

电线电缆

WIRE & CABLE

主办单位:上海电缆研究所有限公司
1958年创刊, 线缆行业学术交流平台

- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- 中国期刊全文数据库全文收录期刊
- 中文科技期刊数据库(全文版)收录期刊
- CACJ中国应用型入库期刊



ISSN 1672-6901
CN 31-1392/TM



网址: jwc.cwc.net.cn
邮箱: wirecable@secr.com
电话: 021-5117 9609

基于主成分分析的氯化聚乙烯护套料低温性能快速评价方法

王玉峰 陈冬梅 梁斌 徐鹏飞 季飞 周佳龙 孙翠

Rapid Evaluation Method of Low-Temperature Performance for Chlorinated Polyethylene Sheathing Materials Based on Principal Component Analysis

WANG Yufeng, CHEN Dongmei, LIANG Bin, XU Pengfei, JI Fei, ZHOU Jialong, SUN Cui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20253044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特种移动电缆用超重型高强度高粘合性彩色氯化聚乙烯橡胶护套料的研制

Development of Extra-Heavy Duty and Adhesive Color Chlorinated Polyethylene Rubber Sheath for Special Mobile Cable
电线电缆. 2021, 64(2): 24-27 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.02.006>

热失重法快速评估交联聚乙烯材料热老化寿命的可靠性研究

Reliability Study on Rapid Evaluation of Thermal Aging Life of Cross-Linking Polyethylene by Thermogravimetry
电线电缆. 2021, 64(3): 16-18,27 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.03.005>

甲基丙烯酸锌在氯化聚乙烯/三元乙丙橡胶绝缘料中的应用

Application of Zinc Methacrylate in Chlorinated Polyethylene / Ethylene-Propylene-Diene Rubber Insulation
电线电缆. 2024, 67(6): 20-25,30 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202406004>

耐双油耐超低温低烟无卤橡胶护套料的研制

Development of Dual-Oil Resistant, Ultra Low Temperature and Low Smoke Halogen Free Rubber Sheathing Material
电线电缆. 2020, 63(5): 32-34,46 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2020.05.009>

软电线低温下动态弯折试验方法及产品研制

Test Method and Product Development of Flexible Wire Dynamic Bending Performance at Low Temperature
电线电缆. 2020, 63(3): 39-41 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2020.03.011>

EVA对聚乙烯基低烟无卤阻燃电缆护套材料性能的影响

Effect of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer on Properties of Low Smoke and Halogen Free Flame-Retardant Cable Sheathing Materials Based on Polyethylene
电线电缆. 2023, 66(4): 14-21 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202304004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



王玉峰, 陈冬梅, 梁斌, 等. 基于主成分分析的氯化聚乙烯护套料低温性能快速评价方法[J]. 电线电缆, 2025, 68(4): 38-45.

WANG Y F, CHEN D M, LIANG B, et al. Rapid evaluation method of low-temperature performance for chlorinated polyethylene sheathing materials based on principal component analysis[J]. Wire & Cable, 2025, 68(4): 38-45.

DOI: [10.16105/j.dxdl.1672-6901.20253044](https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20253044)

基于主成分分析的氯化聚乙烯护套料低温性能快速评价方法

王玉峰¹, 陈冬梅², 梁斌¹, 徐鹏飞¹, 季飞¹, 周佳龙¹, 孙翠¹

(1. 中天科技装备电缆有限公司, 南通 226010; 2. 青岛科技大学 高分子科学与工程学院, 青岛 266042)

摘要: 针对氯化聚乙烯电缆护套料低温性能评价方法的局限性, 提出一种基于主成分分析的多尺度联用快速评价体系。通过整合脆性温度(T_b)、低温回缩温度(T_R)、动态热机械分析玻璃化转变温度(T_{gDMA})及低温拉伸断裂伸长率(E_b)等数据, 发现在 T_b 、 T_{gDMA} 及 E_b 的组合中, 第1主成分(PC1)的贡献率为61.32%, PC1得分与低温扭转试验结果负相关($r=-0.83$); 在 T_b 、回缩率为10%时的低温回缩温度(T_{R10})及 E_b 的组合中, PC1的贡献率为48.65%, PC1得分与低温扭转试验结果正相关($r=0.63$)。结果表明, 该评价体系将测试周期缩短50%以上, 数据解释能力提升30%。尽管样本量较小($n=11$), 结论还需通过更大规模数据的验证, 但提出了一种基于主成分分析的多尺度联用低温性能评价框架, 为材料的快速筛选或配方与工艺的优化提供了新方法。

