

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@secri.com

电话: 021-5117 9609

交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套铜芯电缆性能优化

王勤伟 陆浩 许雪章 王泽远 张黄芳 张培良

Performance Optimization of Cross Linked Polyethylene Insulated Polyvinyl Chloride Sheathed Copper Core Cables

WANG Qinwei, LU Hao, XU Xuezhang, WANG Zeyuan, ZHANG Huangfang, ZHANG Peiliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240210>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采煤机电缆用三元乙丙橡胶绝缘材料的研究

Research on EPDM Insulation Material for Shearer Cables

电线电缆. 2023, 66(6): 17-20,25 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202306004>

数据拟合方法对电缆绝缘材料寿命预测的影响

The Influence of Data Fitting Method on Life Prediction of Cable Insulation Materials

电线电缆. 2023, 66(4): 5-10 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202304002>

110kV高压铝护套电缆结构设计优化

Optimization Structure Design of 110 kV High Voltage Power Cable with Aluminum Sheath

电线电缆. 2023, 66(2): 59-62 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202302013>

0.6/1 kV绕包型B₁级低烟无卤阻燃电力电缆的研制

Development of 0.6/1 kV Wrapped Type Low-Smoke Halogen-Free Power Cable with Class B₁ Flame Retardant

电线电缆. 2025, 68(3): 62-68 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240199>

电缆绝缘和护套用自修复材料研究进展

Research Progress of Self-Healing Materials for Cable Insulation and Sheath

电线电缆. 2022, 65(4): 1-5,21 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202204001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



王勤伟, 陆浩, 许雪章, 等. 交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套铜芯电缆性能优化[J]. 电线电缆, 2025, 68(5): 50-54.

WANG Q W, LU H, XU X Z, et al. Performance optimization of cross linked polyethylene insulated polyvinyl chloride sheathed copper core cables[J]. Wire & Cable, 2025, 68(5): 50-54.

DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240210

交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套铜芯电缆性能优化

王勤伟¹, 陆浩^{1,2}, 许雪章¹, 王泽远¹, 张黄芳¹, 张培良¹

(1. 泰山电缆集团有限公司, 嘉兴 314303; 2. 南昌大学资源与环境学院, 南昌 330038)

摘要: 为进一步提高交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套铜芯电缆的安全性和稳定性, 以 YJV-0.6/1 kV 4×120 mm² 为例, 对电缆的结构、材料进行优化, 并通过热延伸、热收缩, 以及护套失重、高温压力、低温拉伸等试验对优化前后的绝缘材料和护套材料进行验证。结果表明, 优化后电缆绝缘材料的热延伸、热收缩, 以及护套材料的失重、高温耐压、低温拉伸等性能均优于改进前, 其中载荷下伸长率由 64% 降至 40%, 冷却后永久伸长率由 6% 降为零, 收缩率由 2% 降至 1%, 护套失重由 0.67 mg·cm⁻² 降至 0.45 mg·cm⁻², 压痕深度由 34% 降至 22.5%, 断裂伸长率由 135% 提高到 180%。试验结果表明, 电缆的安全性和稳定性显著提高。

关键词: 电缆; 性能优化; 绝缘材料; 护套材料

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)05-0050-05

0 引言

电线电缆种类繁多, 应用范围十分广泛, 涉及到电力、建筑、通信、制造等行业, 与国民经济的各个部门密切相关^[1-2]。随着科技的进步、传统产业的转型升级、战略性新兴产业和高端制造业的大力发展, 我国经济社会进一步向安全环保、低碳节能、信息化、智能化方向发展, 国家智能电网建设、现代化城市建设、城乡电网大面积改造、新能源电站建设等领域均对电线电缆的应用提出了更高要求^[3]。

