

T/GXDSL

团 体 标 准

T/GXDSL —2026

电线电缆用绝缘材料抗老化制备方法与材料优化

Preparation Method and Material Optimization of Anti-Aging Insulating Materials
for Electric Wires and Cables

(工作组讨论稿)

(本草案完成时间：2026-4-8)

2026 - - 发布

2026 - - 实施

广西电子商务企业联合会 发布

目 次

前 言	III
1 引言	1
2 范围	1
3 规范性引用文件	1
4 术语和定义	3
4.1 热氧老化	3
4.2 温度指数	3
4.3 相对温度指数	3
4.4 氧化诱导期	3
4.5 抗氧化剂含量	4
4.6 热老化质量损失	4
5 材料分类与技术要求	4
5.1 材料分类	4
5.2 基础性能要求	4
5.3 抗老化专项技术要求	5
6 制备方法	6
6.1 原料预处理	6
6.2 配方设计	6
6.3 混炼工艺	7
6.4 交联处理（适用于交联聚乙烯）	7
7 材料优化方法	8
7.1 抗氧化剂协同优化	8
7.2 填料表面改性	8
7.3 聚合物共混改性	9
7.4 加工工艺优化	9
8 检验规则	10
8.1 检验分类	10
8.2 出厂检验	10
8.3 型式检验	10
9 判定规则与复验	10
9.1 判定规则	10
9.2 复验规则	11
10 标志、包装、运输与贮存	11
10.1 标志	11
10.2 包装	11
10.3 运输	11

10.4 贮存 11

前 言

本文件依据GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西产学研科学研究院提出。

本文件由广西电子商务企业联合会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

电线电缆用绝缘材料抗老化制备方法与材料优化

1 引言

电线电缆作为国家新型基础设施建设、能源传输、智能制造、国防军工等领域的核心配套产品，其绝缘材料的抗老化性能直接决定电力系统运行安全、基础设施服役寿命及产业链供应链稳定性。当前，我国电线电缆产业正朝着高端化、绿色化、智能化方向转型，亟需通过标准化手段规范抗老化绝缘材料的制备工艺、技术指标与优化路径，破解高端材料依赖进口、产品质量参差不齐、抗老化性能与国际先进水平存在差距等行业痛点。为深入贯彻《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，落实质量强国、制造强国战略，推动电缆行业高质量发展，保障国家电力安全与关键基础设施可靠运行，特制定本标准。本标准明确了电线电缆用抗老化绝缘材料的制备方法、技术指标、试验方法及优化准则，覆盖聚氯乙烯、交联聚乙烯、聚烯烃等主流绝缘材料体系，为行业技术升级、产品质量管控、国产化替代提供统一技术依据，助力我国电线电缆产业实现从“制造大国”向“制造强国”的跨越。

2 范围

明确规定电线电缆用抗老化绝缘材料的制备方法、材料优化技术、技术要求、检验规则及标志、包装、运输与贮存，建立材料抗老化性能的核心管控指标与科学评价体系，为行业生产、检验及应用提供明确依据。适用于额定电压 35 kV 及以下电力电缆、控制电缆、布电线及特种电线电缆用聚氯乙烯(PVC)、交联聚乙烯(XLPE)、无卤低烟阻燃聚烯烃(LSZH)三类绝缘材料的抗老化配方设计、混炼造粒工艺、交联处理及材料性能优化，可充分满足新型电力系统、智能电网、轨道交通、新能源等国家重点领域的应用需求。不适用于橡胶类绝缘材料(如乙丙橡胶、硅橡胶)、矿物绝缘电缆用绝缘材料以及工作温度长期超过 150°C 的特种绝缘材料，此类材料应严格遵循国家相关专项标准执行。

3 规范性引用文件

为契合国家标准化战略，确保引用文件的权威性、时效性与适用性，推动本标准与国际标准接轨、与产业发展协同，下列文件对本标准的应用具有强制性或指导性意义。凡是注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本标准；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）均适用于本标准。

