

# 挤出温度对双层绝缘结构电缆线芯组织和性能的影响

王 阳, 秦轩杰, 宋 言

(江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096)

**摘 要:**通过双层共挤工艺制备 0.6/1 kV 双层绝缘结构电缆线芯, 研究不同挤出温度对双层绝缘结构线芯表面质量、偏心度、微观结构和力学性能的影响规律, 并对制备的双层绝缘结构线芯进行多项性能测试和耐热寿命评定。结果表明:随着挤出温度从温度 I 升高至温度 II 时, 制备的双层绝缘结构线芯表面平整, 光亮度较好且内外绝缘层偏心度较小 ( $\leq 15\%$ ), 此时双层绝缘结构线芯断裂伸长率从 109% 增加至 221%。当挤出温度从温度 II 升高至温度 III 时, 制备出的双层绝缘结构线芯表面质量恶化, 绝缘线芯形状出现扭曲和收缩, 且纵截面可观察到许多大小不一的气孔, 此时双层绝缘结构线芯抗张强度和断裂伸长率分别下降至 10.7 MPa 和 140%。通过挤出温度 II 制备的双层绝缘结构线芯经电子辐照交联后, 其 20℃ 绝缘电阻常数、老化前后抗张强度和断裂伸长率、热延伸性能显著优于 JG/T 442—2014 标准中规定值, 表明该双层绝缘结构线芯绝缘性能、力学性能、老化性能和热延伸性能较为优异。此外, 双层绝缘结构线芯经 165℃/168 h 老化后, 其断裂伸长率保留率达到 98%, 表明该双层结构的绝缘线芯具有较好的耐热寿命。

**关键词:**绝缘结构; 双层共挤; 挤出温度; 表面质量; 拉伸性能

## Effect of extrusion temperature on organization and properties of cable core with double-layer insulation structure

WANG Yang, QIN Xuanjie, SONG Yan

(Jiangxi Copper Technology Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**Abstract:** A 0.6/1 kV cable core with double-layer insulation structure was prepared through the double-layer co-extrusion process, and the effect of extrusion temperatures on its surface quality, eccentricity, microstructure, and mechanical properties was investigated. The prepared cable core with double-layer insulation structure was conducted multiple properties tests and heat-resistance life evaluation. The results show that when the extrusion temperature increases from temperature I to temperature II, the prepared double-layer insulation core has flat surface, good brightness, and lower eccentricity between the inner and outer insulation layers ( $\leq 15\%$ ), and the elongation at break of the insulation core increases from 109% to 221%. When the extrusion temperature increases from temperature II to temperature III, the surface quality of insulation core is deteriorated with distortion and shrinkage on it. Meanwhile, many different sizes of pores can be observed in the longitudinal section, and the tensile strength and elongation at break decrease to 10.7 MPa and 140%, respectively. Compared with the values of JG/T 442—2014 standard, the insulation resistance constant at 20℃, tensile strength and elongation at break before and after ageing, and thermal extensibility of insulation core after electron irradiation cross-linking are significantly improved, indicating that the mechanical properties, ageing properties, and thermal elongation properties of the insulation core with double-layer structure are relatively excellent. Furthermore, after ageing at 165℃/168 h, the elongation at break of insulation core with double-layer structure has 98% of retention rate, indicating that the insulation core with double-layer structure possesses the outstanding heat-resistance life.

**Key words:** insulation structure; double-layer co-extrusion process; extrusion temperature; surface quality; tensile property

## 0 引言

交联聚乙烯绝缘电力电缆被广泛应用于各种

用电领域, 如智慧电网、高端装备、绿色建筑、清洁能源和智慧交通等。然而随着当前环保、安全等要求的不断提高, 除了要求电力电缆绝缘层具有较好的绝缘性能之外, 还要求绝缘层具备多种优异性能, 如长寿命、高阻燃性等<sup>[1-3]</sup>。普通交联聚乙烯电力电缆绝缘层的制备工艺是利用一台挤塑机将聚

基金项目: 2022 年吉安市科技计划专项-工业类 (2022-171835); 2023 年吉安市科技计划“百博百企”专项资助项目 (20233-127595)。

