率下更小。也就是说，硅橡胶材料的扩张程度越大，其分子链的取向程度更高，温度降低时，更容易发生玻璃化转变和结晶使得分子链沿拉力方向伸长。

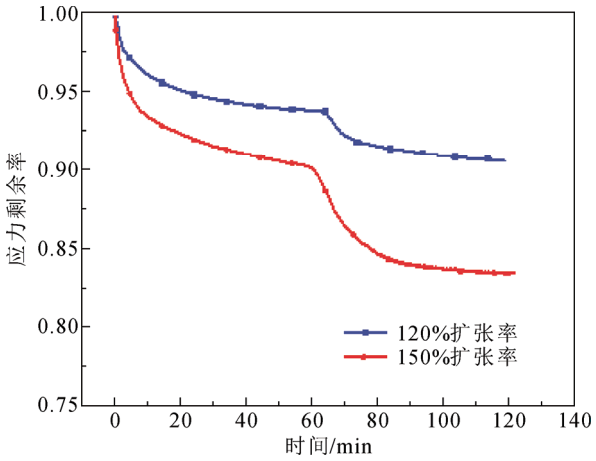


图 6 不同扩张率下硅橡胶应力松弛曲线(室温降到–40 ℃)

Fig.6 Stress relaxation curve of silicone rubber at different expansion rates (room temperature to –40 °C)

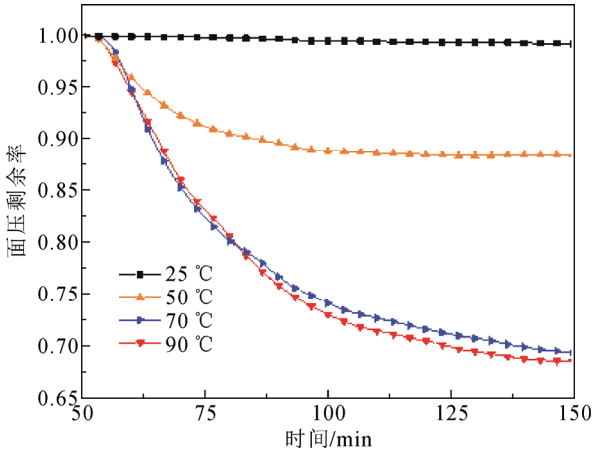


图 7 高温下 150%扩张状态硅橡胶面压松弛曲线

Fig.7 Interface pressure relaxation curve of silicone rubber in 150% expanded state at high temperature

表 4 不同扩张率下硅橡胶的应力剩余率(室温降到–40 ℃)

Table 4 Stress residual rate of silicone rubber at different expansion rates (room temperature to –40 ℃)

时间/ min	*R*	
	120%扩张率	150%扩张率
60	0.939	0.902
120	0.906	0.834

表 5 高温下 150%扩张状态硅橡胶面压剩余率

Table 5 Interface pressure residual rate of silicone rubber in 150% expanded state at high temperature

时间/ min	*R′*			
	恒定 25 ℃	25~50 ℃	25~70 ℃	25~90 ℃
50	1	1	1	1
120	0.994	0.884	0.715	0.703

3.3 模拟实际扩张状态硅橡胶材料在高、低温下的面压变化

3.3.1 高温下面压变化测试结果

图 7 和表 5 所示为高温下 150%扩张态硅橡胶材料的面压测试结果，可以发现在 25 ℃恒温过程中，松弛程度略有上升，但基本上变化不大，结合表 5 中数据可知，从 50 min 至 120 min，面压剩余率 *R′*为 0.994，这表明虽然有一定的应力松弛导致的面压下降，但基本上可以认为，整个恒温过程中界面压力基本不变。当温度由室温开始升高后，界面压力的松弛程度明显加大。当温度由室温升高至 50 ℃时，硅橡胶分子链出现一定程度的解缠结，出现分子链滑移，分子链柔顺性增强，在 120 min 时界面压力值为 50 min 时的 0.884；当温度上升至 70 ℃与 90 ℃时，界面压力出现显著下降，在 120 min 时界面压力剩余率分别为 0.715 和 0.703，说明随着温度到 70 ℃及以上时，分子链解缠结更加充分，硅橡胶分子链充分伸展，柔顺性大幅增强。