为应对电线电缆行业的发展机遇, 相关学者从材料^[4-10]和结构^[11-15]等方面对电缆进行优化。李磊^[11]基于 GB/T 11017.2—2014《额定电压 110 kV ($U_m=126$ kV) 交联聚乙烯绝缘电缆及其附件 第 2 部分: 电缆》和 ICEA S-108-720—2018 设计了 110 kV 常规结构和优化结构的高压电缆, 并通过性能测试验证了结构优化后电缆性能的提升效果。范在乾等^[16]通过仿真和试验对 35 kV 冷缩式电缆终端的结构参数进行优化, 以提高其绝缘水平。李亚鹏^[17]分析采煤机电缆使用过程中的问题, 并通过电缆的结构优化解决。谢静等^[18]通过聚丙烯绝缘电缆绝缘材料改性、导体结构优化及挤出设备升级改进, 研制了新型环保聚丙烯绝缘电缆。

为满足新兴技术的发展和应用程序的不断扩展, 电线电缆性能也面临新的挑战。其中, 电缆材料是影响电线电缆运行安全和使用寿命的关键因素之一。谢占宇等^[19]和刘敏等^[20]研究船用电缆的老化状态, 并采用不同方法评估热老化对电缆寿命的影响, 结果均发现热老化条件下, 电缆材料性能逐渐下降, 进而影响电缆寿命。邵梦春等^[21]通过试验发现聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC) 材料的抗张强度与断裂伸长率随温度升高呈现先增大后减小的趋势, 交联聚乙烯 (cross-linked polyethylene, XLPE) 材料的抗张强度随温度升高而减小, 而断裂伸长率在 21~24 °C 时离散性最小。杨代勇等^[22]结合护套材料挤出工艺、外部拉力等因素分析护套开裂原因, 并对电缆进行仿真分析, 提出低温敷设过程中防止电缆护套开裂的措施。因此, 有必要对电缆的性能优化进行进一步研究。

本文从材料和结构等方面对 XLPE 绝缘 PVC 护套铜芯电缆进行优化, 重点提升其安全性、稳定性, 以及对恶劣环境的适应性, 延长电缆使用寿命, 并按照 GB/T 12706.1—2020《额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 挤包绝缘电缆及附件 第 1 部分: 额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV) 和 3 kV ($U_m=3.6$ kV) 电缆》对优化前后的电缆进行性能验证。

1 试验部分

1.1 电缆优化设计

针对 XLPE 绝缘 PVC 护套铜芯电缆, 以 YJV-0.6/1 kV 4×120 mm² 为例, 优化结构设计, 以及绝缘材料和护套材料配方。

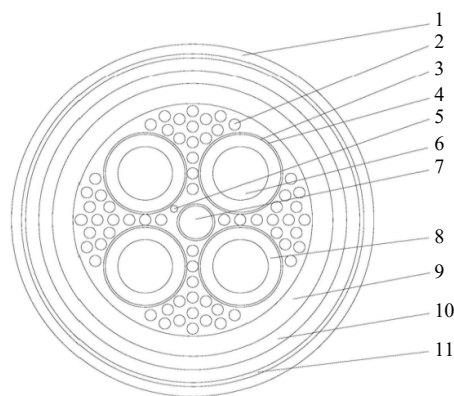
1) 结构设计。改进前电缆线芯由 24 根标称直径为 2.52 mm 的金属导体绞合, 改进后则采用 37 根直径为 2.03 mm 的铜丝绞合。此外, 在主缆中心处设由热固性聚乙烯 (polyethylene, PE) 塑料管制成的通风冷却管。XLPE 绝缘 PVC 护套铜芯电缆优化后的结构示意图见图 1。

2) 绝缘材料配方优化。绝缘材料以树脂、二辛脂为主料, 加入增韧剂、白石蜡、氯化石蜡、丁晴橡胶、高岭土、抗氧化剂、阻燃剂、抗紫外线粉剂、稳定剂等, 制备成绝缘材料。

3) 护套材料配方优化。通过调整聚氯乙烯树脂、纳米钙、热稳定剂、增塑剂、丙烯酸酯 (acrylicester, ACR) 共聚物 (甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸乙酯、丙烯酸丁酯及苯乙烯四种单体共聚而成的核-壳共聚物, 简称 ACR 树脂)、PE 蜡、阻燃剂、塑化剂、环保稳定剂 (钙锌复合稳定剂) 等组份的配比优化护套材料配方。