乙烯绝缘料均匀挤出包覆在铜导体上,随后牵引至水槽中冷却成型,从而形成具有一定厚度的绝缘层结构<sup>[4]</sup>。刘璐<sup>[5]</sup>在分析电线电缆的生产线总体结构、挤塑机装置以及挤塑原理的基础上,得到了影响电线电缆挤塑过程的3个主要工艺参数:挤出温度、螺杆转速和冷却工艺。张灵军等<sup>[6]</sup>探究了聚全氟乙丙烯绝缘耐高温特种电缆绝缘层挤塑工艺,结果表明挤出温度会显著影响熔体黏度,从而影响挤塑性能。肖尚浩等<sup>[7]</sup>分析了6类中压交联电缆绝缘线芯表面质量不佳的类型和产生原因,表明挤出温度不适宜会导致电缆线芯表面质量较差。因此挤塑温度会显著影响挤出产品的性能和表面质量。

然而,针对一些特殊场合,要求电缆同时具备优异的电气性能、力学性能和耐热老化性能,而单一的绝缘层很难满足多种优异性能要求,因此通过制备双层或多层绝缘结构以期满足多种优异性能要求,成为当前高性能电线电缆研发的一个方向。双层绝缘结构的制备工艺可分为先挤塑内绝缘层再挤塑外绝缘层(两次单层挤出)、内绝缘层和外绝缘层同时挤出(双层共挤,示意图如图1所示)。相较于多次单层挤出,双层共挤技术可简化工艺流程,大幅降低生产成本,因此双层共挤技术广泛应用于制备复合薄膜、型材及管材等<sup>[8-9]</sup>。

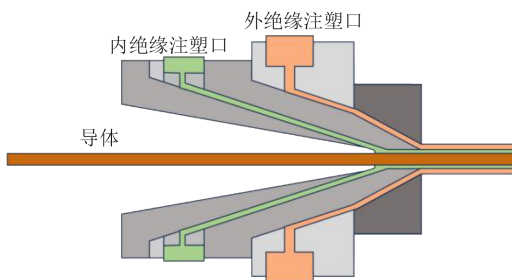


图1 双层共挤工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of double-layer co-extrusion process

目前双层共挤技术已在电线电缆领域得到应用<sup>[10]</sup>,但仅是简单介绍应用情况,而针对多次单层挤出和双层共挤制备双层绝缘结构电缆线芯的对比研究,以及双层共挤对电缆线芯组织和性能的影响未见研究报道。因此,本文采用双层共挤工艺制备双层绝缘结构电缆线芯,探究不同挤出温度对双层绝缘结构线芯表面质量、偏心度、微观结构和力学性能的影响规律,并对制备的双层绝缘结构电缆线芯进行多项性能测试和耐热寿命评定。

## 1 实验

### 1.1 双层绝缘结构制备

本研究拟制备耐热寿命可达70年且电气性能优异的0.6/1 kV电力电缆绝缘线芯(导体为紧压圆,截面积为 $25 \text{ mm}^2$ ),通过双层共挤工艺制备双层绝缘结构——高电气性能内绝缘层及优异耐热性能外绝缘层。根据标准,导体标称截面积为 $25 \text{ mm}^2$ 的0.6/1 kV交联聚乙烯绝缘电力电缆绝缘层厚度为 $0.90 \text{ mm}$ ,因此本研究规定双层绝缘总厚度为 $0.90 \text{ mm}$ ,其中内绝缘层厚度为 $0.40 \text{ mm}$ ,外绝缘层厚度为 $0.50 \text{ mm}$ ,最薄绝缘层总厚度为 $0.81 \text{ mm}$ 。内外绝缘层分别使用浙江某电料厂生产的无卤交联内绝缘料和无卤阻燃交联外绝缘料。内绝缘层使用 $\phi 40$ 挤塑机挤出,外绝缘层使用 $\phi 70$ 挤塑机挤出。

本研究最初尝试通过两次普通单层挤出工艺制备双层绝缘结构。图2为 $\phi 40$ 挤塑机挤出的内绝缘层照片。从图2可以看到,制成的线芯多处位置露铜,其主要原因是当前挤塑机挤塑能力不匹配。在试制过程中,通过降低挤出速度,露铜现象得到好转,然而降低后的挤出速度无法用于实际生产。再者,由于绝缘层被分为两层,内外绝缘层的结合界面会对绝缘性能产生较大影响。按照先挤塑内绝缘再挤塑外绝缘层的制备工艺,在内绝缘挤塑完成后的冷却、收卷、放卷过程中绝缘层表面会被污染,从而对线芯的绝缘性能产生恶化。因此普通单层挤出工艺不适用于双层绝缘结构线芯的制备。