在高温下，总体而言，150%扩张率硅橡胶松弛程度随时间以及温度的升高而增大。90 ℃对于硅橡胶这类性能优异的材料尚不足以造成分子主链断裂等严重劣化现象，这与硅橡胶的应力松弛现象相符，这一点从图 8 所示傅里叶红外光谱测试结果便可得到映证。

对比力学试验结果(见图 3 和表 1)，可以发现在所测高温(50、70、90℃)范围内，150%扩张率下硅橡胶的面压松弛程度均明显大于相应温度下的弹性模量下降幅度，说明高温下的面压松弛率是由应力松弛现象与高温共同作用的结果，高温通过增大硅橡胶分子链柔顺性而对应力松弛现象产生了明显的促进效应。

3.3.2 低温下面压变化测试结果

图 9 和表 6 所示为低温下 150%扩张态硅橡胶材料的面压测试结果，可以看出在最初室温恒温阶段曲线几乎重合；在温度骤降的过程中，界面压力开始下降，且所降至的温度越低，界面压力的下降程度越大，并逐渐趋于一稳定值。

由表 6 可见，120 min 时，0、–20 ℃时面压剩余率分别为 0.981、0.953，而–40 ℃下面压剩余率降到 0.878。也就是说，温度由室温降至–40 ℃左右

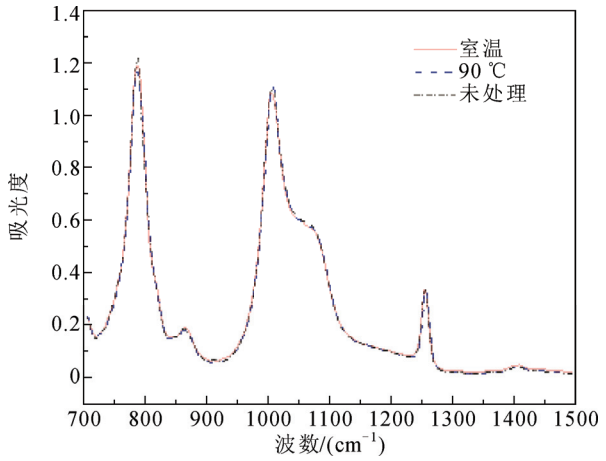


图 8　高温下面压测试后试样的红外光谱图

Fig.8　Infrared spectra of the specimen after pressure test at high temperatures

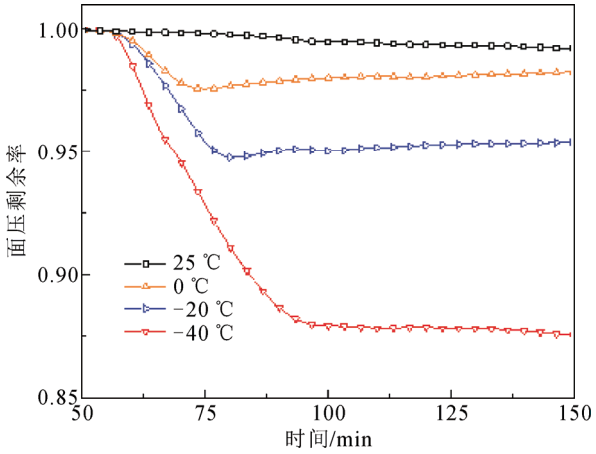


图 9　低温下 150%扩张状态硅橡胶面压松弛曲线

Fig.9　Interface pressure relaxation curve of silicone rubber in 150% expanded state at low temperature

时，力学特性发生明显变化。这与图 5 及表 3 中 DMA 测试结果趋势基本相符。

传统电缆与附件界面压力的计算方法，均以橡胶材料的弹性模量值为表征参数。橡胶材料弹性模量越大，界面压力越高。如果仅根据低温下橡胶材料弹性模量的测量结果(见表 2)，温度降低，弹性模量上升，因此理论上讲好像是低温下电缆与附件界面的面压应上升。但本文的试验结果表明：低温下界面压力反而下降。这说明仅以硅橡胶在静态下的弹性模量来反映其在扩张状态下发生温度变化时的面压特性并不准确。尤其是扩展态下的硅橡胶在低温下的玻璃化转变和局部结晶效应会导致局部分子链冻结，失去弹性效应而引起应力/面压的下降。