关键词: 低温性能; 氯化聚乙烯; 快速评价; 主成分分析; 动态热机械分析

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)04-0038-08

0 引言

随着全球能源结构向可再生能源转型, 深海风电与极地输配电工程规模持续扩大。极端低温环境下电缆护套材料的性能退化已成为制约电力系统可靠性的瓶颈问题。在深海电缆敷设和极地输配电等特殊场景中, 材料失效可能会引发绝缘击穿甚至系统瘫痪等重大事故^[1]。氯化聚乙烯(CM)凭借其独特的分子氯分布特性, 在耐候性、阻燃性及加工性能方面有显著优势^[2-3]。当环境温度低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, CM材料链段运动受阻会出现脆化、开裂等现象, 导致材料性能显著恶化, 严重威胁长期服役电缆的性能^[4]。

现有研究表明, CM低温性能受多尺度因素的协同影响, 包括分子链柔韧性^[5]、增塑剂体系^[6]、抗氧剂协同机制^[7]、填料分散性、界面相容性^[8]和交联网络调控^[9]等。然而, 当前电缆绝缘层低温性能评价体系难以适应新能源领域对高性能电缆护套材料的迫切需求, 在解析多因素耦合作用机制时存在显著不足: ①表征维度碎片化, 过度依赖脆性温度(T_b)或低温拉伸断裂伸长率(E_b)等单一指标, 难以解析复杂应力-温度耦合场中的失效机理^[10]; ②传统测试方法存在固有缺

陷, 如低温拉伸试验易受温度梯度($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动)与湿度敏感性(相对湿度大于60%时误差加剧)干扰, 数据离散系数高达0.25~0.30, 试验结果波动较大; ③成缆低温扭转试验($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下2000次循环验证)虽然能够模拟实际工况, 但单次测试成本高达3万元且耗时6~12 d^[11-13], 严重制约材料的研发效率。

针对上述问题, 本研究提出一种基于主成分分析(principal component analysis, PCA)的多尺度联用快速评价体系。通过整合热力学、动态力学、延展性等数据, 构建材料低温性能的多尺度集成表征模型; 通过PCA将高维数据线性变换降维的统计方法, 提取多尺度数据中的主要变异信息并量化各变量的贡献度^[14-19]。该评价体系的理论依据在于: ①低温性能受多因素协同影响, 单一指标难以全面评价; ②PCA可消除指标间的多重共线性, 提取核心主成分; ③动态力学参数, 如动态热机械分析玻璃化转变温度(T_{gDMA}), 与延展性指标(如 E_b)的协同分析可揭示分子链运动与宏观性能的关联机制。相较于传统单指标评价体系, 基于PCA的多尺度联用快速评价体系在测试效率、数据整合能力及模

型泛化性方面实现突破,可为材料开发及其性能优化提供理论支持。

1 试验部分

1.1 试验材料

测试对象: 氯的质量分数均为 35% 的 CM 硫化胶或成品电缆护套料, 共 11 组试样, 编号为

CM1~CM11。

在 CM1~CM11 这 11 组护套料试样中, 滑石粉、白炭黑、炭黑的添加量(质量分数)分别为 13.5%, 9.0%, 4.5%, 其他材料的添加量为 14.04%~14.50%, 变量包括 CM 基料牌号、增塑剂种类及添加量、交联剂种类及添加量, 以及加工工艺, 具体配方见表 1。

表 1 CM 护套料配方信息
Tab.1 Formulation information of CM sheathing materials

试样编号	CM添加量/%			POE添 加量/%	增塑剂添加量/%			交联体系添加量/%	
	CM135B	CM3590	CM8000		DOS	TOTM	DOTP	DCP	TAIC
CM1	45				0	2.7	8.1	1.58	1.58
CM2		45			0	4.5	6.3	1.35	1.35
CM3			45		0	6.3	4.5	1.35	1.35
CM4	45				8.1	2.7	0	1.35	1.58
CM5		45			0	5.4	5.4	1.35	1.35
CM6	45				8.1	2.7	0	1.35	1.58
CM7		45			5.4	5.4	0	1.35	1.35
CM8	45				8.1	2.7	0	1.35	1.35
CM9	45				8.1	2.7	0	1.35	1.58
CM10		45			0	5.4	5.4	1.35	1.58
CM11		33.8		11.2	2.7	8.1	0	1.35	1.35

注: 聚烯烃弹性体 (polyolefin elastomer, POE)、癸二酸二辛酯 (DOS)、偏苯三酸三辛酯 (TOTM)、对苯二甲酸二辛酯 (DOTP)、过氧化二异丙苯 (DCP)、三烯丙基异氰脲酸酯 (TAIC); CM4与CM6的配方相同, 但加工方式不同 (CM4为从成品电缆上切割取样, CM6为平板硫化)。