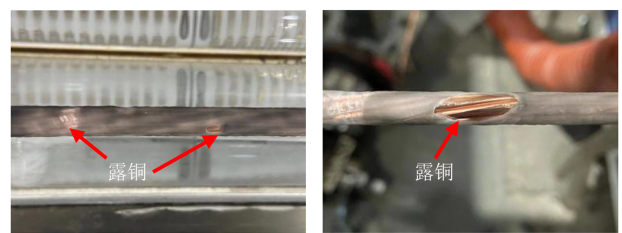


图2 内绝缘单层挤出线芯照片

Fig.2 Photos of insulation core with single-layer extrusion

为了研究不同挤出温度对双层共挤技术的影响,设置了3组温度参数,如表1所示。

### 1.2 结构表征和性能测试

利用冲片机对制备出的双层绝缘结构线芯切片制成相关样品。利用数字式智能测量仪测量样品内外绝缘层厚度值,每个样品至少测量6个不同位置的厚度值并计算偏心度,偏心度计算公式为:(最大厚度值-最小厚度值)/最大厚度值。采用场发

表1 内外绝缘层挤出温度

Table 1 Extrusion temperature of inner and outer insulation layers

	温度 I/°C	温度 II/°C	温度 III/°C
内绝缘	140-150-155-165-170-170	160-170-175-185-190-190	180-190-195-205-210-210
外绝缘	100-110-120-130-140-140-140	120-130-140-150-160-160-160	140-150-160-170-180-180-180

射扫描电镜(赛默飞 Apreo 2)分析样品的双层绝缘微观结构。利用电子拉伸机,按照 GB/T 1040.1—2006 的规定进行拉伸性能测试,拉伸速率为 200 mm/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 双层绝缘结构线芯表面质量和偏心度

图3为不同挤出温度制备的双层绝缘结构线芯图。如图3(a)所示,3种不同挤出温度制备出的双绝缘层结构线芯表面质量各不相同:温度 I 和温度 II 制备的绝缘线芯表面光滑平整,温度 III 制备的绝缘线芯表面粗糙。对比图3(b)~(c)可以看出,在放大情况下观察到温度 I 制备的绝缘线芯表面部分区域平整度较差,且线芯整体光亮度明显差于温度 II 制备的绝缘线芯。

电缆绝缘料通过挤塑机料斗吸入到挤塑机内,在挤塑机螺杆的剪切力和压力作用下依次经历混合、熔融和均化3个阶段<sup>[11]</sup>。根据文献[12],低密度聚乙烯(LDPE)零剪切黏度随着温度的升高呈下降的趋势,主要原因是温度的升高,分子的不规则运动和分子之间的距离增加,使得链段有更多的空间运动。再者,温度的升高,LDPE 剪切变稀行为更加明显。因此,随着挤出温度的升高,熔体黏度下降,流动性增加。针对本研究,当挤出温度较低时(温度 I),绝缘料在挤塑机内加热不完全,熔融不充分。在挤塑过程中绝缘料黏度较大,熔体的临界剪切应力相对较大,导致熔体不连续易破裂,最终制备的绝缘线芯表面质量欠佳,光亮度较差,如图3(b)所示。随着挤出温度的升高(温度 II),绝缘料在挤塑机内加热较为充分,黏度适中,从而在挤塑过程中整体流动性较好,制备的绝缘线芯表面质量和光亮度较好,如图3(c)所示。

然而当挤塑温度进一步升高至温度 III 时,制备出的绝缘线芯表面质量恶化,绝缘线芯形状出现了扭曲和收缩,如图3(d)所示。线芯绝缘层纵截面致密性较差,可观察到许多大小不一的气孔(针孔),如图3(e)所示。其主要原因为,当挤出温度过高时,

不仅会引起绝缘料中添加剂或基体发生降解,导致大量气孔的出现,降低绝缘线芯的致密度,同时还会导致绝缘料熔体黏度过低,流动性过大,从而导致绝缘层形状出现扭曲<sup>[11,13]</sup>。因此最优的挤塑造温度可以促进适宜的纵向压力和剪切力的产生,有利于物料充分的混合与塑化,实现最优的熔融挤出,从而提升电缆整体性能。