1.2 试验方法

电线电缆的结构, 以及绝缘材料和护套材料的配方对电缆的安全性和可靠性起着至关重要



1—第三塑料套; 2—填充条; 3—线芯; 4—无纺布层; 5—辅助管;
6—导体; 7—冷却管; 8—绝缘套; 9—第一塑料套; 10—第二塑料套;
11—辅助金属丝。

图 1 XLPE 绝缘 PVC 护套铜芯电缆优化后的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of XLPE insulated PVC sheathed copper core cables after optimization

的作用。由于目前设备无法实时监测电缆温度, 因此本文暂不验证结构优化对电缆的影响, 分别对优化前后绝缘材料进行热延伸试验和热收缩试验, 并对优化前后的护套材料进行失重试验、高温压力试验、低温拉伸试验, 验证优化效果。

优化前后试验的取样、制样和试验均按照 GB/T 2951 系列标准进行, 并参照 GB/T 12706.1—2020 的要求进行评价, 具体试验项目和标准要求见表 1。

表 1 试验项目和标准要求
Tab.1 Test items and standard requirements

试验项目	参考标准	试验条件	试验要求
热延伸试验	GB/T 2951.11—2008	温度为 197~203 ℃, 拉力为 20 N·cm ⁻²	载荷下伸长率 ≤ 175%, 冷却后永久伸长率 ≤ 15%
热收缩试验	GB/T 2951.13—2008	温度为 127~133 ℃, 保持 1 h	收缩率 ≤ 4%
失重试验	GB/T 2951.32—2008	温度为 98~102 ℃, 保持 7×24 h	护套失重 ≤ 1.5 mg·cm ⁻²
高温压力试验	GB/T 2951.31—2008	温度为 88~92 ℃, 保持 6 h	压痕深度 ≤ 50%
低温拉伸试验	GB/T 2951.14—2008	温度为 -17~-13 ℃, 保持 4 h	断裂伸长率 ≥ 20%

热延伸试验与热收缩试验用以评估绝缘材料性能, 确保电线电缆的安全性和可靠性。热延伸试验在温度为 197~203 ℃ 和拉力为 20 N·cm⁻² 的条件下进行, 并在规定时间内测量试样的载荷下伸长率, 待试样冷却至室温时再次测量, 计算其冷却后永久伸长率; 热收缩试验在温度为 127~133 ℃ 的条件下进行, 并在该温度下保持 1 h, 待试样在空气中冷却后计算其收缩率。

电缆护套是保护电缆免受外界物理和化学

等因素损害的重要部分, 不仅可以保护电缆的导体和绝缘层, 还有助于提高电缆的耐磨性能、耐油性能、耐化学性能和抗紫外线等性能。护套材料的失重试验、高温压力试验和低温拉伸试验是用于评估电线电缆的护套材料在不同环境时的性能, 确保电缆在长期使用过程中的耐热性、稳定性和可靠性等, 具体试验如下。

1) 失重试验: 将护套材料试样放置在烘箱中在温度为 98~102 ℃ 下持续 7×24 h, 待试样稳定

后测量其质量,并计算护套的失重量,从而评估其热稳定性能。

2)高温压力试验:将护套材料试样置于温度为88~92℃环境下6h,评估材料的耐热变形能力。通过测量材料在高温压力下的形变情况,可以评估材料在实际应用中的耐热性能。

3)低温拉伸试验:将护套材料试样放置在温

度为-17~-13℃环境下进行持续4h的拉伸,以测量其在低温下的断裂伸长率。

2 结果和讨论

2.1 绝缘材料检测结果分析

对优化前后的电缆绝缘材料进行热延伸试验和热收缩试验,试验结果对比见表2。

表2 电缆绝缘材料在优化前后的试验结果对比

Tab.2 Test results comparison of cable insulation materials before and after optimization