3.4　模拟实际扩张状态硅橡胶材料高低温循环过程的面压变化

图 10 和表 7 是高低温循环过程中扩张态硅橡胶材料的面压测试结果。可以看到在刚开始的 12 h 内，125%扩张率、150%扩张率两组试样的面压剩余率出现迅速下降，分别约为 0.784 和 0.565。之后两组试样的面压平均剩余率都进入相对稳定、缓慢的下降过程直至 120 h 试验结束，此时两组试样的面压平均剩余率分别为 0.743 和 0.531。对比高温、低温下面压剩余率测试结果，冷热循环下硅橡胶扩张率越大，面压松弛现象越明显。

图 11 是 150%扩张态硅橡胶在高低温循环过程中前 4 个温度循环内面压测试结果放大图。可以看到面压剩余率均在温度上升或下降过程中出现峰值(图 11 中①和②位置点)，这是由于室温下硅橡胶的

表 6　低温下 150%扩张状态硅橡胶面压剩余率

Table 6　Interface pressure residual rate of silicone rubber in 150% expanded state at low temperature

时间/min	R'			
	恒定 25 ℃	25~0 ℃	25—20 ℃	25—40 ℃
50	1	1	1	1
120	0.994	0.981	0.953	0.878

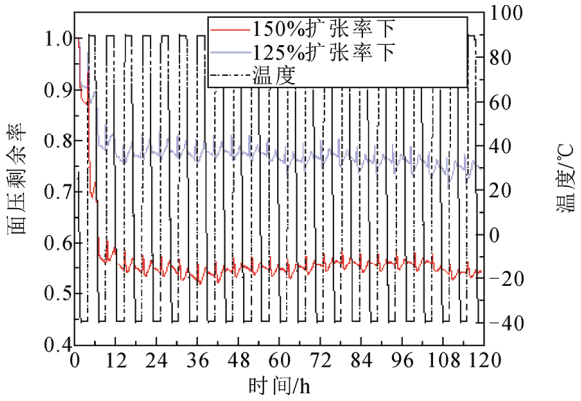


图 10　高低温循环过程中扩张状态硅橡胶面压松弛曲线

Fig.10　Interface pressure relaxation curve of expanded silicone rubber during high and low temperature cycles

表 7　高低温循环过程中扩张状态硅橡胶面压剩余率

Table 7　Interface pressure residual rate of expanded silicone rubber during high and low temperature cycles

扩张率/%	R'					
	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
125	0.784	0.776	0.776	0.764	0.757	0.743
150	0.565	0.544	0.544	0.553	0.557	0.531

弹性模量为最高值。而在 90 ℃或–40 ℃恒温过程中(图 11 中③和④位置点)，面压剩余率却出现了略增加(90 ℃期间)和下降趋势(–40 ℃期间)。这归因于硅橡胶材料本身的热胀冷缩特性。高温下的体积热膨胀有助于面压的升高而低温下的遇冷径向收缩导致面压的降低。

图 12 所示为高低温循环后扩张态的硅橡胶材料的红外光谱图。由图 12 可见，经过高低温循环后的硅橡胶试样并未发现明显的基团变化，这可能是由于高低温循环过程对硅橡胶的分子链结构变化有一定的恢复作用。已有研究表明，长时间(1000 h)的冷热循环老化会使硅橡胶试样分子链发生解聚，部分主链和交联键发生断裂，使得硅橡胶分子链交联网络劣化，同时产生—OH 等强极性基团[11]。因此本文所进行 120 h 高低温循环试验所造成的面压松弛现象是高温、低温对扩张状态硅橡胶材料反复分子链结晶、松弛过程造成的疲劳影响所共同作用的结果，而非长时间老化对硅橡胶材料的劣化作用。因此，本文的研究中忽略了长期高低温循环老化对硅橡胶材料的劣化作用。而在实际应用中，长期运行过程中高低温循环对材料劣化作用，势必导致面压的进一步下降。