GB/T 1033.1-2008 塑料非泡沫塑料密度的测定 第1部分：浸渍法、液体比重瓶法和滴定法

GB/T 1040.3-2006 塑料拉伸性能的测定第3部分：薄膜和薄片的试验条件

GB/T 1409-2006 测量电气绝缘材料在工频、音频、高频（包括米波波长在内）下介电常数和介质损耗因数的推荐方法

GB/T 1410-2006 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法

GB/T 2406.2-2009 塑料用氧指数法测定燃烧行为第2部分：室温试验

GB/T 2411-2008 塑料和硬橡胶使用硬度计测定压痕硬度（邵氏硬度）

GB/T 2951.11-2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法第11部分：通用试验方法——厚度和外形尺寸测量——机械性能试验

GB/T 2951.12-2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法第12部分：通用试验方法——热老化试验方法

GB/T 2951.13-2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法第13部分：通用试验方法——密度测定方法——吸水试验——收缩试验

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

GB/T 2951.21-2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法第21部分：弹性体混合料专用试验方法——耐臭氧试验——热延伸试验——浸矿物油试验

GB/T 3682.1-2018 塑料热塑性塑料熔体质量流动速率（MFR）和熔体体积流动速率（MVR）的测定 第1部分：标准方法

GB/T 5470-2008 塑料冲击法脆化温度的测定

GB/T 6553-2024 严酷环境条件下使用的电气绝缘材料 评定耐电痕化和蚀损的试验方法

GB/T 7141-2008 塑料热老化试验方法

GB/T 8815-2008 电线电缆用软聚氯乙烯塑料

GB/T 9341-2008 塑料弯曲性能的测定

GB/T 11026.1-2016 电气绝缘材料耐热性第1部分：老化程序和试验结果的评定

GB/T 11026.2-2012 电气绝缘材料耐热性第2部分：试验判断标准的选择

- GB/T 11026.3-2017 电气绝缘材料耐热性第3部分：计算耐热特征参数的规程
- GB/T 11026.4-2012 电气绝缘材料耐热性第4部分：老化烘箱 单室烘箱
- GB/T 11026.7-2025 电气绝缘材料耐热性第7部分：确定绝缘材料的相对温度指数（RTI）
- GB/T 11026.8-2025 电气绝缘材料耐热性第8部分：使用固定时限法（FTFM）确定耐热特征参数
- GB/T 15065-2009 电线电缆用黑色聚乙烯塑料
- GB/T 19466.6-2009 塑料差示扫描量热法（DSC）第6部分：氧化诱导时间（等温 OIT）和氧化诱导温度（动态 OIT）的测定
- GB/T 32129-2015 电线电缆用无卤低烟阻燃热塑性聚烯烃电缆料
- GB/T 33429-2016 硅橡胶混炼胶高撕裂强度型和高拉伸强度型
- JB/T 10437-2004 电线电缆用可交联聚乙烯绝缘料
- ISO 11358-2:2014 塑料聚合物的热重分析法（TG）第2部分：活化能的测定

4 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件，兼顾专业性与实用性，为行业技术交流、质量管控及国产化替代提供统一认知基准，确保相关技术表述的一致性与准确性。

4.1 热氧老化

绝缘材料在热与氧的联合作用下发生的不可逆化学降解过程，主要表现为分子链断裂、交联及官能团氧化，直接影响电力系统运行安全性与可靠性，是制约电缆服役寿命、影响国家电力基础设施长效稳定运行的关键因素。

4.2 温度指数

由耐热特征参数方程外推得出，指材料在规定老化时间内达到规定性能终点时对应的温度，是评价绝缘材料耐热老化性能、确定其适用场景的核心指标，直接关系到电缆在国家重点工程中的服役稳定性。

4.3 相对温度指数

按照 GB/T 11026.7-2025 的规定，通过对比已知耐热等级材料的试验数据确定的待评材料温度指数，是实现绝缘材料性能对标、推动产品达到国际先进水平的重要评价依据。