1.2 试验设备及方法

1) 低温回缩试验

试验设备: 低温回缩试验机, GT-7008-TR, 高铁检测仪器有限公司。试验条件: 按照 GB/T 7758—2020《硫化橡胶 低温性能的测定 温度回缩程序 (TR 试验)》进行测试, 试样长度为 (50.0±0.2) mm, 厚度为 (2.0±0.2) mm, 冷冻温度为 -65 ℃, 升温速率为 1 ℃·min⁻¹。记录试样在低温环境中拉伸变形后, 能够恢复至原始尺寸的最低临界温度; 回缩率达到 10%, 30%, 70% 时所对应的低温回缩温度(T_R)分别为 T_{R10} 、 T_{R30} 、 T_{R70} ; 温度越低表明材料的低温弹性恢复能力越强。

2) 低温脆性试验

试验设备: 橡塑低温脆性试验仪, MZ-4068, 江苏明珠试验机械有限公司。试验条件: 按照 GB/T 1682—2014《硫化橡胶 低温脆性的测定 单试样法》进行测试, 试样长度为 (25.0±0.5) mm, 宽度为 (6.0±0.5) mm, 厚度为 (2.0±0.2) mm, 测试温

度范围为 -70~23 ℃, 冲击速率为 (2.0±0.2) m·s⁻¹, 冷冻介质为无水乙醇。

3) 差示扫描量热分析

试验设备: 差示扫描量热仪, DSC3+, 梅特勒托利多科技有限公司。试验条件: 按照 GB/T 19466.1—2004《塑料 差示扫描量热法 (DSC) 第 1 部分: 通则》进行测试, 试样质量为 5~10 mg, 扫描温度范围为 -100~180 ℃, 升温速率为 10 K·min⁻¹, 氮气氛围, 流量为 50 mL·min⁻¹。

4) 动态热机械分析

试验设备: 动态热机械分析仪, DMA1, 梅特勒托利多科技有限公司。试验条件: 按照 ASTM E1640-18 进行测试, 试样规格为 6.00 mm×6.00 mm×2.00 mm, 扫描温度范围为 -120~50 ℃, 升温速率为 3 K·min⁻¹, 频率为 1 Hz, 振幅为 10.00 μm。动态热机械分析 (dynamic thermomechanical analysis, DMA) 法测得的 tan δ 为材料的损耗因子, 其峰值对应的温度(T_{gDMA})通常被认为是材料的玻璃化

转变温度(T_g);其半峰宽(F_{wmh})反映材料分子结构的均匀性或多分散性。 F_{wmh} 较窄通常表示材料的分子结构相对均匀,分子链段的运动较为一致,玻璃化转变过程较为集中;相反, F_{wmh} 较宽则意味着材料的分子结构存在较大的差异,可能存在不同分子量、不同链段长度或不同交联程度的区域,导致分子链段在不同温度下发生玻璃化转变,从而使 F_{wmh} 变宽。

5) 低温拉伸试验

试验设备:低温拉伸试验仪, DYL-III, 扬州市精艺试验机械有限公司。试验条件:按照 GB/T 2951.14—2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第14部分:通用试验方法——低温试验》进行测试,试样规格为50.00 mm×4.00 mm×1.00 mm,试验温度为-40℃,冷冻时间为4 h。

6) 低温扭转试验

试验设备:低温扭转试验仪,常熟市环境试验设备有限公司。试验条件:按照 GB/T 29631—2013《额定电压1.8/3 kV及以下风力发电用耐扭曲软电缆》中附录B进行,测试温度为-40℃,试样长度为12 m,扭转角度为±1080°。

1.3 数据处理与分析

1) 数据预处理

所有原始数据均采用 Z-score 标准化方法消除量纲差异,计算公式为

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

式中: Z_{ij} 为第*i*个样本第*j*个指标的标准化值; X_{ij} 为原始数据; μ_j 和 σ_j 分别为第*j*个指标的均值和标准差。

2) 皮尔逊相关性分析

通过计算皮尔逊相关系数(r)评估各低温性能指标间的线性相关性,计算公式为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为两个变量的第*i*个观测值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为均值; n 为样本数,取值11。显著性水平通过双尾检验判定, $p < 0.05$ 为显著相关; $p < 0.01$ 为极显著相关。