图 13 是低温下面压测试后试样的 XRD 测试曲线，结果表明硅橡胶为短程有序、长程无序的无定形材料，衍射角 2θ 在 13°附近为硅橡胶硅氧烷主链散射峰，在 22°附近为白炭黑填充点周围产生的玻璃相，呈类似无定形 SiO_2 的三维网状结构，该网状结构是由白炭黑与硅橡胶基体发生共价结合而形成的。可以发现硅橡胶在经过–40 ℃面压测试后，其 Si—O—Si 主链散射峰增强，玻璃相散射峰也出现增强，这表明在 150%扩张率以及低温条件下，硅橡胶分子链与白炭黑之间发生了进一步的共价结合，且在共价结合发生的同时也应存在氢键形成造成的微量物理吸附效应。从而使得硅橡胶结构化，在硅橡胶内部成为一个个缠结点。

150%扩张率、低温下缠结点的大量出现使得硅橡胶发生玻璃化转变，材料变硬、弹性大幅减弱，扩张状态的硅橡胶整体对径向方向的压力也就随之减小。此外，缠结点的出现也可能为应变诱导结晶的产生与发展创造了条件，结晶使得分子链沿取向方向伸长，这种分子链的延伸过程也会使得材料的应力下降，即界面压力发生下降。当温度降至–40 ℃时，这种促进作用愈发显著，结晶程度变大，面压

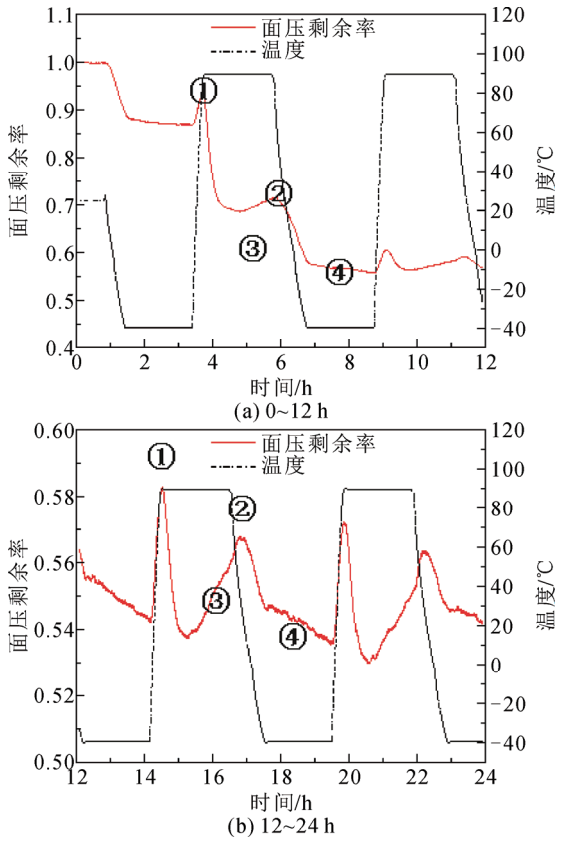


图 11 高低温循环过程中 150%扩张状态硅橡胶面压松弛曲线

Fig.11 Interface pressure relaxation curve of silicone rubber in 150% expanded state during high and low temperature cycles

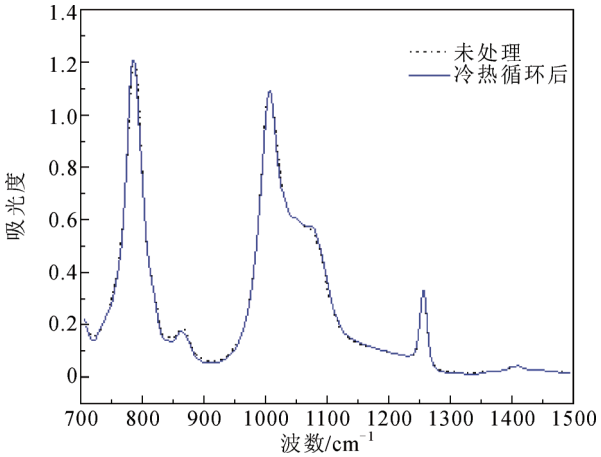


图 12 冷热循环面压测试后试样的红外光谱图

Fig.12 Infrared spectra of the specimen after high and low temperature cycles pressure test

