第 52 卷 第 5 期：2261-2270 高电压技术 Vol.52, No.5: 2261-2270
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250417

低温环境下电缆附件硅橡胶绝缘力学可靠性的影响机理

吴 超，王言鼎，贾 春，王 霞，吴 锴
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘 要：低温环境下电缆附件故障频发表明其界面力学可靠性存在不确定性。该文基于电缆附件用硅橡胶材料，测试了硅橡胶的低温结晶特性、在不同温度和变温(室温到低温)下的应力松弛特性，研究了低温环境下硅橡胶应变诱导结晶效应对其力学性能的作用机制，借助橡胶状态方程给出了变温下硅橡胶熵弹性的计算式，查明了低温下电缆附件用硅橡胶绝缘力学性能的演变机理。研究表明：应变诱导结晶效应会导致极端低温下的硅橡胶绝缘应力激增，结晶温度升高；给定拉伸率 λ 的硅橡胶在降温过程中的应力变化主要由熵弹性贡献；中高拉伸率(125%≤λ≤400%)下硅橡胶应力由 Gough-Joule 效应主导，其值随温度下降逐渐衰减，这正是低温环境下电缆附件界面压力不可靠的原因。数值计算结果也证明实际电缆附件界面压力在极端低温环境下会降至安全阈值 0.1 MPa 以下。研究结果对评估电缆附件用橡胶绝缘在低温下的力学可靠性具有一定的工程应用价值。

关键词：电缆附件；硅橡胶；低温；应力松弛；应变诱导结晶；熵弹性

Influence Mechanism of Low-temperature Environments on the Mechanical Reliability of Silicone Rubber Insulation in Cable Accessory

WU Chao, WANG Yanding, JIA Chun, WANG Xia, WU Kai
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: The frequent failures of cable accessories in low-temperature environments indicate uncertainties in the interfacial mechanical reliability. On the basis of silicone rubber (SiR) materials for cable accessories, we investigated the low-temperature crystallization characteristics and stress relaxation behavior of SiR under varying temperatures (from room temperature to low temperatures). The effect mechanism of the strain-induced crystallization (SIC) on the mechanical properties of SiR at low temperatures was analyzed. A calculation formula for entropic elasticity under temperature variations was derived using the rubber state equation, and the influence mechanism of low-temperature conditions on the mechanical properties of SiR insulation in cable accessories was elucidated. The results indicate that the SIC effect leads to a significant surge in stress within SiR insulation under extreme low-temperature conditions, accompanied by an elevation in crystallization temperature. The stress variation observed in silicone rubber under a constant tensile ratio during cooling is primarily attributed to contributions from entropic elasticity. At medium-to-high tensile ratios (125%≤λ≤400%), the stress behavior of SiR is dominated by the Gough-Joule effect, which manifests as a progressive decrease in stress with decreasing temperature. This phenomenon is identified as the underlying cause of unreliable interfacial pressure in cable accessories operating in low-temperature environments. Actual calculations of interface pressure between cable and accessory have also confirmed that the interface pressure under extreme low-temperature conditions decreases below the critical safety threshold of 0.1 MPa. The research results can be used for evaluating the mechanical reliability of rubber insulation used in cable accessories under low-temperature environments.

Key words: cable accessory; silicone rubber; low-temperature; stress relaxation; strain-induced crystallization; entropic elasticity

0 引言

硅橡胶(silicone rubber，SiR)材料因其优良的耐高低温性能在电缆附件绝缘中得到广泛应用[1-3]。在电缆附件实际使用过程中硅橡胶绝缘以一定扩张率过盈安装在电缆上，保证电缆与附件之间可靠的界面压力。一般工程上界面压力设计值为 0.25 MPa[4]。由于附件硅橡胶绝缘安装后呈扩张态，因而在使用

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).

过程中电缆附件界面压力会逐渐发生松弛，威胁附件的力学可靠性。关于高温下电缆附件界面压力的演变特性已有诸多的研究报道，如短期温升会增加界面压力[5-6]；长期高温会加速橡胶绝缘应力松弛而导致界面压力下降[7]。另外，关于高温下橡胶应力松弛对面压的影响可通过时-温等效原理评估[8-9]，工程上认为确保30年后面压不低于0.1 MPa即可认为界面压力可靠[4,10-11]。

而在低温环境下，橡胶的应力松弛会大幅度减缓，因此可忽略低温下长期应力松弛对电缆附件界面压力的影响。但目前已有报道表明，电缆终端故障多发于冬季的低温环境，主要故障形式为沿复合介质界面发生击穿：如气体绝缘(gas insulated switchgear，GIS)电缆终端在温度骤降下硅橡胶的收缩会使环氧套管/橡胶界面出现气隙引发套管击穿[12-13]；而机车电缆终端在低温环境下，其内部应力控制管的玻璃化作用会引发界面结构不匹配，进而诱导形成界面气隙并导致局部放电[14-15]。随着在极端环境温度下的应用逐渐增多，电缆附件在低温环境下的力学可靠性更值得关注。已有研究表明，低温环境会提升橡胶本体材料的体积电阻率、击穿场强等介电性能[16-17]，不会对附件电气性能产生恶劣影响。也有学者认为低温下橡胶的应变诱导结晶效应会导致分子链的冻结而降低界面压力[18-19]。众所周知，硅橡胶的结晶温度可达−60 ℃[20]，而极端低温环境温度一般不低于此温度，理论上讲硅橡胶仍处于高弹橡胶态范围之内，不会产生结晶效应。因此低温下电缆附件界面力学性能演变机理仍不清楚。

而目前针对硅橡胶的应力计算研究主要基于连续介质力学的唯象理论，通过不同的应变能密度函数建立硅橡胶材料的超弹性本构方程：包括Mooney-Rivilin模型[21]、Yeoh模型[10,22-23]以及Ogden模型[21]等。另外还有基于分子统计力学建立的Gaussian和非Gaussian链模型[24]。但上述模型只适用于恒定温度下，针对硅橡胶在低温下降温过程中的应力计算公式尚未见报道。

本课题组已经利用薄膜压阻传感系统实际测量了电缆附件套筒结构的界面压力变化，并定性地分析了温度变化对电缆附件界面压力的影响[18]。而本文基于电缆附件用硅橡胶材料，通过热差示扫描量热分析(differential scanning calorimetry，DSC)研究了硅橡胶的低温结晶特性，通过在不同温度和变温(室温到低温)下的应力松弛特性分析了温度和拉伸率对硅橡胶应力松弛的影响，研究了低温环境下硅橡胶应变诱导结晶效应对其力学性能的作用机制，并借助橡胶状态方程给出了变温下硅橡胶熵弹性的计算公式，查明了低温下电缆附件用硅橡胶绝缘力学性能的演变机理。