3) 主成分分析

基于标准化数据构建协方差矩阵,通过特征值分解提取主成分。主成分贡献率(CR)计算公式为

$$CR_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: λ_k 为第*k*个主成分的特征值; m 为变量总数。主成分得分(S_{ik})通过载荷矩阵与标准化数据线性组合计算为

$$S_{ik} = \sum_{j=1}^m L_{kj} \cdot Z_{ij} \quad (4)$$

式中: L_{kj} 为第*k*个主成分在第*j*个变量上的载荷。

4) 关键指标筛选

通过主成分载荷矩阵分析各变量对主成分的贡献度,筛选载荷绝对值大于0.5的指标作为核心变量,并结合累计贡献率大于80%,确定主成分数量。

2 结果和讨论

将11组CM护套料试样的 T_b 、 T_R 、 T_g 、 E_b 及低温扭转试验数据汇总于表2中,可直观了解各试样在低温环境下的性能表现。

2.1 低温性能指标相关性分析

通过皮尔逊相关系数,分析各指标间的相关性,结果见表3。由表3可知,不同测试方法对材料低温性能的响应存在显著差异。 T_b 与 T_{gDMA} 呈现强正相关($r=0.742$),表明动态载荷下链段运动受限是脆性行为的关键诱因,符合高分子材料动态力学理论。 T_b 与 T_{gDSC} 呈现弱相关($r=0.140$),表明静态热力学行为(如比热容变化)与脆性断裂的微观机制关联性较低,分析其原因为DSC检测的是样本整体热力学响应,而脆性行为更依赖于局部链段运动受限(如填料团聚导致的应力集中)。此外, T_b 与 E_b 呈现中等负相关($r=-0.337$),说明增塑剂分布或分子链延展性可通过削弱分子间作用力提升链段活动性,从而降低 T_b 并提高 E_b 。

由表3还可知, T_{R10} 与 T_{R30} ($r=0.880$)、 T_{R30} 与 T_{R70} ($r=0.851$)均呈现强正相关,表明氯的质量分数为35%的CM护套料的回缩行为主要受分子链弹性恢复能力的统一机制调控。值得注意的是, T_{R70} 与 E_b 的中等正相关($r=0.579$)提示增塑剂或链段活动性的提升可协同改善材料的回弹性与延展性。动态热机械分析中, F_{wmh} 与 T_b 中等正相关($r=0.579$),表明材料均一性差(如相分离或填料团聚)会加剧低温脆化风险。

2.2 主成分分析关键性能指标筛选

为筛选核心评价指标,对变量进行组合,组合选择基于低温性能的多尺度特性,涵盖热力学(T_{gDSC})、动态力学(T_{gDMA})、弹性恢复(T_{R10})及延展性(E_b)指标,旨在解析不同机制对脆性(T_b)的协同影响。对4组变量组合进行主成分分析,主

表 2 CM 护套料低温性能数据汇总

Tab.2 Summary of low-temperature performance data of CM sheathing materials

试样编号	$T_b/^{\circ}\text{C}$	$T_R/^{\circ}\text{C}$			$T_g/^{\circ}\text{C}$		DMA法 $\tan \delta$ 峰宽 (F_{whm}) / $^{\circ}\text{C}$	$E_b/\%$	低温扭转 试验
		T_{R10}	T_{R30}	T_{R70}	DSC法 ($T_{g\text{DSC}}$)	DMA法 $\tan \delta$ 峰值 ($T_{g\text{DMA}}$)			
CM1	-27	-23.5	-16.4	-3.9	-40.37	-19.47	27.34	100	F
CM2	-20	-16.1	-6.3	10.0	-38.54	-13.66	41.07	150	F
CM3	-31	-17.3	-7.8	9.1	-39.70	-20.13	24.17	113	NA
CM4	-31	-23.3	-13.4	4.0	-38.37	-19.28	23.01	227	P
CM5	-36	-20.4	-9.1	2.2	-38.34	-21.81	28.06	117	P
CM6	-32	-24.3	-15.3	-4.5	-40.19	-19.62	23.82	147	NA
CM7	-33	-18.5	-7.8	2.8	-41.69	-24.01	23.10	117	P
CM8	-36	-21.6	-9.9	1.8	-36.18	-18.84	22.70	73	NA
CM9	-36	-24.3	-13.9	0.3	-39.35	-21.30	23.76	133	P
CM10	-39	-18.7	-6.4	6.6	-41.84	-22.96	24.80	250	P
CM11	-28	-28.0	-14.1	0.3	-40.29	-21.00	22.06	67	NA

注：在低温扭转试验中，F为未通过；P为通过；NA为未检测。

表 3 CM 护套料低温性能指标相关系数矩阵

Tab.3 Correlation coefficient of low-temperature performance indicators for CM sheathing materials