试验项目	技术指标	标准要求	结果	
			优化前	优化后
热延伸试验 (温度197~203℃,拉力20N·cm ⁻²)	载荷下伸长率/%	≤175	64	40
	冷却后永久伸长率/%	≤15	6	0
热收缩试验 (温度127~133℃,保持1h)	收缩率/%	≤4%	2	1

由表2可知,热延伸试验中,优化前电缆绝缘材料的载荷下伸长率和冷却后永久伸长率分别为64%和6%,均符合标准要求;优化后绝缘材料的载荷下伸长率和冷却后永久伸长率分别降至40%和0,表明优化后的绝缘材料在长时间受热和机械负荷作用下的稳定性得到提升,绝缘材料的使用寿命延长。热收缩试验中,优化前绝缘

材料的收缩率为2%,优化后降为1%,说明优化后的绝缘材料在受热时不会过度收缩,可有效避免导体裸露和触电风险,确保电缆安全运行。

2.2 护套材料检测结果分析

对优化前后的电缆护套材料进行失重试验、高温压力试验和低温拉伸试验,试验结果对比见表3。

表3 电缆护套材料在优化前后的试验结果对比

Tab.3 Test results comparison of cable sheath materials before and after optimization

试验项目	技术指标	标准要求	结果	
			优化前	优化后
失重试验(98~102℃,7×24h)	失重量/(mg·cm ⁻²)	≤1.5	0.67	0.45
高温压力试验(88~92℃,6h)	压痕深度/%	≤50	34.0	22.5
低温拉伸试验(-17~-13℃,4h)	断裂伸长率/%	≥20	135	180

由表3可知,失重试验中,优化前电缆护套材料的失重量为0.67mg·cm⁻²,优化后降至0.45mg·cm⁻²,表明优化后的电缆护套材料在高温下更不易被分解和挥发,其稳定性得到提升,可有效延长电缆护套的使用寿命。高温压力试验中,优化前护套材料的压痕深度为34%,优化后降为22.5%,表明优化后的电缆护套材料在高温状态下的抗压性能增加。低温拉伸试验中,优化前护套材料的断裂伸长率为135%,优化后增至180%,提高了33.3%,进一步说明优化后的电缆护套在寒冷环境下仍能保持良好的机械性能。

3 结论

本文以YJV-0.6/1kV 4×120mm²为例,对

XLPE绝缘PVC护套铜芯电缆开展性能优化研究,将标称截面为120mm²的电缆线芯由24根标称直径为2.52mm的金属导体绞合调整为由37根标称直径为2.03mm的铜丝绞合。同时,优化护套材料和绝缘材料的配方,分别对绝缘材料进行热延伸试验和热收缩试验,对护套材料进行失重试验、高温压力试验、低温拉伸试验。试验结果表明,优化后XLPE绝缘PVC护套铜芯电缆的可靠性、稳定性和安全性均得到显著提升。

参考文献 References

- [1] 邹红飞. 电线电缆行业的发展状况、趋势、市场分析及存在的问题分析[J]. 电世界, 2018, 59(4): 35-39.
ZOU H F. Development status, trend, market analysis