1 试验方法

1.1 试样制备

本文所选硅橡胶材料为瓦克745硅橡胶，种类为甲基乙烯基硅橡胶。采用A、B液体胶混合生产，注塑工艺为130 ℃下保持1 h，内部填充气相二氧化硅，具体成分见表1。成型试片尺寸为10 cm×10 cm×1 mm，试验前在180 ℃高温烘箱中静置4 h完成二次硫化。

1.2 DSC测试

DSC测试采用差式扫描量热仪(DSC822e)。测试温度范围−130~100 ℃，样品质量约18 mg。升降温速率10 ℃/min，氮气气氛。测试分析硅橡胶随温度变化的热流曲线分析低温下硅橡胶的结晶行为。

1.3 应力松弛测试

采用动态热机械分析仪(DMA242E)研究不同温度和变温下拉伸态硅橡胶的应力松弛行为。根据GB/T 9871—2008，试样尺寸为10 mm×3 mm×1 mm。测量模式选择松弛模式，分析硅橡胶的归一化标称应力σ_N(测试应力σ_t与初始应力σ_0之比)随温度和时间的变化曲线。

电缆附件安装扩径率一般为125%~150%，冷缩式电缆附件储存扩径率一般为200%~400%，因此本文在应力松弛过程中硅橡胶的拉伸率λ设为110%~400%(通常$\lambda=\varepsilon+1$，其中ε是应变)，测试温度程序包括恒温应力松弛和变温应力松弛两种。

1.3.1 恒温应力松弛

当试验仪器腔体达到设定温度后，将试样拉至设定应变，记录应力随时间的变化曲线。测试温度选择−40、−20、0、25 ℃。

1.3.2 变温应力松弛

在室温25 ℃恒温下，将试样拉至某一应变，

表1 瓦克硅橡胶组成成分

Table 1 Composition of WACKER silicone rubber

种类	种类	比例
有机复合	聚甲基乙烯基硅氧烷	60%~75%
无机气相	二氧化硅	20%~35%
有机复合	乙烯基封端聚二甲基硅氧烷	1%~5%
有机复合	羟基封端聚二甲基硅氧烷	1%~10%

保持 60 min(室温下应力松弛表观稳态)后[19]，降低温度。测试温度范围−60~25 ℃，降温速率 2 ℃/min。

2　试验结果

2.1　硅橡胶的结晶行为分析

硅橡胶的升温和降温 DSC 测试热流曲线如图 1 所示。曲线中的可见的放热峰对应于硅橡胶分子链的结晶；吸热峰则对应于硅橡胶晶体的熔融。发生两次结晶的温度分别记作 T_{c1}(冷结晶温度)、T_{c2}(熔融过程中的结晶温度)；结晶熔融温度记作 T_m；结束结晶熔融的温度记作 T_{em}。在升温曲线中，硅橡胶在−126.49 ℃处发生了玻璃化转变过程(图中红色圆圈内)，高于此温度后，材料从玻璃态向高弹态转变，对应的温度即为玻璃化转变温度 $T_{g\text{-}DSC}$。具体的温度特征值如图 1 所示。

在升温过程中，由于硅橡胶初始温度低于 $T_{g\text{-}DSC}$，因此其内部分子链处于玻璃态无法运动。高于 $T_{g\text{-}DSC}$ 后，硅橡胶分子链开始解冻并有序排向，在低温效应下出现冷结晶现象。但随着温度进一步升高，硅橡胶分子热运动逐渐加剧，最终导致聚合物晶体在 T_m 附近发生熔融，出现结晶熔融峰。而降温过程中由于硅橡胶已结晶熔融故仅发生熔融结晶现象[20,25]。

尽管硅橡胶的玻璃化转变温度远低于电缆附件使用的温度范围(−40~90 ℃)，但硅橡胶结晶熔融终止温度 T_{em} 已高于附件应用极端低温温度−40 ℃。另外，电缆附件运行时硅橡胶处于拉伸态，硅橡胶的结晶温度在应变诱导结晶效应作用下会在静态结晶温度的基础上进一步提高。因此有必要对拉伸态的硅橡胶在低温应用环境下的力学性能进行进一步研究。

2.2　恒定温度下硅橡胶材料的应力松弛特性

图 2 所示为拉伸率 150%的硅橡胶在不同温度(−40~25 ℃)下的应力松弛特性。由图 2 可见，温度降低会减慢硅橡胶的应力松弛速率。这是因为温度降低会减缓硅橡胶内部分子链的热运动，降低分子链沿拉伸方向重排速率，导致应力松弛速率下降。

图 3 所示为室温下硅橡胶在不同拉伸率(110%~400%)时的应力松弛特性。由图 3 可见，硅橡胶拉伸率越大，应力松弛速率越快。

事实上，图 3 中的应力松弛曲线在对数时间坐标下随时间增加呈线性降低。拟合不同拉伸率下归一化应力随时间的应力松弛速率如表 2 所示。

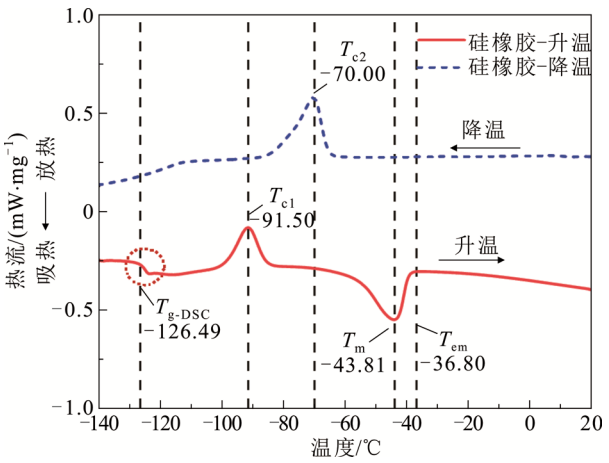


图 1　硅橡胶 DSC 测试曲线

Fig.1　DSC test curves of silicone rubber

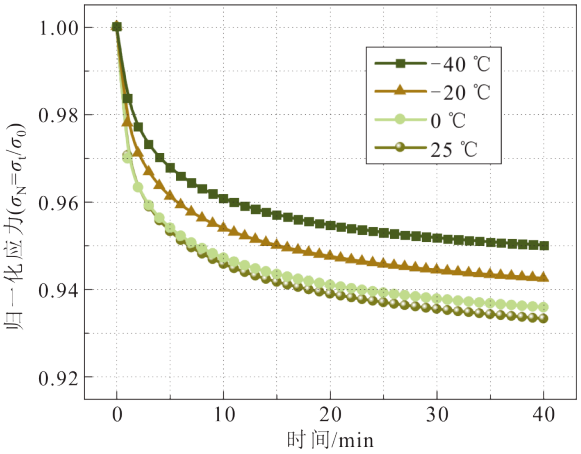


图 2　不同温度下拉伸率 150%硅橡胶的应力松弛曲线

Fig.2　Stress relaxation curves of SiR at different temperatures with a tensile ratio of 150%