4.4 氧化诱导期

在标准规定温度（通常为 200°C）及氧气气氛下，采用差示扫描量热法测定的试样从熔融状态至发生氧化放热反应的时间间隔，是衡量绝缘材料抗热氧老化能力、保障电缆长期服役安全的关键参数。

4.5 抗氧剂含量

为延缓绝缘材料氧化老化而添加的酚类、胺类或亚磷酸酯类等稳定剂的质量分数，合理控制其含量是实现材料抗老化性能与生产成本平衡、推动抗氧剂国产化替代的重要环节。

4.6 热老化质量损失

绝缘材料在规定热老化条件下，因挥发物逸出、降解产物释放等导致的质量减少百分率，是评价绝缘材料热稳定性、避免其在长期服役中因降解失效的重要指标。

5 材料分类与技术要求

5.1 材料分类

立足国家绿色低碳发展与新型基础设施建设需求，电线电缆用抗老化绝缘材料按基体树脂类型分为以下三类，兼顾实用性、环保性与产业适配性，推动材料体系向高端化、绿色化转型，满足不同领域应用需求：

5.1.1 聚氯乙烯绝缘料（PVC）：适用于 450/750V 及以下电压等级，主要应用于民用建筑、普通工业布电线，兼顾成本与基础抗老化要求，适配常规电力传输场景；

5.1.2 交联聚乙烯绝缘料（XLPE）：适用于中高压电力电缆，是新型电力系统、智能电网建设的核心绝缘材料，重点满足高电压、长寿命、抗老化的严苛技术要求，支撑中高压电力传输安全；

5.1.3 无卤低烟阻燃聚烯烃绝缘料（LSZH）：适用于环保型布电线和特种电缆，契合国家“双碳”战略与绿色发展要求，广泛应用于轨道交通、新能源、高层建筑等对环保、安全有较高要求的领域。

5.2 基础性能要求

结合国家质量强国战略，强化材料基础性能管控，确保产品质量稳定可靠，推动国产化材料与国际先进水平接轨，各类材料基础性能除符合对应国家标准、行业标准外，还应满足以下核心指标，保障其适配各类应用场景：

5.2.1 聚氯乙烯绝缘料:聚氯乙烯绝缘料的基础性能应符合 GB/T 8815-2008 中表 2 的规定，且满足以下核心指标，保障民用与普通工业领域电力传输安全：20℃时体积电阻率： $\geq 1.0 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ ；200℃热稳定时间（刚果红法）： $\geq 180 \text{ min}$ ；冲击脆化性能（-15℃）：破损率 $\leq 15\%$ ；氧指数（阻燃型）： $\geq 30\%$ 。

5.2.2 交联聚乙烯绝缘料（XLPE）:交联聚乙烯绝缘料的基础性能应符合 JB/T 10437-2004 的规定，且满足以下核心指标，支撑中高压电力电缆国产化替代，保障新型电力系统稳定运行：热延伸试验（200℃，0.2 MPa，15 min）：负荷下伸长率 $\leq 80\%$ ，永久变形率 $\leq 5\%$ ；20℃时体积电阻率： $\geq 1.0 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ ；拉伸强度： $\geq 13.5 \text{ MPa}$ ；断裂伸长率： $\geq 450\%$ 。

5.2.3 无卤低烟阻燃聚烯烃绝缘料 (LSZH):无卤低烟阻燃聚烯烃绝缘料的基础性能应符合 GB/T 32129-2015 的规定,且满足以下核心指标,契合国家绿色环保与安全发展要求,适配重点领域应用:拉伸强度: ≥ 10.0 MPa; 断裂伸长率: $\geq 150\%$; 20°C时体积电阻率: $\geq 1.0 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$; 氧指数: $\geq 30\%$; 烟密度(有焰法): ≤ 150 ; pH 值及电导率: $\text{pH} \geq 4.3$, 电导率 $\leq 10 \mu\text{S}/\text{mm}$ 。

5.3 抗老化专项技术要求

聚焦国家电力基础设施长效运行需求,强化绝缘材料抗老化性能管控,推动材料技术升级,提升产品服役寿命,满足新型电力系统、新能源等领域的严苛使用要求,具体技术要求如下:

5.3.1 老化条件与性能保持率:绝缘材料需在空气烘箱中进行热老化试验,不同材料类型对应的老化试验条件及性能保持率要求如下,确保材料在长期服役中性能稳定,保障电力系统安全稳定运行:聚氯乙烯绝缘料:老化温度为 $100^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,老化时间为 168 h,拉伸强度保持率 $\geq 80\%$,断裂伸长率保持率 $\geq 80\%$;交联聚乙烯绝缘料:老化温度为 $135^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$,老化时间为 168 h,拉伸强度保持率 $\geq 85\%$,断裂伸长率保持率 $\geq 80\%$;无卤低烟阻燃聚烯烃绝缘料:老化温度为 $120^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,老化时间为 168 h,拉伸强度保持率 $\geq 80\%$,断裂伸长率保持率 $\geq 75\%$ 。

5.3.2 抗热氧老化添加剂要求:为推动抗氧剂等关键助剂国产化替代,保障产业链供应链自主可控,兼顾抗老化性能与生产成本,抗热氧老化添加剂应严格满足以下要求:酚类主抗氧剂(如 Irganox 1010):添加量应为 $0.3\% \sim 0.8\%$ (质量分数),鼓励采用国产高性能酚类抗氧剂替代进口产品,降低对进口助剂的依赖;亚磷酸酯类辅助抗氧剂(如 Irgafos 168):添加量应为 $0.2\% \sim 0.5\%$ (质量分数),优先选用环保型、低迁移国产助剂,兼顾环保性与使用效果;硫代酯类辅助抗氧剂(如 DLTDP):添加量宜为 $0.1\% \sim 0.3\%$ (质量分数);抗氧剂总添加量不得超过 2.0% (质量分数),实现抗老化性能、材料加工性能与生产成本的合理平衡。

5.3.3 氧化诱导期(OIT)要求:在 200°C 等温条件下,绝缘材料的氧化诱导期应符合以下规定,确保材料具备优异的抗热氧老化能力,有效延长电缆服役寿命:聚氯乙烯绝缘料: $\text{OIT} \geq 15 \text{ min}$;交联聚乙烯绝缘料: $\text{OIT} \geq 30 \text{ min}$;无卤低烟阻燃聚烯烃绝缘料: $\text{OIT} \geq 20 \text{ min}$ 。

5.3.4 温度指数(TI)与相对温度指数(RTI):绝缘材料的温度指数和相对温度指数应按照 GB/T 11026.1-2016、GB/T 11026.7-2025 的规定测定,以断裂伸长率下降 50%为性能终点(F50 终点),推算 20000 h 时的温度指数,确保材料适配不同服役环境温度要求,支撑重点工程应用:温度指数值应不低于相应材料标称耐温等级对应值,其中 105 级要求温度指数 $\geq 105^\circ\text{C}$,125 级要求温度指数 $\geq 125^\circ\text{C}$;相对温度指数与温度指数之差应控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内,保障材料性能评价的准确性与一致性,推动产品对标国际先进水平。

5.3.5 耐电痕化要求:适用于中高压电缆的交联聚乙烯绝缘材料,应按照 GB/T 6553-2024 进行耐电痕化试验,在 4.5 kV 试验电压下应达到 1A2.5 级及以上等级,保障中高压电力传输安全,支撑新型电力系统建设。

6 制备方法

立足智能制造、绿色生产理念,结合国家产业升级要求,规范绝缘材料制备流程,提升生产效率与产品一致性,推动制备工艺智能化、绿色化转型,保障国产化材料质量稳定可控,具体制备方法如下:

6.1 原料预处理

6.1.1 树脂干燥:为保障材料加工性能与抗老化性能,树脂干燥应严格控制温度与时间,确保含水量符合规定要求,具体操作要求如下:聚氯乙烯树脂:应在 70°C~80°C 温度下干燥 2 h~4 h,含水量 $\leq 0.3\%$;聚乙烯树脂:应在 80°C~85°C 温度下干燥 2 h~3 h,含水量 $\leq 0.1\%$;聚烯烃共混树脂:应在 75°C~85°C 温度下干燥 3 h~4 h,含水量 $\leq 0.2\%$ 。

6.1.2 抗氧化剂活化处理:为提升抗氧化剂在树脂中的分散性,增强抗老化效果,降低助剂迁移率,抗氧化剂在使用前应进行研磨和过筛处理,通过 200 目筛网的通过率应 $\geq 95\%$ 。对于低熔点抗氧化剂(熔点 $\leq 80^\circ\text{C}$),可预先与增塑剂或载体树脂熔融混合制成母料,推动制备工艺标准化、高效化,确保抗氧化剂分散均匀。

6.2 配方设计

结合绿色低碳、高性能、低成本要求,优化配方设计,推动国产原料替代,提升材料综合性能,各类材料典型配方(质量份)如下,可根据实际应用需求合理调整,确保配方适配具体使用场景:

6.2.1 聚氯乙烯绝缘料典型配方(质量份):聚氯乙烯树脂(SG-3 型,优先选用国产优质树脂): 100 份;增塑剂(DOTP,环保型): 40~50 份;三盐基硫酸铅: 3~5 份;二盐基亚磷酸铅: 2~3 份;硬脂酸钙: 0.5~1.0 份;抗氧化剂 1010(可選用国产替代产品): 0.3~0.5 份;抗氧化剂 168(可選用国产替代产品): 0.2~0.3 份;碳酸钙(活化处理,国产优质填料): 10~20 份。

6.2.2 交联聚乙烯绝缘料典型配方(质量份):低密度聚乙烯(LDPE,国产优质树脂): 100 份;交联剂(DCP): 1.5~2.0 份;抗氧化剂 300: 0.3~0.5 份;抗氧化剂 DLTDP: 0.2~0.3 份;抗铜剂 MD1024(国产优质助剂): 0.1~0.2 份。

6.2.3 无卤低烟阻燃聚烯烃绝缘料典型配方(质量份):乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA, VA 含量 28%,国产优质树脂): 60~70 份;线性低密度聚乙烯(LLDPE,国产优质树脂): 30~40 份;氢氧

化铝（ATH，粒径 1.0 μm~1.5 μm，国产优质填料）：120~150 份；抗氧剂 1010：0.4~0.6 份；抗氧剂 168：0.2~0.3 份；硅烷偶联剂（KH-550，国产优质助剂）：0.5~1.0 份；润滑剂（PE 蜡，环保型）：1.0~2.0 份。

6.3 混炼工艺

优化混炼工艺参数，推动工艺智能化控制，提升物料分散均匀性，减少热降解，保障材料性能稳定一致，具体工艺要求如下：

6.3.1 高速混合:将树脂、抗氧剂、热稳定剂、润滑剂等组分加入高速混合机，混合温度控制在 80℃~100℃，混合时间 8 min~12 min，混合转速 800 r/min~1200 r/min。待物料温度升至设定值且呈蓬松状时停止混合，确保各组分均匀分散，为后续塑炼奠定坚实基础。

6.3.2 密炼:将高速混合后的物料投入密炼机进行塑炼，严格控制密炼温度与时间，防止物料降解或交联剂提前分解，具体参数如下：聚氯乙烯料的密炼温度控制在 120℃~150℃，交联聚乙烯料和无卤低烟阻燃聚烯烃料的密炼温度控制在 130℃~160℃，密炼时间 5 min~10 min。其中，交联聚乙烯料在密炼过程中温度应严格控制在 160℃以内，严防交联剂提前分解，确保材料性能达标。

