

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.026

# 针状硅灰石搭配氢氧化镁在低烟无卤阻燃聚烯烃电缆料中的应用

宋建强, 刘云

(江西广源化工有限责任公司, 江西吉安 331500)

**摘要:** 以乙烯-乙酸乙烯酯、线性低密度聚乙烯和乙烯-辛烯共聚物为电缆料基体树脂, 探究不同粒径针状硅灰石(GY-2000, GY-4000, GY-6000)逐步替代部分氢氧化镁对聚烯烃电缆料性能的影响。结果表明: 针状硅灰石的高长径比结构在基体中形成增强骨架, 当添加量达 12 份(GY-6000)时, 电缆料的拉伸强度较添加纯氢氧化镁材料(11.3 MPa)最高提升约 17.7% 至 13.3 MPa, 断裂伸长率最大可达 199.2%。通过扫描电子显微镜对材料微观断口分析, 发现添加了硅灰石的试样具有不同程度的微区物理交联网络, 进而诱导形成蜂窝状韧性断裂结构, 显著提升了材料的断裂韧性; 但过量添加(12 份)时可能因团聚导致力学性能波动。在阻燃性能方面, 硅灰石与氢氧化镁表现出显著协同效应, 通过促进燃烧时形成更致密连续的炭层, 有效延缓热量与可燃气体传递, 使材料的极限氧指数(LOI)值从添加纯氢氧化镁体系的 38.6% 最高提升至 39.7%(GY-6000 添加量 9 份)。然而, 硅灰石添加量增至 12 份时, 因基体相容性劣化, 电缆料的 LOI 值轻微回落至 39.2%~39.5%。此外, 电缆料密度随硅灰石添加量增加呈线性正相关, 从 1.401 g/cm<sup>3</sup>(0 份 GY-2000)增至 1.415 g/cm<sup>3</sup>(12 份 GY-2000); 相同添加量下, 粒径更细、比表面积更大的 GY-6000 有助于制备密度相对更低的材料。

**关键词:** 聚烯烃电缆料; 针状硅灰石; 高细氢氧化镁; 拉伸强度; 阻燃性能

**中图分类号:** TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0209-07

## Application of acicular talc combined with magnesium hydroxide in halogen-free flame retardant polyolefin cable materials

SONG Jianqiang, LIU Yun

(Jiangxi Guangyuan Chemical Co., Ltd., Jian 331500, China)

**Abstract :** The influence of gradually replacing a portion of magnesium hydroxide with different particle size needle-shaped wollastonite (GY-2000, GY-4000, GY-6000) on the properties of polyolefin cable materials with ethylene-vinylate acetate, linear low-density polyethylene, ethylene-octene copolymer as base resin was explored. The results show that the high aspect structure of needle-like silica fume forms an enhanced skeleton in the matrix, and when added up to 12 phr, the tensile strength of cable material added with GY-6000 is increased by about 17.7% to 13.3 MPa compared to the system added with pure magnesium hydroxide of 11.3 MPa, and the elongation at break can reach a maximum of 199.2%. Through scanning electron microscopy analysis of the micro fracture surface, it was found that the sample added with wollastonite had varying degrees of micro area physical cross-linking networks, which induced the formation of honeycomb like tough fracture structures and significantly improved the fracture toughness of the material. However, excessive addition such as 12 parts may lead to fluctuating mechanical properties due to agglomeration. In terms of flame retardant performance, wollastonite and magnesium hydroxide show significant synergistic effects, effectively delaying the transfer of heat and combustible gases by promoting the formation of a more dense and continuous carbon layer during combustion, making limiting oxygen index (LOI) from 38.6% of pure magnesium hydroxide system maximized to 39.7% of system with an addition of 9 parts GY-6000. However when the addition amount of GY-6000 increases to 12 parts, LOI slightly declines to 39.2%~39.5% due to the deterioration of matrix compatibility. Additionally, the density of the cable material shows a linear positive correlation with the addition of silica fume, increasing from 1.401 g/cm<sup>3</sup> to 1.415 g/cm<sup>3</sup> with GY-2000 increasing from 0 parts to 12 parts. Under the same addition amount, GY-6000 with finer particle size and larger specific surface area helps to prepare materials with relatively lower density.

**Keywords :** polyolefin cable material ; needle shaped wollastonite ; fine magnesium hydroxide ; tensile strength ; flame retardancy

**通信作者:** 宋建强, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为无机非金属超细粉体的生产及其在电线电缆领域中的应用

**收稿日期:** 2025-08-07

**引用格式:** 宋建强, 刘云. 针状硅灰石搭配氢氧化镁在低烟无卤阻燃聚烯烃电缆料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 209-215.

SONG Jianqiang, LIU Yun. Application of acicular talc combined with magnesium hydroxide in halogen-free flame retardant polyolefin cable materials[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 209-215.