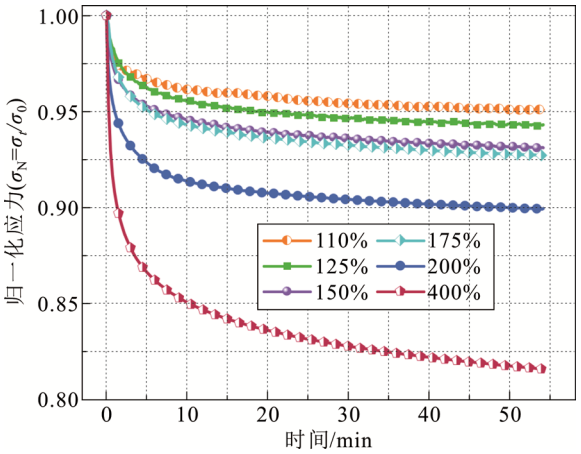


图 3　不同拉伸率下室温硅橡胶应力松弛曲线

Fig.3　Stress relaxation curves of SiR at room temperature under different tensile ratios

表 2 不同拉伸率下硅橡胶恒温应力松弛速率的拟合参数值

Table 2 Fitting parameters of constant temperature stress relaxation rate of SiR at different tensile ratios

拉伸率/%	110	125	150	175	200	400
$d\sigma_N/d(\lg t)$	−0.015 9	−0.018 8	−0.020 9	−0.022 9	−0.025 0	−0.048 6
R^2	0.994	0.991	0.997	0.997	0.975	0.999

根据表 2 数据，应力松弛速率值与拉伸率正相关。线性拟合应力松弛速率与拉伸率发现其拟合优度 R^2>0.99，这表明硅橡胶的应力松弛速率值随拉伸率呈线性增加趋势。

2.3 变温下硅橡胶材料的应力松弛特性

图 4 所示为拉伸率 150%硅橡胶在变温下的应力松弛特性。图中拉伸态硅橡胶首先在室温下保持 60 min 后(应力松弛基本达到稳态)，以 2 ℃/min 速率降温至某一温度。由图 4 所示，温度降低会导致应力突然下降；且温度越低，应力下降越明显。当降温结束后，硅橡胶的应力下降速率变慢再次进入缓慢松弛阶段。从 25 ℃降低到−40 ℃，硅橡胶的归一化应力从 0.936 7 降至 0.869 3，相较于恒定 25 ℃下降至 0.926 8，硅橡胶应力下降了 5.75%。

2.4 低温下硅橡胶的应变诱导结晶效应

为查明硅橡胶在低温下的应变诱导结晶效应对硅橡胶应力松弛的影响，测试了从室温 25 ℃降温至−80 ℃下不同拉伸率下硅橡胶的降温应力松弛曲线。测试结果如图 5 所示。

由图 5 所示，在初始 0~60 min 内，硅橡胶处于室温下的应力松弛阶段，不同拉伸率对常温下硅橡胶应力松弛的影响详见 2.2 节。在 60~112.5 min 内，硅橡胶进入降温程序，温度从 25 ℃降至−80 ℃。不同拉伸率呈现出的硅橡胶应力变化趋势并不相同：低拉伸率(λ=110%)下，硅橡胶的应力随着温度降低而增大；中高拉伸率(125%≤λ≤400%)下，硅橡胶的应力则随着温度降低而减小。此外，在降温过程中所有拉伸率的硅橡胶达到不同的温度点后均出现了应力激增现象，这与硅橡胶在低温下应变诱导结晶有关。当降温结束后，硅橡胶的应力并不会再次松弛下降，而是逐渐保持稳定值。高拉伸率下的硅橡胶会首先进入应力稳定阶段。

表 3 给出了不同拉伸率下硅橡胶在−80 ℃下结晶后的归一化应力稳定值。由表 3 可知随着拉伸率上升，硅橡胶的归一化应力稳定值逐渐下降。拉伸率低的硅橡胶，其结晶后的应力增量反而更大。

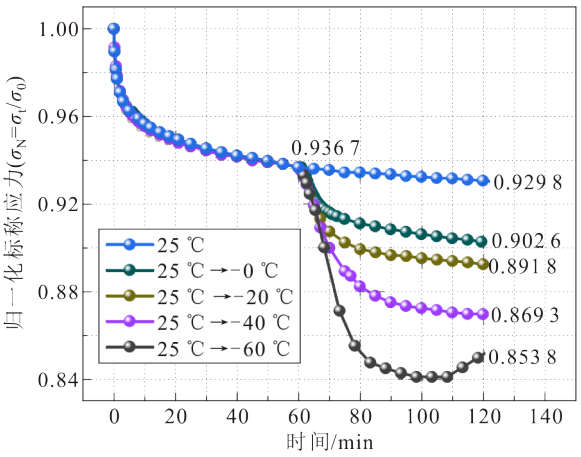


图 4 不同拉伸率下室温硅橡胶应力松弛曲线

Fig.4 Stress relaxation curves of SiR at variable temperatures with a tensile ratio of 150%

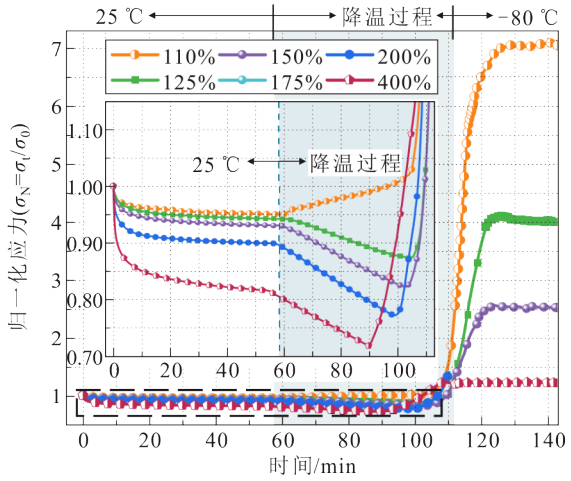


图 5 变温下不同拉伸率的硅橡胶应力松弛曲线

Fig.5 Stress relaxation curves of SiR at variable temperatures under different tensile ratios