参数	T_b	T_{R10}	T_{R30}	T_{R70}	$T_{g\text{DSC}}$	$T_{g\text{DMA}}$	F_{whm}	E_b
T_b	1.000							
T_{R10}	-0.004	1.000						
T_{R30}	-0.191	0.880**	1.000					
T_{R70}	0.057	0.773**	0.851**	1.000				
$T_{g\text{DSC}}$	0.140	-0.175	-0.164	-0.056	1.000			
$T_{g\text{DMA}}$	0.742**	0.161	-0.028	0.252	0.478	1.000		
F_{whm}	0.579*	0.538	0.388	0.447	0.078	0.721**	1.000	
E_b	-0.337	0.505	0.464	0.579	-0.124	-0.025	0.194	1.000

注：*为在0.05水平上显著相关，**为在0.01水平上极显著相关（双尾检验，样本数为11，自由度为9）。

成分特征值及贡献率结果见表 4, PC1 载荷矩阵及与低温扭转试验结果的相关系数见表 5。

1) 组合 1(T_b 、 T_{R10} 及 $T_{g\text{DSC}}$)中, PC1 贡献率(39.48%)及累计贡献率(72.78%)均较低,表明单一热力学指标难以全面解析低温性能的复杂机制。

2) 组合 2(T_b 、 T_{R10} 及 $T_{g\text{DMA}}$)中, PC1 贡献率显著提升至 58.37%, 载荷矩阵中 $T_{g\text{DMA}}$ (0.71)与 T_b (0.69)强正相关, T_{R10} (0.17)贡献较弱。动态力学参数($T_{g\text{DMA}}$)的高载荷表明其能够更敏感地反映低温下分子链段运动的受限程度,与脆性(T_b)直接相关。PC1 和 PC2 累计贡献率显著提高(91.77%), PC1 得分与低温扭转试验结果负相关($r=-0.61$),验证了动态力学参数在低温性能

评价中的核心地位。

3) 组合 3(T_b 、 T_{R10} 及 E_b)中, PC1 贡献率为 48.65%, 载荷矩阵显示 E_b (0.71)与 T_b (-0.57)负相关,表明高延展性显著降低脆性温度。PC1 得分与低温扭转试验结果正相关($r=0.63$),验证了延展性对低温韧性的提升作用。

4) 组合 4(T_b 、 $T_{g\text{DMA}}$ 及 E_b)中, PC1 贡献率最高(61.32%), 载荷矩阵显示 $T_{g\text{DMA}}$ (0.63)与 E_b (-0.35)负相关, T_b (0.70)正向贡献。该组合表明, $T_{g\text{DMA}}$ 降低与延展性(E_b)提升协同抑制脆性(T_b)。PC1 和 PC2 累计贡献率最高(93.18%), PC1 得分与低温扭转试验结果显著负相关($r=-0.83$),表明该组合对低温性能的预测能力最优。

表 4 基于多尺度变量的 CM 护套料低温性能主成分特征值及贡献率

Tab.4 Principal component eigenvalues and contribution rates of multi-scale variables for low-temperature performance of CM sheathing materials

序号	组合变量	第1主成分 (PC1)		第2主成分 (PC2)		累计贡献率/%
		特征值	贡献率/%	特征值	贡献率/%	
组合1	T_b 、 T_{R10} 及 T_{gDSC}	1.0766	39.477	0.9082	33.300	72.777
组合2	T_b 、 T_{R10} 及 T_{gDMA}	1.5920	58.374	0.9107	33.394	91.768
组合3	T_b 、 T_{R10} 及 E_b	1.3268	48.649	0.9058	33.213	81.862
组合4	T_b 、 T_{gDMA} 及 E_b	1.6725	61.324	0.8688	31.857	93.181

表 5 基于多尺度变量的 CM 护套料低温性能 PC1 载荷矩阵及 PC1 得分与低温扭转试验结果的相关系数

Tab.5 PC1 loading matrix of multi-scale variables for low-temperature performance of CM sheathing materials and correlation coefficient between PC1 scores and experimental results of low-temperature torsion

序号	组合变量	T_b	T_{R10}	T_{gDSC}	T_{gDMA}	E_b	PC1得分与低温扭转试验结果的相关系数
组合1	T_b 、 T_{R10} 及 T_{gDSC}	0.6997	-0.1094	0.7060	—	—	-0.58
组合2	T_b 、 T_{R10} 及 T_{gDMA}	0.6855	0.1718	—	0.7075	—	-0.61
组合3	T_b 、 T_{R10} 及 E_b	-0.5695	0.4214	—	—	0.7057	0.63
组合4	T_b 、 T_{gDMA} 及 E_b	0.6969	—	—	0.6276	-0.3471	-0.83