下降的程度也随之变大。而关于应变诱导结晶的表征还有待进一步深入研究。

4 结论

1）未扩张态的硅橡胶材料的弹性模量随温度

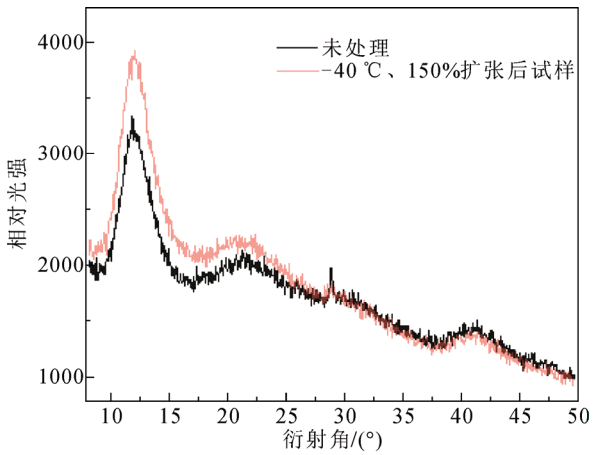


图 13　低温下面压测试后试样的 XRD 测试曲线

Fig.13　XRD curve of the sample after the low temperature pressure test

的升高(室温约 90 ℃)略有降低，随温度的降低略有增加(室温约–40 ℃)。

2）扩张态的硅橡胶材料的应力松弛率随温度的升高(室温约 90 ℃)逐渐增大。面压损失近 30%，这主要是由高温场、应力场共同作用加速橡胶分子链松弛过程所致。

3）扩张态的硅橡胶材料的应力松弛率随温度的降低(室温约–40 ℃)逐渐增大；且扩张率越高，应力松弛率越大。面压损失范围在 10%~20%，这可能是由低温场、应力场共同作用使硅橡胶玻璃化温度提前所致。

4）扩张态的硅橡胶材料在高低温(–40~90 ℃) 5d (120 h)后，150%扩张率的硅橡胶绝缘面压损失率约 50%，这主要是由高温/低温场、应力场共同作用造成的。

综上，极端环境温度下电缆与附件绝缘界面压力会出现不同程度的下降应给予一定的重视，界面压力的下降可能是诱发机车电缆终端在极端环境温度下事故频发的重要原因之一。

参考文献　References

[1] 严　璋，朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 3 版. 北京：中国电力出版社，2015.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[2] 高国强. 高速列车运行状态暂态过电压机理与抑制方法的研究[D]. 成都：西南交通大学，2012.
GAO Guoqiang. Study on the over-voltage mechanism and suppressing method for high-speed train[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2012.

[3] 白龙雷，周利军，邢立勐，等. 高寒环境下低温对乙丙橡胶电缆终端界面放电特性的影响[J]. 电工技术学报，2020，35(3)：646-658.
BAI Longlei, ZHOU Lijun, XING Limeng, et al. Effect of low temperature on interface discharge characteristics of ethylene-propylene rubber cable termination in high-cold environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 646-658.

[4] 白龙雷，周利军，曹伟东，等. -40℃条件下 EPR 电缆终端气隙放电发展特性[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3605-3614.
BAI Longlei, ZHOU Lijun, CAO Weidong, et al. Characteristics of partial discharge in air gap defects in EPR cable termination under -40 ℃ condition[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3605-3614.

[5] 郭　蕾，朱　琳，白龙雷，等. 高寒车载柔性电缆终端放电通道延伸与击穿过程的研究[J]. 铁道学报，2020，42(4)：59-65.
GUO Lei, ZHU Lin, BAI Longlei, et al. Study on extension and breakdown of discharge channel in flexible cable terminal in electric locomotive operating in alpine region[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(4): 59-65.

[6] 杨　帆，王　位，郑维飞. 高原环境对电力机车高压电缆柔性终端运用的影响及应对措施[J]. 电力机车与城轨车辆，2017，40(3)：12-15.
YANG Fan, WANG Wei, ZHENG Weifei. Influence and response of electric locomotive high voltage cable flexible terminal used in plateau environment[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2017, 40(3): 12-15.