表 3 不同拉伸率的硅橡胶在−80 ℃下的应力稳定值 $\bar{\sigma}_N$

Table 3 Stable stress values of SiR at different tensile ratios under −80 ℃

拉伸比/%	110	125	150	200	400
$\bar{\sigma}_N$	7.054	4.015	2.530	1.538	1.218

为对比不同拉伸率硅橡胶在低温下的结晶温度，以图 5 中温度开始下降时(60 min 左右)的应力为基准值，得到不同拉伸率硅橡胶应力-温度曲线如图 6 所示。

由图 6 所示，在降温至特定温度点后，硅橡胶的应力突然转变为剧烈上升，该应力转变点对应的温度即为硅橡胶开始应变诱导结晶的温度(T-转变)。

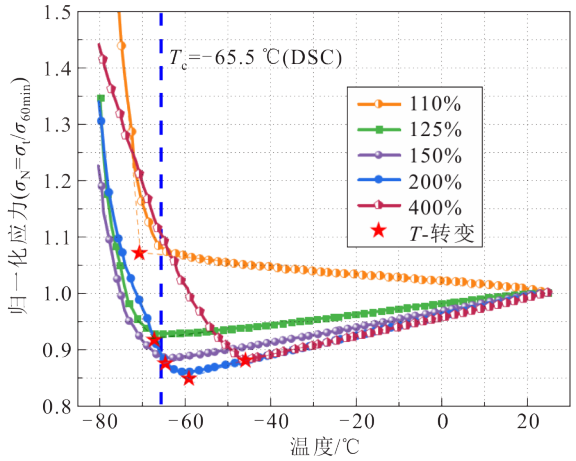


图 6　以 60 min 应力归一化的变温下不同拉伸率硅橡胶应力-温度曲线

Fig.6　Normalized nominal stress in SiR with temperature at different tensile ratios, based on the stress at around 60 minutes

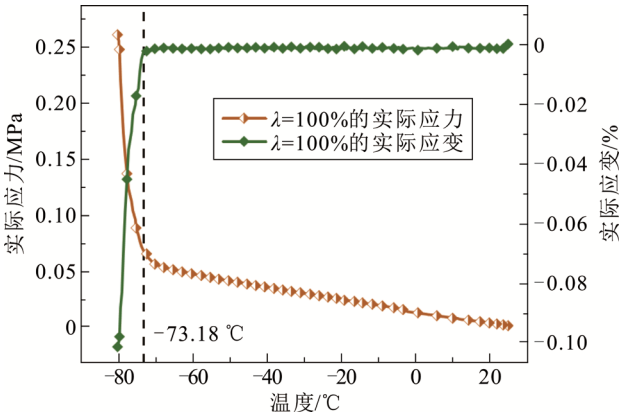


图 7　变温下 λ=100%硅橡胶实际应力-温度曲线

Fig.7　Actual stress in SiR with a tensile ratio of 100% under variable temperatures

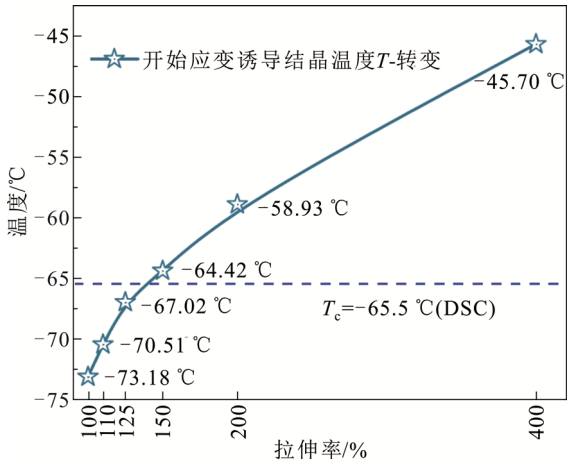


图 8　不同拉伸率下硅橡胶开始应变诱导结晶的温度

Fig.8　Crystallization temperatures of SiR at different tensile ratios

图 6 中虚线所示温度为 2.1 节 DSC 测试结果得到的未拉伸硅橡胶(λ=100%)在降温过程中的结晶温度 T_c= −65.5 ℃，但与应力松弛测试的硅橡胶结晶温度点相比，该温度很明显偏高。因此测试了拉伸比 100%的硅橡胶应力随着温度的变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知，拉伸率 λ=100%的硅橡胶应力转变对应的温度点为−73.18 ℃，该温度明显低于 T_c= −65.5 ℃。此外，硅橡胶在发生应力转变时(图中黑色虚线处)，可见硅橡胶实际应变同时负方向急剧增加，这说明硅橡胶试样沿拉伸方向发生了尺寸收缩，并最终导致硅橡胶应力增加。

图 8 所示为应力松弛测试得到的不同拉伸率的硅橡胶结晶温度，蓝色虚线所示为 DSC 测试得到的硅橡胶结晶温度。由图 8 可知，随着拉伸率的增大，硅橡胶的应力转变点温度逐渐升高。拉伸率从 100%增加至 400%后，硅橡胶结晶温度从−73.18 ℃升高至−45.70 ℃。

3　分析与讨论

3.1　低温下硅橡胶的应变诱导结晶效应

3.1.1　硅橡胶的结晶与机械响应之间的关联

拉伸态的硅橡胶由于分子链已经取向会使得结晶温度升高，硅橡胶的结晶温度随着拉伸率增加而逐渐升高(图 8)。测试结果(图 6)显示结晶会导致硅橡胶应力出现急剧增加。这是因为硅橡胶在结晶时会同时沿拉伸方向发生剧烈的尺寸收缩，如图 7 中所示，实际应变在结晶处发生剧烈负向增加。

而硅橡胶结晶时沿拉伸方向的体积收缩主要是由垂直于拉伸方向的结晶相变导致的[26]。在不同拉伸率的硅橡胶中，结晶导致的应力最大增量应出现在含有垂直于拉伸方向排列的链段浓度最高的硅橡胶中，因此在表 3 中拉伸率越低的硅橡胶结晶后的应力增量反而越大。

另外，硅橡胶的应变诱导结晶带来的机械响应与其他种类橡胶截然不同，如天然橡胶的应变诱导结晶效应会导致分子链“冻结”，结晶点会作为应力支撑点进一步松弛其余分子链[27]，橡胶会因弹性丧失而出现应力下降[28]。然而，硅橡胶应力会因为分子链结晶出现剧烈上升。这是因为天然橡胶在拉伸过程中分子链仍是正弦均匀分布，在结晶过程中分

子链首先取向运动后相变结晶，分子链运动导致天然橡胶的宏观应力松弛下降[29-30]。而硅橡胶在拉伸过程中分子链已经出现了优先取向的非晶链段系统，在结晶过程中只发生相变结晶，分子链不再取向运动，因此最终硅橡胶只因正常结晶相变导致的体积收缩而出现应力激增[26,31]。

3.1.2 应变诱导结晶效应对电缆附件界面压力影响

实际电缆附件应用过程中，过盈安装会导致附件处于拉伸态，低温下的应变诱导结晶效应则会导致附件硅橡胶绝缘结晶温度升高。在附件常用安装扩径率(110%~150%)范围内，硅橡胶的低温结晶温度从−70.15 ℃升至−64.42 ℃(图 8)，但仍低于常见的低温环境温度−40 ℃，不会影响橡胶绝缘的低温力学可靠性。