2.3 变量组合的物理机制解析

不同变量组合揭示了材料低温性能的多维度调控机制。

1)热力学与动态力学协同(组合1和组合2)。 T_b 与 T_{gDMA} 的强正相关(组合2, $r=0.742$)表明,动态载荷下链段运动能力是脆性行为的主要驱动力,但单一热力学指标(如 T_{gDSC})数据解释能力有限。

2)延展性主导机制(组合3)。 E_b 作为核心变量,直接反映了分子链柔性 with 增塑剂分布对脆性行为抑制的贡献,但其数据解释能力受限于未整合动态力学信息。

3)多尺度协同优化(组合4)。整合动态热机械分析(T_{gDMA})与延展性(E_b)的变量组合,贡献率最高(61.32%),表明低温性能优化需要兼顾链段活动性与分子延展性的协同作用。

2.4 与传统方法的对比

传统单指标方法存在局限性,仅能反映材料某一方面的性能,数据解释能力有限。例如, T_b 与低温扭转试验结果的相关系数较低。然而,PCA能够通过降维整合多个指标,集中解释数据中的主要变异,有效弥补了这一不足。传统单指标方法仅能解释约30%的方差,相比之下,本研究提出的新模型仅通过PC1就可解释61%的方

差,数据解释能力相对提升约30%。

在测试效率方面,传统单指标方法如低温扭转试验,耗时长达6~12 d。本研究提出的基于PCA的多尺度联用评价体系,通过量化关键指标权重实现了高效预测。以组合4为例,PC1的贡献率高达61.32%,这意味着仅需 T_b 、 T_{gDMA} 及 E_b 这3项指标,就能够有效评估材料的低温性能,不仅将测试周期缩短了50%以上,还显著降低了试验成本。

2.5 配方变量与低温性能的关联分析

通过对比表1(试样配方)与表2(性能数据),发现配方和加工工艺对低温性能有显著影响。例如,增塑剂种类及用量对低温延展性(E_b)和脆性温度(T_b)影响显著。TOTM与DOTP复合增塑体系(如CM10中TOTM+DOTP各5.4%)在平衡链段运动性与增塑效率方面表现更优,其 $T_b(-39\text{ }^{\circ}\text{C})$ 和 $E_b(250\%)$ 均为最优。CM4(成品电缆切割)与CM6(平板硫化)配方相同,但 E_b 差异显著(227%与147%),表明硫化工艺可能引起分子链取向或交联网络分布差异,进而影响延展性。CM11引入POE后, E_b 降至67%(全组最低),但 $T_b(-28\text{ }^{\circ}\text{C})$ 优于部分试样(如CM2的 $T_b=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。这表明弹性体虽能通过增强分子链缠结提升低温韧性,但过量引入则牺牲延展性。

2.6 研究局限与展望

该评价体系虽然是基于氯的质量分数为35%的CM护套料开发的,但其方法架构具有跨配方与材料的普适性。首先,通过Z-score标准化消除变量量纲差异后,主成分权重反映指标间固有关联性(如 T_b 与 E_b 负相关, $r=-0.34$),而非氯的特定质量分数的绝对值。即使氯化度变化导致分子链刚性(T_{gDMA} 上升)或增塑剂相容性(E_b 下降)偏移,PCA仍可提取共性主成分(如PC1贡献率大于60%),通过权重调整适配不同配方。其次,低温性能的核心调控路径(链段运动受限、应力集中与延展性竞争)是高分子材料的共性特征。例如,增塑剂对链段活动性的提升、填料分散性对应力分布的优化等机制,在三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)、POE等材料中同样成立。最后,通过整合热力学、动态力学及力学性能数据,构建从分子运动到宏观断裂的多尺度表征模型,其本质是通过统计降维量化多参数协同效应,不依赖具体化学组成,可推广至橡胶、热塑性弹性体等材料的低温性能评价。这一框架为高分子材料的性能预测与配方设计提供了标准化分析工具。

然而,需指出本研究的局限性:尽管本研究初步验证了模型的可行性,但样本量较小($n=11$)可能影响统计结果的普适性。未来需扩展不同氯的质量分数(25%~45%)的CM样本试验数据,并引入微观结构与形貌表征(如扫描电子显微镜SEM、原子力显微镜AFM)以明确变量间的物理关联。此外,动态力学与延展性的协同机制需要结合分子动力学模拟进一步定量解析,以指导配方设计与工艺优化。