随着现代电力、通信及建筑行业的快速发展,聚烯烃基电缆料凭借其优异的电气绝缘性、耐化学腐蚀性和加工性能,已成为电缆制造的关键材料<sup>[1-3]</sup>。然而,聚烯烃树脂固有的易燃性限制了其在消防安全要求严苛场景中的应用。因此,开发兼具高效阻燃性、良好力学性能及低烟无卤特性的聚烯烃电缆料,已成为该领域的研究热点<sup>[4-5]</sup>。

目前,在电线电缆行业,通常是复配膨胀型阻燃剂强化其无卤、低毒和膨胀炭层等优点,主要体现在燃烧进程中,膨胀型炭层经历酯化、碳化、膨胀和固化等一系列化学反应使得聚烯烃基体形成多孔膨胀型炭层,进而隔绝热量和氧气的传递,但是,膨胀型炭层在聚烯烃基材燃烧进程中容易出现破裂、导致炭层贯通,大幅降低阻燃效果<sup>[6]</sup>;此外,也有尝试以氢氧化镁作为主体阻燃剂,磷系阻燃剂作为协效阻燃剂进行复配使用,但是该体系存在较为显著的熔滴现象,难以通过高等级的垂直燃烧测试,不能满足基本的阻燃需求<sup>[7]</sup>;同时,也有尝试采用氢氧化铝为核心阻燃剂,并复配磷氮系阻燃协效剂进行应用,但是炭层存在不连续的现象,出现多孔性炭层通孔,阻燃效应有待进一步提升<sup>[8]</sup>。

以氢氧化镁为代表的金属氢氧化物阻燃剂因其分解吸热、稀释可燃气体及促进炭层形成的多重阻燃机制,在低烟无卤电缆料中广泛应用<sup>[9-10]</sup>。然而,单一氢氧化镁体系通常需高达60%以上的填充量才能满足阻燃标准,这往往导致材料熔体流动性显著下降、力学性能劣化,制约了电缆的敷设便捷性与应用范围<sup>[11]</sup>。因此,通过复配功能性填料优化阻燃体系、平衡材料综合性能,成为突破该技术瓶颈的关键途径。

针状硅灰石( $\text{CaSiO}_3$ )作为一种天然针状无机矿物粉体,因其高长径比、高强度及良好的化学稳定性,在聚合物的力学性能、热稳定性增强以及介电性能增强等领域展现出独特优势,尤其是其能够在燃烧进程中容易烧结成炭,且其物理法粉体无毒、环保,具备较好的低碳可持续等特点<sup>[11-14]</sup>。在电缆料体系中,针状硅灰石不仅能作为力学增强剂提升基体承载能力,还可通过物理阻隔效应辅助提升阻燃性能<sup>[15]</sup>。研究表明,针状硅灰石在燃烧过程中有助于促进致密连续炭层的形成,尤其是对于炭层的强化有较高的提升效果,对于炭

层抵抗热流、气流、质流的冲击有显著提升效果,有助于迟滞甚至阻隔热量传递,协效提升阻燃效能<sup>[16]</sup>。然而,现有研究多集中于硅灰石的单一增强或阻燃效果,对其粒径效应、与氢氧化镁的协同阻燃机制及其对电缆料综合性能的系统性研究仍显不足。同时,硅灰石添加量与电缆料密度、加工性能之间的量化关系尚未明晰,限制了其在轻量化电缆产品中的进一步应用。笔者充分融合氢氧化镁和针状硅灰石各自的特点,采用不同粒径的硅灰石逐步替代部分高细氢氧化镁,分别考察了不同粒径针状硅灰石复配高细氢氧化镁对聚烯烃基电缆母粒的拉伸强度、断裂伸长率、氧指数、物理密度的影响,为多种无机矿物粉体的融合使用提供一种解决方案。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

乙烯-乙酸乙烯酯(EVAC):6110M,扬子石化巴斯夫有限责任公司;

线性低密度聚乙烯(PE-LLD):218WJ,沙特基础工业公司;

乙烯-辛烯共聚物(POE):8880,美国埃克森美孚公司;

相容剂:MC218,宁波能之光新材料科技股份有限公司;

硅酮母粒:MB50-002,美国道康宁公司;