此外，在进行降温应力松弛测试时，应力变化会滞后于温度变化，测试得到的硅橡胶应变诱导结晶温度偏低，比如虽然在图 8 中拉伸率 150%的硅橡胶结晶温度为−64.42 ℃，但图 4 中曲线显示在长期处于−60 ℃下硅橡胶的应力仍会逐渐增加，即出现缓慢结晶。而长期处于−40 ℃下的硅橡胶应力一直缓慢下降，并不会结晶。

综上，在常见的极端低温环境(−40~25 ℃)内可以不考虑低温下硅橡胶的应变诱导结晶效应对变温下电缆附件界面压力的影响。但在工程上进行电缆附件橡胶绝缘的选型时应考虑选取具有较低的结晶温度的绝缘材料。

3.2 降温过程中硅橡胶的应力变化机理

3.1 节已详细讨论了低温下的应变诱导结晶效应对硅橡胶应力的影响，本节重点讨论硅橡胶在发生结晶相变之前的应力变化过程。

事实上，在变温过程中的硅橡胶的应力变化是由热膨胀效应、Gough-Joule 效应、应力松弛效应以及应变诱导结晶效应共同作用的结果[18,32]。热膨胀效应是指由于降温分子链之间自由体积减小，橡胶体积收缩而导致的应力增大；应力松弛效应是指由于降温分子链沿拉伸方向重排速率减慢而导致的应力下降减缓[33]；Gough-Joule 效应本指拉伸态硅橡胶在受热过程中，由于分子热运动受到热能的激发，熵值增加引起橡胶收缩应力增加的现象[34]，反之，在降温过程中 Gough-Joule 效应则会导致硅橡胶应力下降。

恒定温度下，拉伸态的硅橡胶内部只存在应力松弛效应，此时由拉伸率和温度决定分子链沿拉伸方向重排的速度，拉伸率和温度越高，应力衰减幅度和松弛速率越大(如图 2 和图 3 所示)。

而在降温过程中，由于不同的拉伸率下，主导硅橡胶应力变化的微观效应差异导致了硅橡胶宏观应力变化也不尽相同。如图 5 所示，低拉伸率(λ=110%)下硅橡胶的应力由热膨胀效应主导，正向的热膨胀效应占据优势，导致硅橡胶沿拉伸方向扩张，应变减小，最终导致应力下降，发生热弹转变现象[35]。而中高拉伸率(125%≤λ≤400%)下硅橡胶应力由 Gough-Joule 效应主导，因此硅橡胶应力随温度下降逐渐降低(如图 4 和图 5 所示)。电缆附件在实际应用中的扩径率一般 125%~150%，因此实际电缆附件硅橡胶绝缘应力在降温过程中会出现衰减，这正是低温环境下电缆附件界面压力不可靠的原因。

3.3 降温过程中硅橡胶的实际应力变化计算

根据图 5 降温过程中不同拉伸率的硅橡胶归一化应力随温度的变化曲线，可以得到硅橡胶实际应力随热力学温度变化的曲线如图 9 所示。

由图 9 所示，硅橡胶在结晶之前应力随温度下降呈现线性变化，结晶发生后硅橡胶应力出现非线性激增。

利用热力学理论计算分析常见的极端低温环境(−40~25 ℃)内不同拉伸率的硅橡胶应力变化过程如下。橡胶在拉伸过程中的热力学方程式见式(1)[35]。

$$f=\left(\frac{\partial u}{\partial l}\right)_{T,V}-T\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V}=\left(\frac{\partial u}{\partial l}\right)_{T,V}+T\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_{l,V} \tag{1}$$

式中：f 表示橡胶张力；u 表示内能；S 表示熵；l、V、T 分别为橡胶的长度、体积和温度。

张力与应力之间存在式(2)所示关系：

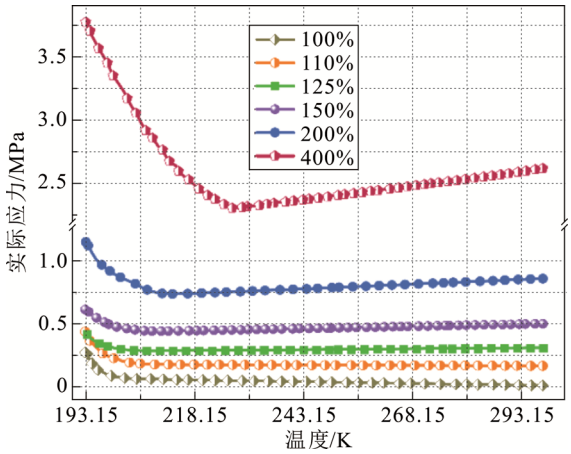


图 9 不同拉伸率下硅橡胶的实际应力-温度曲线

Fig.9 Actual stress curves of SiR with the temperature under different tensile ratios

$$\sigma=\frac{f}{A} \tag{2}$$

式中：σ 表示橡胶应力；A 表示横截面积。

将式(2)代入式(1)中可得：

$$\sigma=\frac{1}{A}\left(\frac{\partial u}{\partial l}\right)_{T,V}+T\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)_{l,V} \tag{3}$$

式(3)中前项即为内能变化对硅橡胶应力变化的贡献，用 σ_u 表示；后项即为熵变对应力的贡献，以 σ_s 表示。则有：

$$\sigma=\sigma_u+\sigma_s=\sigma_u+TP_S \tag{4}$$

式中：P_S 表示熵弹性应力系数。

由式(4)所示，橡胶应力随温度呈现线性变化，因此通过式(4)拟合图 9 中不同拉伸率下的硅橡胶应力曲线，分析能弹性和熵弹性对橡胶应力的贡献。拟合温度范围−40~25 ℃(233.15~298.15 K)。拟合结果如表 4 所示，其中 R^2 表示拟合优度。

由表 4 所示，所有拉伸率的拟合优度 R^2>0.99，表明拟合效果很好。根据拟合参数可计算不同温度下硅橡胶熵弹性和内能弹性对总应力的贡献。图 10 所示为硅橡胶在 233.15 K(−40 ℃和 298.15 K(25 ℃)下实际应力的各分量随拉伸率的变化。