3 结 论

该研究通过PCA揭示了CM护套料低温性能的关键评价指标。 T_b 、 T_{gDMA} 及 E_b 组合中,PC1得分与低温扭转试验结果显著负相关($r=-0.83$),反映动态力学分子链段活动性(T_{gDMA})与延展性(E_b)共同抑制脆性(T_b),且贡献率最高(61.32%); T_b 、 T_{R10} 及 E_b 组合中,PC1得分与低温扭转试验结果正相关($r=0.63$),表明高延展性(E_b)与低脆性(T_b)协同提升材料低温韧性。

上述结论表明,不同变量组合可通过互补机制(动态黏弹转变特性和延展性)预测低温性能,为工程实践中快速筛选材料、优化配方与工艺提供理论依据。未来研究需要结合微观结构与

形貌分析,进一步验证变量间的物理关联,并优化模型普适性。需要指出的是,该研究样本量较小($n=11$),结论的可靠性需要通过更大规模数据的验证,但研究提出了一种基于PCA的多尺度联用低温性能评价框架。

参考文献 References

- [1] 吴长顺. 电线电缆手册 第2册 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
WU C S. Handbook of electric wires and cables Volume 2[M]. 3rd edition. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [2] 任鹤, 王文燕, 张瑞, 等. 氯化聚乙烯生产现状及HDPE专用树脂开发进展 [J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(1): 60-63.
REN H, WANG W Y, ZHANG R, et al. Production status of chlorinated polyethylene and development progress of HDPE special resin[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(1): 60-63.
- [3] 朱岩. 橡胶型氯化聚乙烯基础树脂的开发与应用 [J]. 炼油与化工, 2022, 33(6): 69-72.
ZHU Y. Development and application of rubber chlorinated polyethylene base resin[J]. Refining and Chemical Industry, 2022, 33(6): 69-72.
- [4] 许建雄. 氯化聚乙烯在电线电缆中的应用 [M]. 1版. 北京: 化学工业出版社, 2018.
XU J X. Applications of chlorinated polyethylene in wires and cables[M]. 1st edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [5] 夏茹, 舒俊杰, 陈晋阳, 等. 不同牌号氯化聚乙烯橡胶的结构与性能剖析 [J]. 合成橡胶工业, 2017, 40(4): 275-279.
XIA R, SHU J J, CHEN J Y, et al. Analysis of structure and properties of chlorinated polyethylene rubber with different brands[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2017, 40(4): 275-279.
- [6] 付文, 龙燕, 张丽燕, 等. 不同增塑剂对氯化聚乙烯电缆护套的性能影响 [J]. 精细石油化工, 2018, 35(4): 17-21.
FU W, LONG Y, ZHANG L Y, et al. Effect of different plasticizers on properties of chlorinated polyethylene cable sheath[J]. Speciality Petrochemicals, 2018, 35(4): 17-21.
- [7] 邓一权, 柯凯. 甲基丙烯酸锌在氯化聚乙烯/三元乙丙橡胶绝缘料中的应用 [J]. 电线电缆, 2024, 67(6): 20-25.
DENG Y Q, KE K. Application of zinc methacrylate in chlorinated polyethylene/ethylene-propylene-diene rubber insulation[J]. Wire & Cable, 2024, 67(6): 20-25.
- [8] 甘胤嗣, 夏明慧, 蒋正勇. 特种移动电缆用超重型高强度高粘合性彩色氯化聚乙烯橡胶护套料的研制 [J]. 电