6.3.3 双螺杆挤出造粒:采用同向平行双螺杆挤出机进行熔融混炼和造粒，推动挤出工艺智能化、自动化控制，按材料类型分别控制如下工艺参数，确保粒料质量均匀稳定，满足后续生产使用要求：聚氯乙烯料：一区温度 130℃~140℃，二区温度 140℃~155℃，三区温度 150℃~165℃，四区温度 150℃~165℃，机头温度 145℃~160℃，螺杆转速 250 r/min~350 r/min，切粒转速 600 r/min~800 r/min;交联聚乙烯料：一区温度 130℃~140℃，二区温度 140℃~155℃，三区温度 150℃~160℃，四区温度 145℃~155℃，机头温度 140℃~150℃，螺杆转速 200 r/min~300 r/min，切粒转速 500 r/min~700 r/min;无卤低烟阻燃聚烯烃料：一区温度 120℃~135℃，二区温度 135℃~150℃，三区温度 145℃~160℃，四区温度 140℃~155℃，机头温度 140℃~150℃，螺杆转速 250 r/min~350 r/min，切粒转速 600 r/min~800 r/min。

6.3.4 干燥与包装:挤出造粒后的物料应在 80℃~90℃条件下干燥 2 h~4 h，使水分含量≤0.1%，避免水分影响材料绝缘性能与抗老化性能。干燥后的粒料应采用密封包装存放，包装袋内应放置干燥剂，存放环境温度≤40℃，相对湿度≤60%；同时推动包装绿色化，优先选用可回收、环保型包装材料，契合国家绿色低碳发展要求。

6.4 交联处理（适用于交联聚乙烯）

规范交联处理工艺，提升交联均匀性，保障交联聚乙烯绝缘料的高性能与稳定性，支撑中高压电力电缆国产化，具体处理方法如下：

6.4.1 硅烷交联法:接枝反应:将聚乙烯、乙烯基硅烷、抗氧化剂、引发剂在双螺杆挤出机中进行熔融接枝,接枝温度 $160^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$,确保接枝率均匀稳定,保障后续交联效果;催化剂母料制备:将聚乙烯、催化剂(二月桂酸二丁基锡)、抗氧化剂混合造粒,提升催化剂分散性,确保交联反应均匀充分;成品制备:将接枝料与催化剂母料按95:5的质量比混合,在挤出机中于 $160^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ 下挤出成型,随后在 $70^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ 热水或水蒸气中交联6h~12h,优化交联工艺,提升生产效率与产品一致性。

6.4.2 辐照交联法:辐照源:电子加速器,能量 $1.5\text{ MeV}\sim 3.0\text{ MeV}$,优先选用国产辐照设备,推动装备国产化,降低生产成本;辐照剂量: $80\text{ kGy}\sim 150\text{ kGy}$,严格控制辐照剂量均匀性,避免局部辐照过度或不足,确保材料性能稳定;凝胶含量控制:辐照交联后交联聚乙烯的凝胶含量应达到 $60\%\sim 80\%$,确保材料具备优异的力学性能与抗老化性能,适配中高压电缆使用需求。

7 材料优化方法

立足技术创新驱动,聚焦国家高端材料发展需求,推动绝缘材料抗老化性能升级,破解行业技术瓶颈,提升国产材料核心竞争力,实现材料性能与绿色低碳、成本控制的平衡,具体优化方法如下:

7.1 抗氧化剂协同优化

7.1.1 主辅抗氧化剂复配:通过主辅抗氧化剂协同复配,显著提升抗老化效果,推动国产抗氧化剂替代,具体要求如下:酚类主抗氧化剂(Irganox 1010)与亚磷酸酯类辅助抗氧化剂(Irgafos 168)按质量比1:1~2:1复配,协同效应可使氧化诱导期提高 $30\%\sim 50\%$,优先选用国产复配抗氧化剂,降低进口依赖;受阻酚类与硫代酯类抗氧化剂按质量比2:1~3:1复配,适用于高温老化环境($\geq 120^{\circ}\text{C}$),满足新型电力系统、新能源等领域的严苛使用要求。