根据图 10 所示，在不同拉伸率下，能弹性对硅橡胶应力的贡献值基本大于熵弹性。在高拉伸率 400%下，能弹性的贡献才逐渐与熵弹性的贡献相当。事实上对于理想橡胶，理论上其内能变化对应力的贡献为 0，即 $\sigma_u=0$ [27]。这是因为熵弹性主要与分子内部构象熵有关，而能弹性则主要与分子链间相互作用力成正比[28-29]。理想橡胶内部没有分子间作用力因此能量弹性分量对总应力无贡献。而本文所用甲基乙烯基硅橡胶为三维化学交联网状结构，其内部二氧化硅填料与聚甲基乙烯基硅氧烷基底之间还存在物理交联，交联点一方面限制了硅橡胶分子链构象熵的变化，另一方面在拉伸过程中交联点的变形也导致硅橡胶能弹性发生较大变化[21]。因此，在本研究中，不同拉伸比下的能弹性应力高于熵弹性应力。

虽然在不同拉伸率下能弹性应力分量大于熵弹性应力分量，但是在实际电缆附件硅橡胶绝缘应用过程中属于给定拉伸率下的变温过程，因此硅橡胶的应力变化仅由熵弹性贡献。

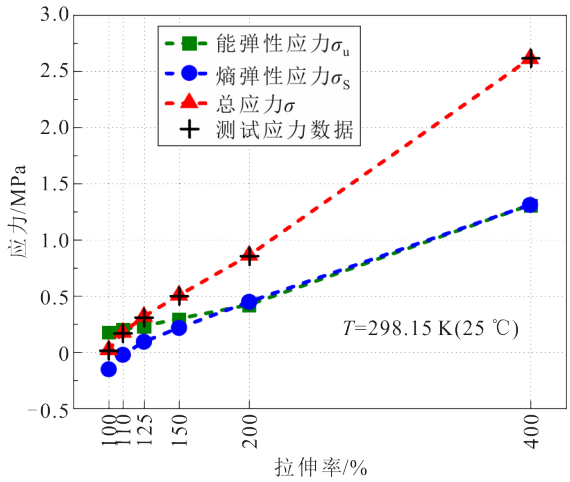
事实上，根据交联橡胶的状态方程，硅橡胶的应力与温度和拉伸率还存在关系如式(5)所示[35]：

$$\sigma=N_0k(\lambda-\lambda^{-2})T \tag{5}$$

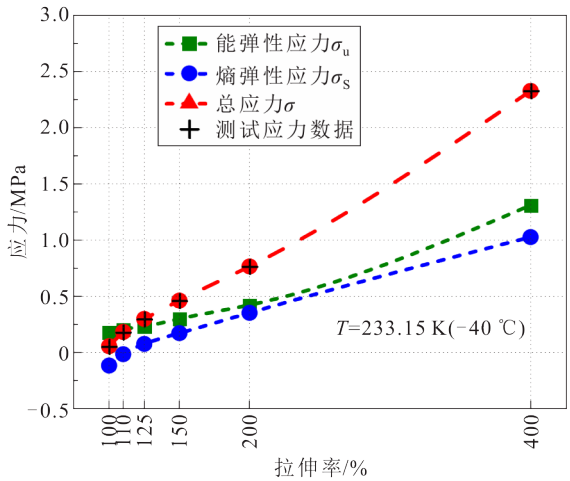
表 4　不同拉伸率下硅橡胶的拟合参数值

Table 4　Fitting parameters of stress of SiR at different tensile ratios

拉伸率/%	P_S/(10^{-4} MPa·K^{-1})	σ_u/MPa	R^2
100	−5.409	0.173	0.998
110	−1.043	0.199	0.991
125	2.878	0.225	0.998
150	6.994	0.292	0.999
200	14.808	0.415	0.999
400	43.838	1.307	0.999



(a) 低温下298.15 K(25 ℃)



(b) 低温下233.15 K(−40 ℃)

图 10　硅橡胶的各应力分量随拉伸率的变化曲线

Fig.10　Variation curves of each stress components of SiR with tensile ratios

式中：N_0 表示网链密度，即单位体积内的网链数；k 表示玻耳兹曼常数，其值为 k=1.380 649×10^{-23} J/K。

对比式(4)与式(5)，硅橡胶的熵弹性带来的应力变化可用橡胶的状态方程进行计算，熵弹性应力系数 P_S 与拉伸率 λ 之间存在：

$$P_S=N_0k(\lambda-\lambda^{-2}) \tag{6}$$

拟合 P_S~($\lambda-\lambda^{-2}$)即可得到 N_0 值，拟合结果如图 11 所示，由此得到本文所用硅橡胶状态方程为式(7)所示，此即熵弹性应力随拉伸率和温度变化的关系式：

$$\sigma_s = 11.070\times10^{-4}(\lambda-\lambda^{-2})T \tag{7}$$

由 3.2 节，硅橡胶在降温过程中的应力变化主要是由热膨胀效应、Gough-Joule 效应、应变诱导结晶效应(结晶相变前不考虑)、应力松弛效应共同作用的结果[18,32]。其实，上述效应对应力的贡献均可归结于硅橡胶系统熵变化所带来的应力变化，即熵弹性应力变化。因此，根据式(7)即可计算变温过程中各效应综合导致的实际硅橡胶应力变化。

3.4 低温下实际电缆附件界面压力的计算

本文所用硅橡胶在实际中会作为 27.5 kV 机车电缆附件绝缘材料，因此可用于计算低温下实际机车电缆附件界面压力的变化。

根据厚壁圆筒模型可以推导得到电缆附件在常温下界面压力计算式如式(8)所示[5,11]：

$$P = \frac{(b^2-a^2)EI}{(1+\nu)a(b^2+(1-2\nu)a^2)} \tag{8}$$

式中：P 为电缆附件界面压力；a 为电缆附件扩张前的内半径；b 为电缆附件扩张前的外半径；E 为附件绝缘的弹性模量，取 0.95 MPa；ν 为附件橡胶绝缘的泊松比，取 0.49；I 为附件过盈量。

实际机车附件会配套不同截面积的电缆，本文 27.5 kV 机车电缆附件在实际应用过程中会配套 95、120、240 mm^2 这 3 种截面积的电缆，将具体尺寸参数代入式(8)即可得到常温下电缆附件的界面压力值。实际电缆和附件参数及常温下界面压力值见表 5。

根据 3.3 节计算得到的熵弹性计算式(7)，可以计算得到不同扩张率下的界面压力在低温下的变化值。变温过程中实际电缆附件界面压力见图 12。

由图 12 所示，配套不同截面积电缆的电缆附件界面压力均随着温度的下降逐渐下降。其中配套 95 mm^2 的电缆附件界面压力在低温−40 ℃下会降至 0.092 MPa，这已经低于安全阈值 0.1 MPa，这表明电缆附件在极端低温环境下界面压力会出现不可靠，这也是其故障的主要诱因之一。