- and existing problem analysis of wire and cable industry[J]. *Electrical World*, 2018, 59(4): 35-39.
- [2] 王晓铮, 侯冬冬. 我国电线电缆行业现状与发展初探[J]. *山东工业技术*, 2018(9): 165.
WANG X Z, HOU D D. Current status and development of wire and cable industry in China[J]. *Journal of Shandong Industrial Technology*, 2018(9): 165.
- [3] 王蕾. 领航数字化浪潮: 澳通电缆的革新之路——访广州澳通电线电缆有限公司总经理杨南彦[J]. *质量与认证*, 2024(8): 20-23.
WANG L. Leading the digital Wave: The innovation road of aotong cable - Interview with Yang Nanyan, General manager of Guangzhou Aotong Wire and Cable Co., LTD.[J]. *China Quality Certification*, 2024(8): 20-23.
- [4] 高振军, 李金堂. 105 °C 中压聚丙烯绝缘电力电缆的研制[J]. *电线电缆*, 2024, 67(4): 20-24.
GAO Z J, LI J T. Development of 105 °C medium voltage polypropylene insulated power cables[J]. *Wire & Cable*, 2024, 67(4): 20-24.
- [5] 高振军, 张开拓, 洪春艳, 等. 基于改性 PP-R 材料研制的 500 kV 聚丙烯绝缘电力电缆[J]. *电工电气*, 2024(8): 26-30.
GAO Z J, ZHANG K T, HONG C Y, et al. A 500 kV polypropylene insulated power cable based on development of the modified PP-R material[J]. *Electrotechnics Electric*, 2024(8): 26-30.
- [6] 高鹏, 赵傲, 王钟颖, 等. 聚丙烯材料在电力电缆应用中的研究进展[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(8): 1-10.
GAO P, ZHAO J, WANG Z Y, et al. Research progress of polypropylene materials in application of power cables[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(8): 1-10.
- [7] 彭二磊, 马壮, 苏艳文, 等. 新型环保聚丙烯绝缘中压电力电缆的研究[J]. *电线电缆*, 2021(5): 13-16.
PENG E L, MA Z, SU Y W, et al. Research on new type environmental polypropylene insulated medium voltage power cable[J]. *Wire & Cable*, 2021(5): 13-16.
- [8] 马彦辉, 郑金香, 宋冬冬, 等. 8.7/10 kV 交联聚乙烯绝缘超 A 类阻燃耐火电力电缆[J]. *电世界*, 2019, 60(12): 12-13.
MA Y H, ZHENG J X, SONG D D, et al. 8.7/10 kV crosslinked polyethylene insulated super a class flame retardant fire resistant power cable[J]. *Electrical World*, 2019, 60(12): 12-13.
- [9] 刘浩, 刘红剑, 楼铁城, 等. 交联聚乙烯绝缘料耐焦烧性能的对标研究[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(1): 29-34.
LIU H, LIU H J, LOU T C, et al. Comparative study on scorching resistance of cross-linked polyethylene insulating materials[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(1): 29-34.
- [10] 苏旖荧. 高压电缆材料用聚丙烯复合材料的制备及性能[J]. *合成纤维*, 2023, 52(10): 66-70.
SU Y Y. Preparation and properties of polypropylene composites for high voltage cable materials[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2023, 52(10): 66-70.
- [11] 李磊. 110 kV 高压铝护套电缆结构设计优化[J]. *电线电缆*, 2023(2): 59-62.
LI L. Optimization structure design of 110 kV high voltage power cable with aluminum sheath[J]. *Wire & Cable*, 2023(2): 59-62.
- [12] 谷世发, 胡高聳, 苏东波, 等. 电力电缆非紧压圆形复合导体结构的设计方法[J]. *电工技术*, 2021(15): 78-80.
GU S F, HU G S, SU D B, et al. Design method of non-compact circular stranded conductor structure for power cable[J]. *Electric Engineering*, 2021(15): 78-80.
- [13] 李章学, 张海竹. 铝合金低压电力电缆的结构设计及制造技术[J]. *电器工业*, 2019(4): 70-73.
LI Z X, ZHANG H Z. Structure design and manufacturing technology of aluminum alloy low-voltage power cable[J]. *China Electrical Equipment Industry*, 2019(4): 70-73.
- [14] 王昆, 刘春昉, 吉鸿飞, 等. 不同阻燃等级单芯大截面电力电缆的结构研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2018(5): 23-25.
WANG K, LIU C F, JI H F, et al. Research on different levels of flame retardant construction of single core power cable with large cross-section[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2018(5): 23-25.
- [15] 李存有. 薄煤层采煤机电缆结构优化与应用研究[J]. *矿业装备*, 2024(4): 134-136.
LI C Y. Research on cable structure optimization and application of thin seam shearer[J]. *Mining Equipment*, 2024(4): 134-136.
- [16] 范在乾, 咸日常, 冷学冰, 等. 35 kV XLPE 电力电缆终端结构参数优化[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(11): 73-79.
FAN Z Q, XIAN R C, LENG X B, et al. Optimization on structural parameters of 35 kV XLPE power cable terminal[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(11): 73-79.
- [17] 李亚鹏. 薄煤层采煤机电缆结构优化与应用研究[J]. *矿业装备*, 2023(7): 200-202.
LI Y P. Research on cable structure optimization and application of thin seam shearer[J]. *Mining Equipment*, 2023(7): 200-202.
- [18] 谢静, 陆日林, 刘惠文, 等. 环保型聚丙烯绝缘电力电缆的研制[J]. *广西电力*, 2024(5): 63-68.
XIE J, LU R L, LIU H W, et al. Development of environmentally friendly PP insulated power cable[J]. *Guangxi Electric Power*, 2024(5): 63-68.
- [19] 谢占宇, 纪玉龙, 刘宏甲, 等. 船用聚氯乙烯电缆剩余寿命快速评估方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(7): 1284-1289.