7.1.2 抗氧化剂负载化处理:采用负载化技术,降低抗氧化剂迁移率,延长抗老化时效,推动技术创新,具体要求如下:采用多孔二氧化硅(孔径 $5\text{ nm}\sim 20\text{ nm}$)作为抗氧化剂载体,负载率控制在 $20\%\sim 35\%$,优先选用国产多孔二氧化硅载体,推动国产材料配套升级;负载化抗氧化剂在基体树脂中的分散粒径控制在 $200\text{ nm}\sim 500\text{ nm}$,确保分散均匀,提升协同抗老化效果;负载化处理后,抗氧化剂迁移损失率降低50%以上,有效延长材料服役寿命,降低运维成本。

7.2 填料表面改性

优化填料表面改性技术,提升填料与树脂的相容性,增强材料力学性能与抗老化性能,推动国产填料高端化,具体方法如下:

7.2.1 偶联剂处理:硅烷偶联剂(KH-550、KH-570)用于氢氧化铝、氢氧化镁等无机填料表面处理,

添加量为填料质量的 0.5%~1.5%，优先选用国产优质偶联剂，保障改性效果的同时降低成本；钛酸酯偶联剂（NDZ-101）用于碳酸钙填料表面处理，添加量为填料质量的 0.8%~1.2%，有效提升填料分散性与相容性，优化材料综合性能。

7.2.2 填料粒径优化:通过优化填料粒径，提升材料综合性能，降低生产成本，具体要求如下：氢氧化铝填料中位粒径 D50 控制在 1.0 μm ~1.5 μm ，粒径分布跨度 ≤ 1.2 ，确保阻燃性能与力学性能平衡，适配不同应用场景；碳酸钙填料中位粒径 D50 控制在 2.0 μm ~5.0 μm ，提升材料加工性能与成本优势，推动产品市场化应用。

7.3 聚合物共混改性

采用聚合物共混改性技术，提升材料综合性能，适配不同领域应用需求，推动材料体系创新，具体方法如下：

7.3.1 聚烯烃共混体系:乙烯-醋酸乙烯酯共聚物与线性低密度聚乙烯按质量比 60:40 至 75:25 共混，可获得断裂伸长率 $\geq 180\%$ 、拉伸强度 $\geq 12\text{ MPa}$ 的综合性能，满足环保、高性能应用需求；添加 5~10 份 乙烯-丙烯酸共聚物（EAA）作为增容剂，可使界面结合强度提高 40%，优先选用国产增容剂，降低生产成本，推动国产化替代。

7.3.2 纳米添加剂改性:引入纳米添加剂，显著提升材料抗老化性能、阻燃性能与力学性能，推动高端材料技术突破，具体要求如下：纳米蒙脱土（OMMT，层间距 $\geq 2.5\text{ nm}$ ）：添加量 2%~5%（质量分数），可使氧指数提高 5~8 个百分点，优先选用国产纳米蒙脱土，推动纳米材料国产化应用；纳米二氧化硅（粒径 20 nm~40 nm）：添加量 1%~3%，可使拉伸强度提高 15%~25%，推动纳米材料在绝缘领域的规模化应用，提升国产材料竞争力。

7.4 加工工艺优化

结合智能制造理念，优化加工工艺，减少物料降解，提升产品一致性与生产效率，契合国家绿色生产与产业升级要求，具体优化方向如下：

7.4.1 加工温度控制:混炼温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ ，抗氧化剂消耗速率增加约 1.5 倍。挤出加工过程中各段温度应严格控制在 6.3.3 规定范围内，最高允许偏差不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，采用智能化温度控制系统，确保温度稳定，有效减少热降解，保障材料性能。

7.4.2 剪切强度控制:双螺杆挤出机螺杆转速宜控制在 250 r/min~300 r/min，过高剪切会导致分子链断裂和抗氧化剂分解。长径比（L/D）为 36:1~44:1 的螺杆组合有利于抗氧化剂均匀分散，应推动挤出设备智能化升级，实现剪切强度精准控制，提升产品质量稳定性。