氢氧化镁:HX-3000, $D_{50}$ (即颗粒粒度分布中,从小到大累积分布百分数达到50%时对应的粒径值)为 $3.21\ \mu\text{m}$ , $D_{97}$ (即颗粒粒度分布中,从小到大累积分布百分数达到97%时对应的粒径值)为 $12.43\ \mu\text{m}$ ,比表面积为 $11.68\ \text{m}^2/\text{g}$ ,MgO质量分数为60.39%,江西广源化工有限责任公司;

针状硅灰石:GY-2000( $D_{50}$ 为 $6.56\ \mu\text{m}$ , $D_{97}$ 为 $12.90\ \mu\text{m}$ ,表面积为 $5.45\ \text{m}^2/\text{g}$ ),GY-4000( $D_{50}$ 为 $5.65\ \mu\text{m}$ , $D_{97}$ 为 $10.79\ \mu\text{m}$ ,表面积为 $8.25\ \text{m}^2/\text{g}$ ),GY-6000( $D_{50}$ 为 $4.47\ \mu\text{m}$ , $D_{97}$ 为 $8.97\ \mu\text{m}$ ,表面积为 $10.12\ \text{m}^2/\text{g}$ ),江西广源化工有限责任公司。

### 1.2 主要仪器及设备

密炼机:CQML,江苏昆山呈乾机械有限公司;

开炼机:KY-3203,东莞市厚街开研机械设备有限公司;

压片机:KY-3201-A,东莞市厚街开研机械设备有限公司;

万能力学性能试验机:UTM,承德金建检测仪

器有限公司;

全自动氧指数(LOI)测试仪:JF-5,承德市金建检测仪器有限公司;

电子密度计:DH-300,北京仪特诺电子科技有限公司;

比表面积仪:2000E,美国康塔仪器公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU8010,日本日立公司。

### 1.3 样品制备

将针状硅灰石粉与氢氧化镁粉于105 °C恒温烘箱中干燥30 min,取出后置于干燥器内冷却至室

温备用。按表1配方准确称量各原料,预混均匀。随后,将预混料置于密炼机中,于150 °C下密炼30 min。密炼后的物料转移至双辊开炼机,在150 °C下开炼3 min。开炼均匀后,称取适量混炼胶,置于小型压片机模具中。压片工艺参数设定为:温度170 °C,保压压力10 MPa,保压时间10 min。保压结束后取出样片,室温冷压5 min定型。最后,使用标准制样机将所得片材裁切成符合后续性能测试要求的试样。表1中的配方是在聚烯烃线缆常规配方的基础上复配超细物理法氢氧化镁和不同粒度的针状硅灰石粉。

表1 试验配方

Tab. 1 Formula of experiment

Sample	EVAC	PE-LLD	POE	PE-MAH	Silicone masterbatch	HX-3000	Needle shaped wollastonite	phr
1 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	65	0	
2 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	62	3(GY-2000)	
3 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	59	6(GY-2000)	
4 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	56	9(GY-2000)	
5 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	53	12(GY-2000)	
6 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	62	3(GY-4000)	
7 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	59	6(GY-4000)	
8 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	56	9(GY-4000)	
9 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	53	12(GY-4000)	
10 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	62	3(GY-6000)	
11 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	59	6(GY-6000)	
12 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	56	9(GY-6000)	
13 <sup>#</sup>	15	20	10	5	0.6	53	12(GY-6000)	

### 1.4 性能测试

拉伸、断裂性能测试:按GB/T1040.1-2018测试,拉伸速率为50 mm/min;

密度测试:按GB/T1033.1-2008测试;

LOI测试:按GB/T2406.2-2009进行测试;

比表面积:采用比表面积仪BET进行测试;

断裂面形貌分析:样条经液氮淬断后喷金,采用SEM观察断面形貌并拍照。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氢氧化镁和针状硅灰石形貌和物性

图1为氢氧化镁(HX-3000)和不同规格针状硅灰石(GY-2000, GY-4000, GY-6000)的SEM照片。由图1可见,氢氧化镁颗粒呈现典型的片状结构,其结晶表面光滑平整,边界较为清晰,且分散较为均匀,无明显团聚现象。相比之下,针状硅灰石颗粒则表现出显著的棒状或针状形貌,具有较高的长径比。特别地,随着硅灰石粉体的目数从2 000目逐渐增加到6 000目,颗粒粒径逐渐减小。