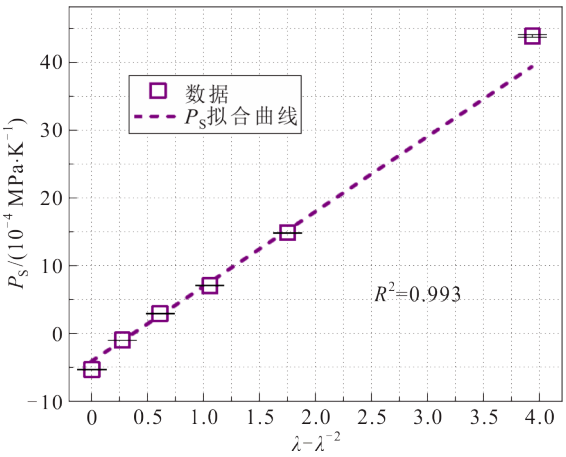


图 11 硅橡胶的 P_S~($\lambda-\lambda^{-2}$)线性拟合曲线(−40~25 ℃)

Fig.11 Linear fitting curve of P_S versus($\lambda-\lambda^{-2}$)

表 5 实际电缆和附件尺寸

Table 5 Parameters of actual cable and accessory

电缆截面积/mm^2	电缆外径/mm	附件内径/mm	附件厚度/mm	过盈量/mm	扩张率/%	常温下界面压力/MPa
95	32.40	23.90	29.55	4.25	135.56	0.151
120	34.70	23.90	29.55	5.40	145.19	0.191
240	38.00	23.90	29.55	7.05	159.00	0.250

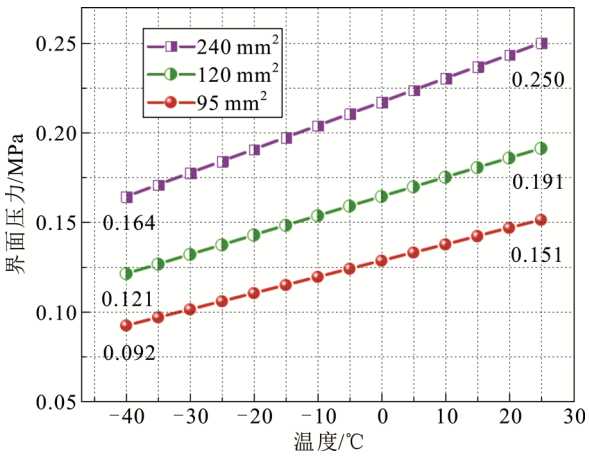


图 12 不同温度下实际电缆附件的界面压力变化

Fig.12 Curves of interface pressure between cable and accessory under variable temperatures

4 结论

1）低温下的应变诱导结晶效应会导致硅橡胶绝缘应力出现激增；同时结晶温度升高，且拉伸率越大，结晶温度越高。在附件常用安装扩径率(110%~150%)范围内，硅橡胶的低温结晶温度从−70.15 ℃升至−64.42 ℃，但仍低于常见的低温环境温度−40 ℃，不会影响橡胶绝缘的低温力学可靠性。但这也表明工程上电缆附件橡胶绝缘的选型应具有较低的结晶温度。

2）温度降低会导致拉伸率 150%的硅橡胶绝缘应力下降，且温度越低，应力下降越明显。从 25 ℃降低到−40 ℃，硅橡胶的归一化应力从 0.936 7 降

至 0.869 3，相较于恒定 25 ℃下降至 0.926 8，硅橡胶应力下降了 5.75%。

3）在常见低温环境温度范围内(−40~25 ℃)硅橡胶的应力随热力学温度降低成线性变化。在实际电缆附件硅橡胶绝缘应用过程中属于给定拉伸率下的变温过程，硅橡胶的应力变化仅由熵弹性贡献。熵弹性贡献应力由热膨胀效应、应力松弛效应、Gough-Joule 效应综合作用导致，利用橡胶状态方程计算熵弹性应力随拉伸率和温度变化的关系式为 $\sigma_s=11.070\times10^{-4}(\lambda-\lambda^{-2})T$。

4）恒定温度下，拉伸态的硅橡胶内部只存在应力松弛效应，拉伸率和温度越高，应力松弛越快。而在降温过程中，低拉伸率(λ=110%)下的硅橡胶应力由热膨胀效应主导，因此在降温过程中其应力增加，而中高拉伸率(125%≤λ≤400%)下的硅橡胶应力则由 Gough-Joule 效应起主导作用，所以其应力在降温过程中逐渐下降。这正是极端低温下电缆附件界面力学不可靠的原因。

5）实际 27.5 kV 电缆附件界面压力的计算结果表明配套 3 种截面积电缆的附件界面压力均随着温度下降逐渐下降，配套 95 mm^2 的电缆附件界面压力在低温−40 ℃下会降至安全阈值 0.1 MPa 以下，这表明极端低温环境下电缆附件界面压力会出现不可靠。

参考文献　References

[1] 方春华，孙奥琪，游海鑫，等. 基于非线性超声的电缆硅橡胶界面压力检测方法[J]. 高电压技术，2024，50(1)：313-321.
FANG Chunhua, SUN Aoqi, YOU Haixin, et al. Interface pressure detection method of cable silicone rubber based on nonlinear ultrasonic[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 313-321.

[2] SIT K, PRADHAN A K, CHATTERJEE B, et al. A review on characteristics and assessment techniques of high voltage silicone rubber insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1889-1903.

[3] 高　鹏，赵　儆，王钟颖，等. 电缆附件用硅橡胶的研究进展[J]. 有机硅材料，2024，38(5)：78-84.
GAO Peng, ZHAO Jing, WANG Zhongying, et al. Research progress of silicone rubber for cable accessories[J]. Silicone Material, 2024, 38(5): 78-84.

[4] 王　霞，余　栋，段胜杰，等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. 高电压技术，2018，44(8)：2710-2716.
WANG Xia, YU Dong, DUAN Shengjie, et al. Dealing with some key design problems in HV cable accessory[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2710-2716.

[5] 王　霞，樊卓杨，吴　超，等. 双光纤温度补偿法测量高温下电缆与附件界面压力的方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：3072-3081.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. Double-optical-fibre temperature compensation method used for interface pressure measurement between cable and accessory at high temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3072-3081.

[6] DI SANTE R, GHADERI A, MINGOTTI A, et al. Effects of thermal cycles on interfacial pressure in MV cable joints[J]. Sensors, 2020, 20(1): 169.

[7] 伊德伦，郑莹莹，蒋浩月，等. 计及硅橡胶应力松弛的电缆接头界面压力演变仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1043-1052.
YI Delun, ZHENG Yingying, JIANG Haoyue, et al. Simulation study of interfacial pressure evolution of cable joints considering stress relaxation of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1043-1052.

[8] LI Y, LIU Y M, DUAN P T, et al. A nondestructive measurement method for XLPE/SiR interface pressure of flexible cable terminal based on external deformation inversion calculation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(4): 2344-2354.