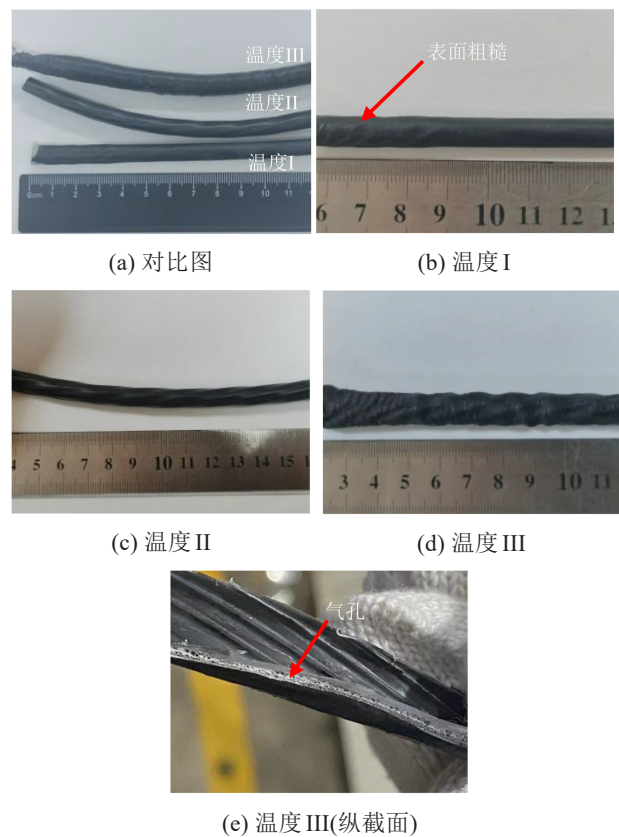


图3 不同挤出温度制备的双层绝缘结构线芯图

Fig.3 Insulation core with double-layer structure prepared at different extrusion temperatures

表2为不同挤出温度制备的绝缘线芯偏心度和最薄点总厚度值。从表2可以看出,线芯内外绝缘层偏心度随着挤出温度的升高先减小后增大,其主要原因为:当挤出温度较低时,内外绝缘层熔体黏度较高,熔体流动性差、不连续易破裂,从而导致偏心度较大;当挤出温度过高时,绝缘料熔体黏度过低,流动性过大,导致绝缘层形状出现扭曲和收缩,

同样引起绝缘偏心度过大。

表2 不同挤出温度制备的双层绝缘结构线芯偏心度和最薄点总厚度值

Table 2 Eccentricity and thinnest thickness of insulation core with double-layer structure prepared at different extrusion temperatures

温度参数	内绝缘层偏心度	外绝缘层偏心度	最薄点总厚度 /mm
	/%	/%	
温度 I	42	37	0.940
温度 II	15	12	0.850
温度 III	29	41	1.417

根据 JG/T 442—2014 标准<sup>[4]</sup>,一般对低压电缆绝缘偏心度不做要求,只要求绝缘线芯最薄点厚度达到平均值的 90%。本研究拟制备出的双层绝缘总厚度为 0.90 mm,最薄总厚度需达到 0.81 mm。从表 2 可以看出,3 种挤出温度制备的绝缘线芯最薄点总厚度分别为 0.940、0.850、1.417 mm,最薄点总厚度值均超过最低数值,满足规定要求<sup>[4]</sup>。尽管相关标准中未明确规定低压电缆的绝缘偏心度,但合理控制绝缘偏心度,不仅可以体现企业的技术水平,同时也可以控制成本。

## 2.2 双层绝缘结构线芯微观结构

图 4 为 3 种不同挤出温度制备的绝缘线芯横截面液氮脆断 SEM 图。从图 4(a)可以看出,挤出温度 I 制备的绝缘线芯经液氮脆断后内外绝缘层界面紧密结合,结合性较好,然而内绝缘层和外绝缘层厚度较不均匀,部分区域厚度明显偏厚。其主要原因是挤出温度较低,内外绝缘层熔体黏度较高,熔体