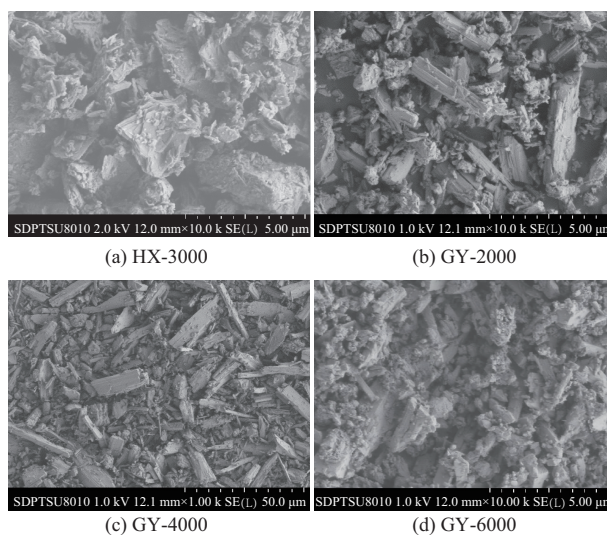


图1 氢氧化镁和针状硅灰石的SEM照片

Fig. 1 SEM photos of magnesium hydroxide and needle shaped wollastonite

### 2.2 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料拉伸强度的影响

图2为针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料拉伸强

度的影响。从图2的测试结果中可以看出,当仅使用氢氧化镁(HX-3000)作为阻燃功能助剂,未采用针状硅灰石进行替代时,聚烯烃电缆料的拉伸强度为11.3 MPa。随着针状硅灰石复配的含量增加到3份时, GY-2000, GY-4000 和 GY-6000 复配填充聚烯烃电缆料的拉伸强度分别为11.5, 11.6, 11.7 MPa, 呈现出一定的上升趋势;进一步地,随着针状硅灰石含量增加到6份, GY-2000, GY-4000 和 GY-6000 填充聚烯烃电缆料的拉伸强度分别为11.8, 11.9, 12.1 MPa, 存在较为明显的进一步增强趋势;随着针状硅灰石含量增加到9份, GY-2000, GY-4000 和 GY-6000 填充聚烯烃电缆料的拉伸强度分别为12.4, 12.5, 12.7 MPa, 拉伸强度进一步增强;随着针状硅灰石含量增加到12份, GY-2000, GY-4000 和 GY-6000 填充聚烯烃电缆料的拉伸强度分别为12.8, 13.1, 13.3 MPa, 拉伸强度得到了显著上升, 这可能是因为针状硅灰石具有较高的长径比, 其针状结构能够在聚烯烃基体中起到增强骨架的作用, 阻碍分子链的相对滑移, 同时针状硅灰石的纤维状结构更容易嵌入在聚烯烃基体中, 与分子链铰合在一起, 从而提高拉伸强度<sup>[17]</sup>。

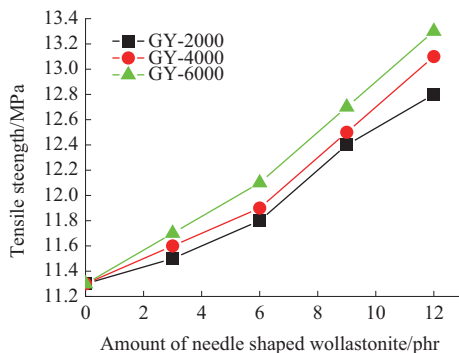


图2 针状硅灰石用量对聚烯烃电缆料拉伸强度的影响

Fig. 2 Effect of needle shaped wollastonite amount on tensile strength of polyolefin cable material

### 2.3 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料断裂伸长率的影响

图3为不同硅灰石复配含量对聚烯烃电缆料断裂伸长率的影响,从图3可以看出,当针状硅灰石含量为0时,聚烯烃电缆料的断裂伸长率为188.3%。随着针状硅灰石(GY-2000, GY-4000, GY-6000)的添加量增加至3份,电缆料的断裂伸长率出现显著提升,分别达到192.5%, 194.3%, 196.4%;当添加量进一步增至6份时,电缆料的断裂伸长率持续上升,分别为195.2%, 196.7%, 198.5%, 表明适量增加针状硅

灰石含量,能够持续优化聚烯烃电缆料的柔韧性;当添加量增加到9份时,尽管材料的断裂伸长率仍有所增长,达到196.8%, 198.4%, 199.2%, 但增长幅度已明显趋缓,说明此时针状硅灰石对断裂伸长率提升的边际效益在降低。增大的原因可能是针状硅灰石独特的针状结构能够在聚烯烃基体中起到类似“增韧”和“缓冲”的作用,且高长径比能够增强与基体的相互作用,在材料受到拉伸力时,针状硅灰石可分散分子链受到的应力,使基体能够发生更大程度的形变而不断裂,进而有效提高了断裂伸长率。进一步地,当针状硅灰石含量达到12份时,电缆料的断裂伸长率数据出现波动,分别为194.2%, 195.9%, 198.8%(GY-2000, GY-4000, GY-6000)。这可能是过高的针状硅灰石含量导致其在聚烯烃基体中发生团聚现象,破坏了材料结构的均匀性,引入更多应力集中点,使材料在拉伸时更容易断裂,从而抑制了电缆料断裂伸长率的稳定提升。综上,在低于9份的复配含量下,针状硅灰石含量的增加能够有效提升聚烯烃电缆料的断裂伸长率,改善材料的柔韧性,但超过9份复配含量后,过高的含量反而会对电缆料性能产生不利影响。