- 电线电缆, 2021(2): 24-27.
- GAN Y S, XIA M H, JIANG Z Y. Development of extra-heavy duty and adhesive color chlorinated polyethylene rubber sheath for special mobile cable[J]. *Wire & Cable*, 2021(2): 24-27.
- [9] 孔德忠. 氯化聚乙烯橡胶配方设计研究进展 [J]. *塑料助剂*, 2019(6): 10-14.
- KONG D Z. Research progress in formulation design for CPE[J]. *Plastics Additives*, 2019(6): 10-14.
- [10] SUN W, CAI Y G, FENG Y M, et al. Development of material formula and structure property indicators for low cold-resistant characterization of cables' material[C]// 2nd International Conference on New Material and Chemical Industry (NMC12017), November 18-20, 2017, Sanya, China. Bristol: IOP Publishing, 2017: 012066.
- [11] 姚骞, 徐鹏飞, 季飞, 等. 耐寒耐扭转 35 kV 风能软电缆低温耐扭转性能设计 [J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2023(5): 17-20.
- YAO Q, XU P F, JI F, et al. Design of low temperature torsion resistance of 35 kV wind power flexible cable with cold resistance and torsion resistance[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2023(5): 17-20.
- [12] 王伊雷, 周旭芝, 邹鹏飞, 等. MV105 低温耐扭高阻燃风缆的研制 [J]. *电线电缆*, 2017(1): 11-12.
- WANG Y L, ZHOU X Z, ZOU P F, et al. Development of MV105 low temperature torsion-resistance fire-resistance wind power cable[J]. *Wire & Cable*, 2017(1): 11-12.
- [13] 姚骞, 顾小刚, 徐鹏飞, 等. 高强度耐扭转防霉菌风能电缆的研制 [J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2022(1): 24-27.
- YAO Q, GU X G, XU P F, et al. Development of high-strength torsion-resistant and anti-mold wind power cable[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2022(1): 24-27.
- [14] BEATTIE J R, ESMONDE-WHITE F W L. Exploration of principal component analysis: Deriving principal component analysis visually using spectra[J]. *Applied Spectroscopy*, 2021, 75(4): 361-375.
- [15] KOVÁCS R L, CSONTOS M, GYÖNGYÖSI S, et al. Surface characterization of plasma-modified low density polyethylene by attenuated total reflectance Fourier-transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy combined with chemometrics[J]. *Polymer Testing*, 2021, 96: 107080.
- [16] WATANABE R, SUGAHARA A, HAGIHARA H, et al. Three-way evolved gas analysis-mass spectrometry combined with principal component analysis (EGA-MS-PCA) to probe interfacial states between matrix and filler in poly(styrene-b-butadiene-b-styrene) (SBS) nanocomposites[J]. *Polymer Testing*, 2021, 101: 107300.
- [17] HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ J, YOLEIMA G, ESPINOSA E. Development and application of a principal component analysis model to quantify the green ethylene content in virgin impact copolymer resins during their synthesis on an industrial scale[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30: 4800-4808.
- [18] SHAH K, TALAMADUPULA K K, ACAR P, et al. Reduced-order model for multiphysics simulations of CNT/polymer composites via principal component regression and artificial neural networks[J]. *Computational Materials Science*, 2024, 244: 113200.
- [19] OLFATBAKHSHT T, ANDREWS J L, MILANI A S. Materials informatics of woven fabric composites: Effect of different dimensionality reduction and learning methods[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 103971.

收稿日期: 2025-02-15

修回日期: 2025-03-16

作者简介:



王玉峰 WANG Yufeng
1990—, 男, 工程师
主要从事电缆用橡胶材料研发工作
E-mail: wangyf@ztt.cn



陈冬梅 CHEN Dongmei (通信作者)
1972—, 女, 高级实验师
长期从事高分子材料微观结构与性能表征研究, 聚焦橡塑材料构效关系解析及工程应用基础
E-mail: cdm321@126.com

Rapid Evaluation Method of Low-Temperature Performance for Chlorinated Polyethylene Sheathing Materials Based on Principal Component Analysis

WANG Yufeng¹, CHEN Dongmei², LIANG Bin¹, XU Pengfei¹, JI Fei¹, ZHOU Jialong¹, SUN Cui¹

(1. Zhongtian Technology Industrial Wire & Cable System Co., Ltd., Nantong 226010, China; 2. College of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: To address limitations of existing evaluation methods for the low-temperature performance of chlorinated polyethylene cable sheathing materials, a rapid multi-scale evaluation system based on principal component analysis (PCA) was proposed. By integrating data from brittleness temperature (T_b), temperature retraction (T_R), glass transition temperature by dynamic mechanical analysis (T_{gDMA}), and elongation at break in low temperature (E_b), the following findings were obtained. In the combination of T_b , T_{gDMA} and E_b , contribution rate of PC1 could reach 61.32%, with PC1 scores exhibiting a negative correlation with low-temperature torsion test results ($r=-0.83$). While, in the combination of T_b , temperature retraction at 10% (T_{R10}) and E_b , contribution rate of PC1 was 48.65%, and PC1 scores showed a positive correlation with low-temperature torsion test results ($r=0.63$); Results showed that the model could reduce testing time by over 50% and improve data interpretability by 30%. Although the limited sample size ($n=11$) necessitated validation with larger datasets, the proposed multi-scale evaluation framework for low-temperature performance based on PCA could provide an innovative methodological reference for rapid material screening or optimization of formulations and processing techniques.

Key words: low-temperature performance; chlorinated polyethylene; rapid evaluation; principal component analysis (PCA); dynamic thermomechanical analysis (DMA)