流动性差,从而导致成型性较差。同时,内绝缘截面相对更加光滑,可见“河流”状形貌,表现出明显的脆性断裂特征,而外绝缘材料表面粗糙,凹凸不平有颗粒感。其主要原因是本研究中外绝缘是为了保障绝缘线芯的耐老化性能,因此选用的是添加剂较多的高耐热性绝缘料。当挤出温度较低时,无机粒子由于本身熔点较高,其流动性相较于基体的流动性更差,使添加剂粒子与基体的相容性变差,从而导致外绝缘层表面凹凸不平<sup>[3]</sup>。

从图 4(b)可以看出,当挤出温度从温度 I 升至温度 II 时,制备的绝缘线芯经脆断后内绝缘层和外绝缘层厚度均匀一致,未发现明显加宽或变窄的截面。同时,内外绝缘层表面相对更加光滑,可见“河流”状形貌,表现出明显的脆性断裂特征,添加剂粒子与基体相容性较好。其主要原因是当挤出温度升高后,内外绝缘料熔体黏度适中,在挤塑过程中整体流动性较好,从而保证了制备出的绝缘线芯内外绝缘层厚度均匀且表面光滑。

从图 4(c)可以看出,当挤出温度继续增高至温度 III 时,制备的绝缘线芯经脆断后内绝缘层和外绝缘层的厚度明显比温度 I 和温度 II 备的线芯厚,而且双层厚度较不均匀,部分区域明显收缩。同时,内绝缘层表面相对更加光滑,可见“河流”状形貌,表现出明显的脆性断裂特征。而外绝缘层表面粗糙,有颗粒感,并且出现密集分布的大小不一的气孔,部分气孔分布在内外绝缘层界面处。气孔产生的原因是由于挤出温度过高,外绝缘料中添加剂或基体发生了分解,从而导致大量气孔的出现<sup>[12-13]</sup>。

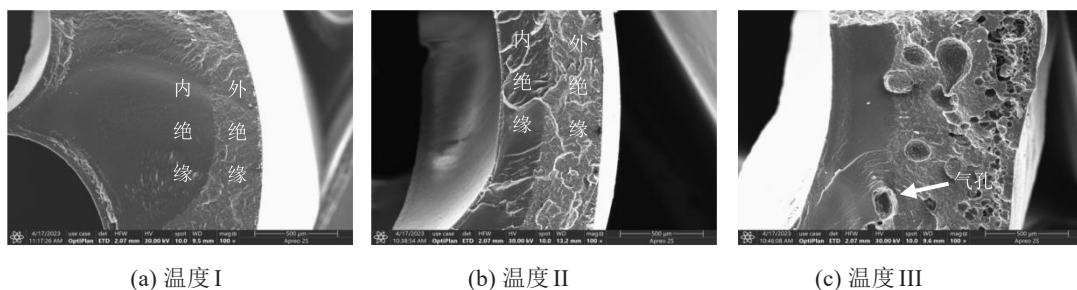


图4 不同挤出温度制备的双层绝缘结构绝缘线芯液氮脆断 SEM 图

Fig.4 SEM images of liquid nitrogen brittle fracture of insulation cores prepared at different extrusion temperatures

## 2.3 双层绝缘结构线芯力学性能

图 5 为不同挤出温度制备的绝缘线芯拉伸曲线和拉伸性能。从图 5 可以看出,双层绝缘结构线芯抗张强度随着挤出温度的升高逐渐降低,断裂伸长率随着挤出温度的升高先增大后减小。根据文献

[15-16],挤塑过程中在牵引力的作用下聚合物大分子链沿物料流动的方向取向。当挤出温度较低时,分子热运动缓慢,分子链活动能力差,在拉伸过程中需克服聚合物内部较大的粘滞阻力。随着温度的升高,高分子链活动能力增强,在拉伸过程中无