[9] 柳　松，彭嘉康，王　霞，等. 电缆附件的永久形变率与过盈量的关系研究[J]. 电工材料，2013(2)：49-54.
LIU Song, PENG Jiakang, WANG Xia, et al. Relationship between permanent deformation and shrink range in cable accessory[J]. Electrical Engineering Materials, 2013(2): 49-54.

[10] 韩圣斌，邓繁盛，李秀峰，等. 电缆终端用硅橡胶的绝缘松弛特性[J]. 高分子材料科学与工程，2024，40(12)：85-96.
HAN Shengbin, DENG Fansheng, LI Xiufeng, et al. Relaxation characteristics of silicone rubber insulation for cable terminations[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(12): 85-96.

[11] 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.

[12] 张世泽，彭　超，梁建权，等. 极寒环境下电缆 GIS 终端界面故障分析[J]. 高电压技术，2023，49(2)：546-553.
ZHANG Shize, PENG Chao, LIANG Jianquan, et al. Fault analysis of cable GIS terminal interface under extremely cold environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 546-553.

[13] LI Q, DU B X, KONG X X. Effect of extremely cold weather and shrinkage stress on interfacial discharge between epoxy and silicone rubber in HV cable terminations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2386-2393.

[14] 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.

[15] 白龙雷. 车载电缆终端绝缘破坏机理及局部放电特性研究[D]. 成都：西南交通大学，2020.
BAI Longlei. Research on insulation breakdown mechanism and partial discharge characteristics of EMU cable termination in high-speed railway[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2020.

[16] WANG S H, HOU M C, MA K, et al. Research on the influence of extremely cold environment on the performance of silicone rubber and fluorinated silicone rubber[J]. Polymers, 2022, 14(9): 1898.

[17] 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.

[18] WU C, WANG X, MIAO Z, et al. Effect of temperature on interface

pressure between cable and accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(4): 2324-2333.

[19] 王 霞，叶洵知，吴 超，等. 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[J]. 高电压技术，2023，49(2)：484-492.
WANG Xia, YE Xunzhi, WU Chao, et al. Relaxation characteristics of simulated interfacial pressure between locomotive cable and accessory under extreme ambient operating temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 484-492.

[20] 王 鑫，李超芹. 硅橡胶的结晶行为及动力学研究[J]. 橡胶工业，2023，70(5)：330-335.
WANG Xin, LI Chaoqin. Study on crystallization behavior and kinetics of silicon rubber[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(5): 330-335.

[21] 李泽瑞，周 凯，陶霰韬，等. 基于介观接触形貌分析的 XLPE-SiR 界面击穿特性[J]. 中国电机工程学报，2026，46(3)：1264-1273.
LI Zerui, ZHOU Kai, TAO Xiantao, et al. Breakdown characteristics analysis of XLPE-SiR interface based on mesoscale contact morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(3): 1264-1273.

[22] 谢 强，王晓游，傅明利，等. 高压电缆接头过盈配合及硅橡胶附件力学性能计算[J]. 高电压技术，2018，44(2)：498-506.
XIE Qiang, WANG Xiaoyou, FU Mingli, et al. Interference fit and mechanical property computation of silicone rubber accessory in HV cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 498-506.

[23] 李国倡，郭孔英，张家豪，等. 电缆附件用硅橡胶力-热老化特性及电-热-力多物理场耦合仿真研究[J]. 物理学报，2024，73(7)：070701.
LI Guochang, GUO Kongying, ZHANG Jiahao, et al. Stress-thermal aging properties of silicone rubber used for cable accessories and electric-thermal-stress multiple fields coupling simulation[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(7): 070701.

[24] 钱嘉伟. 考虑应变率效应的改性硅橡胶力学性能试验与建模研究[D]. 大连：大连理工大学，2024.
QIAN Jiawei. Experimental and modeling study on the mechanical property of modified silicone rubber considering strain rate effects[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2024.

[25] REY T, CHAGNON G, LE CAM J B, et al. Influence of the temperature on the mechanical behaviour of filled and unfilled silicone rubbers[J]. Polymer Testing, 2013, 32(3): 492-501.

[26] WARRICK E L. Crystallinity and orientation in silicone rubber. Ⅱ. Physical measurements[J]. Journal of Polymer Science, 1958, 27(115): 19-38.

[27] SOTTA P, ALBOUY P A. Strain-induced crystallization in natural rubber: Flory's theory revisited[J]. Macromolecules, 2020, 53(8): 3097-3109.

[28] TOBOLSKY A V, PRETTYMAN I B, DILLON J H. Stress relaxation of natural and synthetic rubber stocks[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1944, 17(3): 551-575.

[29] KRIMM S, TOBOLSKY A V. Quantitative X-ray studies of order in amorphous and crystalline polymers: scattering from various polymers and a study of the glass transition in polystyrene and polymethyl methacrylate[J]. Textile Research Journal, 1951, 21(11): 805-822.

[30] WILDSCHUT A J. On the proportion of crystalline and amorphous components in stretched vulcanized rubber[J]. Journal of Applied Physics, 1946, 17(1): 51-60.

[31] OHLBERG S M, ALEXANDER L E, WARRICK E L. Crystallinity and orientation in silicone rubber. I. X-ray studies[J]. Journal of Polymer Science, 1958, 27(115): 1-17.

[32] WANG Y D, WANG X, ZHENG D, et al. Influence mechanism and calculation methods of high temperature on interface pressure between cables and accessories[J]. High Voltage, 2025, 10(6): 1616-1626.

[33] ABU-ABDEEN M. Single and double-step stress relaxation and constitutive modeling of viscoelastic behavior of swelled and un-swelled natural rubber loaded with carbon black[J]. Materials & Design, 2010, 31(4): 2078-2084.

[34] 吴子文. 高聚物的热弹效应—Gough-Joule 效应[J]. 苏州丝绸工学院学报，1987(1)：86-89.
WU Ziwen. Relaxation characteristics of silicone rubber insulation for cable terminations[J]. Journal of Suzhou Institute of Silk Textile Technology, 1987(1): 86-89.

[35] 何曼君，张红东，陈维孝，等. 高分子物理[M]. 3 版. 上海：复旦大学出版社，2008.
HE Manjun, ZHANG Hongdong, CHEN Weixiao, et al. Polymer physics[M]. 3rd ed. Shanghai, China: Fudan University Press, 2008.



吴 超
1999—，男，博士生
主要从事电缆附件的介电和机械性能、绝缘破坏机理方面的研究工作
E-mail: ycangwu@163.com

WU Chao
Ph.D. candidate



王 霞(通信作者)
1976—，女，博士，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

WANG Xia
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-04-02 在线出版日期 2025-08-26 编辑 曹昭君