- XIE Z Y, JI Y L, LIU H J, et al. A rapid evaluation method for residual life of marine PVC cable[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(7): 1284-1289.
- [20] 刘敏, 王志强, 王宁会, 等. 船用低压电力电缆绝缘材料老化状态研究与寿命评估 [J]. *绝缘材料*, 2017, 50(12): 48-53.
- LIU M, WANG Z Q, WANG N H, et al. Study on ageing state and life evaluation of marine low voltage power cable insulation materials[J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(12): 48-53.
- [21] 邵梦春, 程聪, 王师培, 等. 环境温度对电线电缆绝缘材料拉力试验的影响 [J]. *现代传输*, 2024(3): 68-71.
- SHAO M C, CHENG C, WANG S P, et al. Influence of ambient temperature on tensile test of wire and cable insulation materials[J]. *Modern Transmission*, 2024(3): 68-71.
- [22] 杨代勇, 王朔, 杨明, 等. 电缆低温敷设外护套开裂影响因素分析及力学仿真 [J]. *吉林电力*, 2018, 46(1): 49-53.
- YANG D Y, WANG S, YANG M, et al. Analysis of factors of the cable outer sheath cracking and Mechanical Simulation[J]. *Jilin Electric Power*, 2018, 46(1): 49-53.

收稿日期: 2024-11-15

修回日期: 2025-12-31

作者简介:



王勤伟 WANG Qinwei
1973—, 男, 高级工程师
主要从事电气机械领域研究与应用
E-mail: 610780014@qq.com



陆浩 LU Hao (通信作者)
1993—, 男, 博士研究生
主要从事能源与环境、电气机械等领域的研究
E-mail: 314194425@qq.com

Performance Optimization of Cross Linked Polyethylene Insulated Polyvinyl Chloride Sheathed Copper Core Cables

WANG Qinwei¹, LU Hao^{1,2}, XU Xuezhong¹, WANG Zeyuan¹, ZHANG Huangfang¹,
ZHANG Peiliang¹

(1. Qinshan Cable Group Co., Ltd., Jiaying 314303, China; 2. College of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330038, China)

Abstract: In order to further enhance safety and stability of cross linked polyethylene insulated polyvinyl chloride sheathed copper core cables, structure and material of cables were optimized by taking YJV-0.6/1 kV 4×120 mm² as an example. Insulation materials and sheath materials before and after optimization were verified by thermal extension, thermal contraction, sheath weight loss, high temperature pressure, low temperature tension. Results showed that insulation thermal extension, insulation thermal shrinkage, sheath weightlessness and low-temperature tensile and other test parameters results of cable insulation materials after optimisation were better than those before improvement, in which elongation under load was reduced from 64% to 40%, permanent elongation after cooling was reduced from 6% to 0, shrinkage was reduced from 2% to 1%, sheath weight loss was reduced from 0.67 mg·cm⁻² to 0.45 mg·cm⁻², indentation depth was reduced from 34% to 22.5%, and elongation at break increased from 135% to 180%, which indicated that safety and stability of cables were significantly improved.

Key words: cables; performance optimization; insulated materials; sheath materials