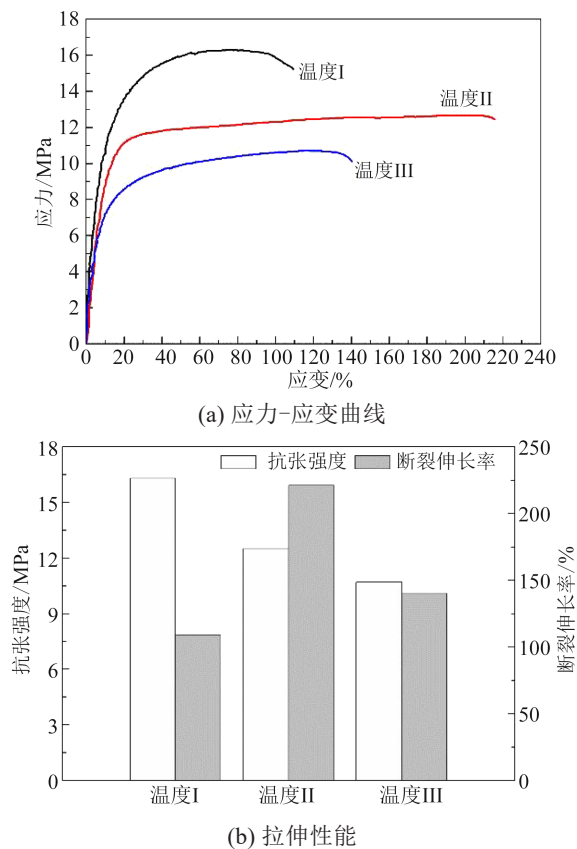


图 5 不同挤出温度制备的双层绝缘结构线芯的拉伸曲线和拉伸性能

Fig. 5 Tensile curves and tensile properties of insulation cores with double-layer structure prepared at different extrusion temperatures

需克服聚合物内部较大的粘滞阻力。同时分子热运动剧烈,导致分子链的解取向速度增加,分子链

取向度降低。因此,通过温度 I 制备的绝缘线芯由于挤出温度较低,绝缘料熔体通过模口时在应力作用下分子链发生的取向可保留。此时由于分子链有着较强的取向性,绝缘线芯在拉伸过程需克服较大的粘滞阻力,因此抗张强度较高(16.3 MPa)、断裂伸长率较低(109%)。

当挤出温度升高至温度 II 时,此时分子链活动能力大幅提高,在挤塑过程中绝缘料熔体通过模口后可发生解取向。由于解取向的发生,绝缘线芯抗张强度从 16.3 MPa 降低至 12.5 MPa,断裂伸长率从 109% 增加至 221%。随着挤出温度进一步升高至温度 III,分子热运动加剧,导致分子链解取向增加,因此线芯抗张强度进一步降低。另外,当挤出温度升高至温度 III 时,由于挤出温度过高,外绝缘料在挤出过程中发生了分解,生成了大量的气孔(图 4(e)~(f)所示)。这些气孔缺陷的存在会劣化线芯的抗张强度和断裂伸长率。因此随着挤出温度增加到温度 III 时,绝缘线芯的抗张强度降低至 10.7 MPa,断裂伸长率下降至 140%。

#### 2.4 辐照后双层绝缘结构线芯性能分析

利用电子加速器,对通过温度 II 制备的双层绝缘结构线芯进行辐照交联,电子束能量为 1.8 MeV,束流强度为 20 mA。对通过电子辐照后的绝缘线芯送第三方分别进行绝缘层电气性能、力学性能、老化性能和热延伸检测,检测结果如表 3 所示。

表 3 本研究制备的双层绝缘结构线芯性能检测结果

Table 3 Properties test results of insulation core with double-layer insulation structure in the research

项目	标准值	实测值
20℃绝缘电阻常数	≥3 670 MΩ·km	5 462 MΩ·km
老化前绝缘层力学性能	抗张强度≥9 MPa,断裂伸长率≥150%	抗张强度为 12.5 MPa,断裂伸长率为 235%
老化后(135℃/168 h)绝缘层力学性能	抗张强度和断裂伸长率变化率均小于 30%	抗张强度变化率为 2%,断裂伸长率变化率为 4%
绝缘层热延伸性能(200℃、15 min、20 N/cm <sup>2</sup> )	最大伸长率≤175%	最大伸长率为 25%
寿命评定试验(165℃/168 h)	断裂伸长率保留率不低于原始值的 50%	断裂伸长率保留率为 98%

从表 3 可以看出,制备的绝缘线芯 20℃绝缘电阻常数远高于 JG/T 442—2014 标准规定值,表明制备的双层绝缘结构具有较好的绝缘性能<sup>[14]</sup>。同时,制备的双层绝缘结构线芯老化前、老化后(135℃/168 h)抗张强度、断裂伸长率及热延伸性能显著优于标准值,表明该双层绝缘结构的力学性能、老化性能和热延伸性能可满足标准规定,且相关性能较为优异。根据 JG/T 442—2014 标准规定<sup>[14]</sup>和文献