[7] 朱　琳. 高寒车载电缆终端与网侧柜电场仿真及结构优化[D]. 成都：西南交通大学，2018.
ZHU Lin. Electric field simulation and structural optimization of cable termination and line side cubicle for locomotive in alpine region[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2018.

[8] 黄艳华，孙全吉，米志安，等. 侧基对硅橡胶低温性能的影响[J]. 特种橡胶制品，2010，31(4)：17-19，23.
HUANG Yanhua, SUN Quanji, MI Zhian, et al. Effect of organic side group on low temperature-resistance of silicon rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 2010, 31(4): 17-19, 23.

[9] 王宏旭. 低温下硅橡胶直流电气性能与力学性能研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2019.
WANG Hongxu. Study on the DC electrical and mechanical properties of silicone rubber at low temperature[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2019.

[10] WEN X S, YUAN X Q, LAN L, et al. RTV silicone rubber degradation induced by temperature cycling[J]. Energies, 2017, 10(7): 1054.

[11] 金海云，马佳炜，曾　飏，等. 室温硫化硅橡胶绝缘保护材料冷热循环老化特性研究[J]. 高压电器，2020，56(9)：159-165.
JIN Haiyun, MA Jiawei, ZENG Yang, et al. Study on thermal-cooling aging characteristics of room temperature vulcanized silicone rubber insulation and protection materials[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 159-165.

[12] 张文文，王胜辉，律方成. 硅橡胶与氟硅橡胶材料的低温物理性能研究[J]. 绝缘材料，2021，54(12)：28-31.
ZHANG Wenwen, WANG Shenghui, LÜ Fangcheng. Research on low temperature physical properties of silicone rubber and fluorosilicone rubber materials[J]. Insulating Materials, 2021, 54(12): 28-31.

[13] 赵莉华，邱九皓，李彦姝，等. 硅脂对电缆中间接头硅橡胶力学特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4055-4062.
ZHAO Lihua, QIU Jiuhao, LI Yanshu, et al. Effect of silicone grease on mechanical properties of silicone rubber for cable intermediate joint[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4055-4062.

[14] 王 霞，樊卓杨，吴 超，等. 外置光纤光栅传感器测量电缆附件界面压力的方法研究[J]. 高电压技术，2022，48(1)：38-46.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. External fiber grating sensor used for measurement of interface pressure between cable and accessory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 38-46.

[15] TOKI S, SICS I, HSIAO B S, et al. Probing the nature of strain-induced crystallization in polyisoprene rubber by combined thermomechanical and in situ X-ray diffraction techniques[J]. Macromolecules, 2005, 38(16): 7064-7073.

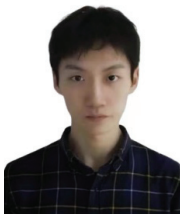
[16] 陈品章，张前磊，常家瑞，等. 超低温下应变诱导聚甲基乙烯基硅氧烷结晶[C]//中国化学会 2017 全国高分子学术论文报告会摘要集——主题 C：高分子物理与软物质. 成都：中国化学会，2017：57.
CHEN Pinzhang, ZHANG Qianlei, CHANG Jiarui, et al. Strain-induced crystallization of polymethylvinylsiloxane at ultra-low temperature[C]// Chinese Chemical Society 2017 National Polymer Academic Papers Conference Abstracts-Theme C: Polymer Physics and Soft Matter. Chengdu, China: Chinese Chemical Society, 2017: 57.

[17] HAMDAN M A, PILGRIM J A, LEWIN P L. Thermo-mechanical analysis of solid interfaces in HVAC cable joints[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1779-1787.



WANG Xia
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

王 霞(通信作者)
1976—，女，博士，副教授，博导
主要从事聚合物材料和测试方法的研究工作
E-mail: wxflying@mail.xjtu.edu.cn



YE Xunzhi

叶洵知
1998—，男，硕士生
主要从事橡胶材料性能和测试方法的研究工作
E-mail: EverexY@stu.xjtu.edu.cn

收稿日期 2022-08-25 修回日期 2022-12-20 编辑 曹昭君