7.4.3 停留时间控制:物料在挤出机中的平均停留时间应控制在 90 s~150 s，避免因停留时间过长

导致热降解。通过调整螺杆转速和喂料速率，实现停留时间的精确控制，兼顾生产效率与产品质量稳定性。

8 检验规则

严格落实质量强国战略，强化产品质量管控，规范检验流程，确保产品符合本标准要求，保障国家电力基础设施安全，推动行业高质量发展，具体检验规则如下：

8.1 检验分类

产品检验分为出厂检验和型式检验，全面覆盖材料全性能指标，建立全流程质量管控体系，确保产品质量可追溯、可管控。

8.2 出厂检验

出厂检验项目聚焦核心性能与抗老化关键指标，严格把控每批产品质量，确保出厂产品合格，具体要求如下：外观与颜色；拉伸强度和断裂伸长率；热老化后拉伸强度和断裂伸长率保持率（聚氯乙烯料 100°C×168 h，交联聚乙烯料 135°C×168 h，无卤低烟阻燃聚烯烃料 120°C×168 h）；体积电阻率（20°C）；氧化诱导期（OIT）。出厂检验应以批为单位，每批不超过 50 t，每批随机取样不少于 3 kg，建立完整检验记录档案，实现产品质量可追溯，确保问题可排查、可整改。

8.3 型式检验

为确保产品长期质量稳定，应对关键节点进行型式检验，全面覆盖全部技术要求，及时排查质量隐患，具体触发条件如下：有下列情况之一时，应进行型式检验：新产品或老产品转厂生产的试制定型鉴定，确保产品符合国家相关战略与标准要求，保障产品市场化可行性；正式生产后，若材料、工艺发生较大改变，可能影响产品性能时，保障工艺升级后的产品质量稳定；正常生产满一年时，实现产品质量周期性管控，及时发现潜在质量问题；产品停产半年以上，恢复生产时，确保复产产品质量达标，避免因停产导致的质量波动；出厂检验结果与上次型式检验存在较大差异时，及时排查质量隐患，确保产品质量稳定；国家质量监督机构提出型式检验要求时，积极配合国家质量管控工作，落实质量主体责任。型式检验项目应覆盖第 5 章和第 6 章的全部技术要求，确保产品综合性能符合本标准规定，保障产品适配各类应用场景。

9 判定规则与复验

9.1 判定规则

检验结果全部符合本标准要求时，判定该批产品合格。若有任一指标不符合本标准要求，应加倍取样对不合格项目进行复验，坚守质量底线，保障产品质量符合使用要求。

9.2 复验规则

复验结果全部符合本标准要求时，判定该批产品合格；复验结果仍有任一指标不符合本标准要求，判定该批产品不合格，严禁不合格产品流入市场，保障国家电力基础设施安全与产业链信誉。

10 标志、包装、运输与贮存

结合绿色低碳、安全高效要求，规范标志、包装、运输与贮存流程，保障产品在全生命周期内质量稳定，推动供应链绿色转型，确保产品送达用户时性能达标，具体要求如下：

10.1 标志

包装袋上应清晰标明：产品名称、型号、批号、净含量、生产日期、本标准编号、生产企业名称及地址、贮存条件，确保产品信息清晰可追溯，便于质量管控、市场监管及用户使用。

10.2 包装

采用内衬防潮膜（厚度 ≥ 0.08 mm）的编织袋包装，或采用铝塑复合防潮袋包装，封口应严密，防止水分侵入，保障产品性能稳定。每袋净含量为 $25\text{ kg}\pm 0.2\text{ kg}$ ，优先选用可回收、环保型包装材料，契合国家绿色低碳发展战略。

10.3 运输

运输过程中应防止日晒、雨淋，不得与有机溶剂、酸、碱等腐蚀性物质混运，避免材料性能受损。同时推动运输环节绿色化，优化运输路线，减少能耗与环境污染，实现全流程绿色管控。

10.4 贮存

产品应贮存于干燥、通风、避光的库房内，贮存温度 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 60\%$ 。贮存期自生产之日起不超过 12 个月，应定期检查贮存条件，及时排查质量隐患，确保产品质量稳定，避免浪费。