[17-18],当电缆绝缘层经 165℃/168 h 老化后,如果断裂伸长率保留率不低于原始值的 50%,可判定该电缆耐热寿命可达 70 年(普通电缆耐热寿命仅为 30 年左右)。本研究制备的双层绝缘结构线芯经 165℃/168 h 老化后,断裂伸长率达保留率达到 98%,下降率仅为 2%,表明该双层结构的绝缘线芯耐热老化性能优异,具有较好的耐热寿命。

### 3 结论

(1)当挤出温度从温度 I 升高至温度 II 时,由于熔体流动性的增加,制备出的双层绝缘结构线芯表面平整,光亮度较好且内外绝缘层偏心度较小( $\leq 15\%$ )。当挤出温度从 II 升高至温度 III 时,由于熔体黏度过低,流动性过大,制备出的双层绝缘结构线芯形状出现扭曲和收缩。同时,过高的挤出温度导致添加剂或基体发生分解,因此在线芯纵截面观察到许多大小不一的气孔。

(2)当挤出温度从温度 I 升高至温度 II 时,内外绝缘料熔体黏度有所改善,从而在挤塑过程中整体流动性较好,制备出的绝缘线芯脆断截面中内外绝缘层厚度均匀。此时,由于解取向的发生,导致绝缘线芯抗张强度下降,断裂伸长率增加。当挤出温度从 II 升高至温度 III 时,由于过高的温度使得聚合物内外绝缘料黏度大幅降低,流动性的增加导致制备出的绝缘线芯双层厚度较不均匀,部分区域明显收缩。同时,由于挤出温度过高,导致外绝缘层在挤出过程中发生分解,生成了大量的气孔。由于分子链解取向的进一步增加和气孔的存在,绝缘线芯的抗张强度和断裂伸长率降低。

(3)通过挤出温度 II 制备的双层绝缘结构线芯经电子辐照交联后,其 20℃ 绝缘电阻常数、老化前后抗张强度、断裂伸长率和热延伸性能显著高于标准值,表明该双层绝缘结构的力学性能、老化性能和热延伸性能较为优异。此外,双层绝缘结构线芯经 165℃/168 h 老化后,断裂伸长率达保留率达到 98%,表明该双层结构的绝缘线芯具有较好的耐热寿命。

### 参考文献 References

- [1] 程时杰,周敏. 先进电工材料发展战略[J]. 高电压技术,2023,49(9):3573-3583.  
CHENG Shijie, ZHOU Min. Development strategy of advanced electrical materials[J]. High Voltage Engineering,2023,49(9):3573-3583.
- [2] 章彬,徐曙,巩俊强,等. 国产与进口高压电缆交联聚乙烯绝缘耐热老化性能对比分析[J]. 绝缘材料,2023,56(7):32-39.  
ZHANG Bin, XU Shu, GONG Junqiang, et al. Comparative analysis on heat ageing resistance of domestic and imported XLPE insulation for high voltage cables[J]. Insulating Materials,2023,56(7):32-39.
- [3] 周城,刘鹏,张海松,等. 阻燃改性氢氧化镁/低密度聚乙烯的性能研究[J]. 绝缘材料,2021,54(3):29-35.  
ZHOU Cheng, LIU Peng, ZHANG Haisong, et al. Properties of flame retardant modified magnesium hydroxide/low density polyethylene[J]. Insulating Materials,2021,54(3):29-35.
- [4] 王阳,朱若林,秦轩杰,等. 27.5 kV 电缆低偏心绝缘线芯的制备和性能研究[J]. 铜业工程,2023(4):108-114.  
WANG Yang, ZHU Ruolin, QIN Xuanjie, et al. Preparation and property of low eccentric insulated core for 27.5 kV cable[J]. Copper Engineering,2023(4):108-114.
- [5] 刘璐. 电线电缆挤塑工艺优化控制研究[D]. 长春:长春工业大学,2020.  
LIU Lu. Study on optimization control of extrusion process for wire and cable[D]. Changchun: Changchun University of Technology,2020.
- [6] 张灵军,杨红军. FEP 绝缘特种电缆挤出工艺之探索[J]. 世界有色金属,2021(2):136-138.  
ZHANG Lingjun, YANG Hongjun. Exploration of FEP insulation special cable extrusion process[J]. Journal of World Nonferrous Metals,2021(2):136-138.
- [7] 肖尚浩,胡春宇,赖永超,等. 中压交联电缆绝缘线芯疙瘩原因分析及解决[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2023(2):44-46.  
XIAO Shanghao, HU Chunyu, LAI Yongchao, et al. Cause analysis and solution of insulation core knots in medium voltage cross-linked cables[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications,2023(2):44-46.
- [8] 刘才富,苏键. 多层共挤复合膜技术研究进展[J]. 轻工科技,2024,40(2):108-110,113.  
LIU Caifu, SU Jian. Research progress in multi-layer co-extruded composite film technology[J]. Light Industry Science and Technology, 2024, 40(2): 108-110,113.
- [9] 郝笑龙,周海洋,孙理超,等. 共挤出成型木塑复合材料研究进展与应用[J]. 林业工程学报,2021,6(5):27-38.  
HAO Xiaolong, ZHOU Haiyang, SUN Lichao, et al. Research progress and application of co-extruded wood plastic composites [J]. Journal of Forestry Engineering,2021,6(5):27-38.
- [10] 孙学鹏. 双层挤出技术在电线电缆生产中的应用[J]. 电子技术,2022,51(3):130-131.  
SUN Xuepeng. Application of double layer extrusion technology in wire and cable production[J]. Electronic Technology,2022, 51(3):130-131.
- [11] 甄文芳,陈波,金春敏,等. 温度对电缆塑料绝缘及护套挤出质量的影响[J]. 铁道通信信号,2010,46(11):35-36.  
ZHEN Wenfan, CHEN Bo, JIN Chunmin, et al. Effect of temperature on the extrusion quality of plastic insulation and sheath of cables[J]. Railway Signalling & Communication, 2010, 46(11): 35-36.
- [12] 刘红剑,李加才,刘浩,等. 温度对高压电缆绝缘低密度聚乙烯黏度特性的影响[J]. 绝缘材料,2022,55(3):45-50.  
LIU Hongjian, LI Jiakai, LIU Hao, et al. Effect of temperature on viscosity properties of LDPE insulating materials for high-voltage cable[J]. Insulating Materials,2022,55(3):45-50.
- [13] 闵峻. 乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘电缆制备关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.  
MIN Jun. Research on key technologies of preparation process

- for ethylene-tetrafluoroethylene insulated cable[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2022.
- [14] 住房和城乡建设部建筑电气标准化技术委员会. 额定电压 0.6/1 kV 双层共挤绝缘辐照交联无卤低烟阻燃电力电缆:JG/T 442—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- Technical Committee for Building Electrical Standardization of the Ministry of Housing and Urban Rural Development. Irradiation crosslinking low-smoke halogen-free retardant power cables with double-layer extrusion insulation of rated voltage 0.6/1 kV: JG/T 442—2014[S]. Beijing: Standards Press of China,2014.
- [15] 赵帅,谢昕,张立基. 挤出温度对单层流延聚丙烯膜结构与性能的影响[J]. 中原工学院学报,2021,32(3):17-21.
- ZHAO Shuai, XIE Xin, ZHANG Liji. Effect of extrusion temperature on the structure and properties of monolayer cast polypropylene film[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology,2021,32(3):17-21.
- [16] 张斌,朱武,周科朝,等. 工艺参数对自增强 HDPE 棒材的力学性能和微观结构的影响[J]. 功能材料,2008(1):173-176.
- ZHANG Bin, ZHU Wu, ZHOU Chaoke, et al. Influences of processing parameters on mechanical properties and microstructures of self-reinforced HDPE rods[J]. Journal of Functional Materials,2008(1):173-176.
- [17] LÜ H K, LU T H, XIONG L Q, et al. Assessment of thermally aged XLPE insulation material under extreme operating temperatures[J]. Polymer Testing,2020,88(4):106569.
- [18] LIU S S, FIFIELD L, BOWLER N. Aging mechanisms of filled cross-linked polyethylene (XLPE) cable insulation material exposed to simultaneous thermal and gamma radiation[J]. Radiation Physics and Chemistry,2021,185:109486.
- 
- 收稿日期:2024-03-04;修回日期:2024-04-25。
- 作者简介:  
王阳(1992-),男(汉族),安徽安庆人,工程师,博士,研究方向为电线电缆加工制造。