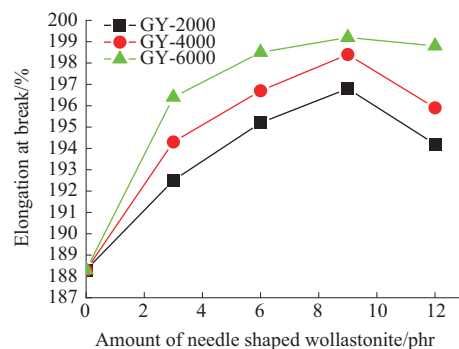


图3 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料断裂伸长率的影响

Fig. 3 Effect of needle shaped wollastonite amount on elongation at break of polyolefin cable material

### 2.4 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料LOI值的影响

图4为针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料LOI值的影响,从图4可以看出,当针状硅灰石含量为0份时,聚烯烃电缆料的LOI值为38.6%。随着针状硅灰石含量逐步增加至3份,聚烯烃电缆料(添加GY-2000, GY-4000, GY-6000)的LOI值分别提升至38.8%, 39.0%, 39.2%;当针状硅灰石添加量进一步增至6份时,电缆料的LOI值继续上升至39.2%~39.5%;当针状硅灰石提升至9份时,电缆料的LOI

值达到39.4%~39.7%的峰值区间,这是由于针状硅灰石的高长径比使其能在基体中形成较为均匀的网络状分布,不仅改善了阻燃剂的分散性,更能在燃烧的凝聚相中促进聚烯烃降解产物和高细氢氧化镁形成更致密、连续的炭层,此炭层作为有效的物理屏障,可显著延缓(甚至阻隔)热量传递和可燃气体的释放,从而与氢氧化镁产生协同阻燃效应,更高效地抑制火焰蔓延<sup>[18]</sup>。当针状硅灰石增至12份时,电缆料的LOI值出现轻微回落(39.2%~39.5%),进一步增长效果不佳,但是,仍高于添加纯氢氧化镁的材料。这可能源于填料过量导致的基体相容性劣化,过量的针状硅灰石颗粒可能破坏高细氢氧化镁在聚合物基体的分散性,进而破坏燃烧过程中形成的炭层连续性,削弱了物理阻隔效果。

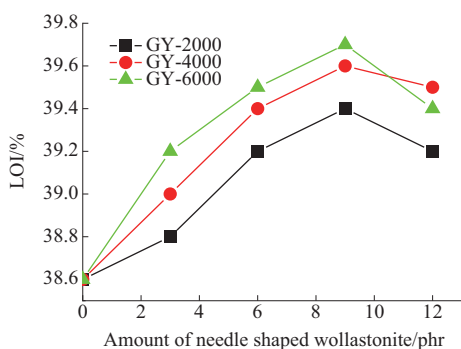


图4 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料的LOI的影响

Fig. 4 Effect of needle shaped wollastonite amount on LOI of polyolefin cable material

## 2.5 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料密度的影响

图5为针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料物理密度的影响,从图5可以看出,随着针状硅灰石添加量从0份增加到12份,聚烯烃电缆料的物理密度呈现出逐渐上升的趋势。具体地,当针状硅灰石(GY-2000)添加量为0份时,聚烯烃电缆料密度为 $1.401 \text{ g/cm}^3$ ;添加量增加到3份时,密度最高上升至 $1.405 \text{ g/cm}^3$ ;添加量达到6份时,密度进一步增长到 $1.409 \text{ g/cm}^3$ ;当添加量为9份时,密度为 $1.411 \text{ g/cm}^3$ ;当添加量达到12份时,密度达到 $1.415 \text{ g/cm}^3$ 。这表明针状硅灰石的引入可以显著增加聚烯烃电缆料的物理密度,针状硅灰石的添加量与物理密度之间存在显著的正相关关系。横向对比,在相同添加份数下,添加了GY-6000的聚烯烃电缆料密度最小,GY-4000次之,复配GY-2000的聚烯烃电缆料密度最大,这表明针状硅灰石的粒径越细,一定程度上有助于制备密度相对更低的聚烯烃电缆料。

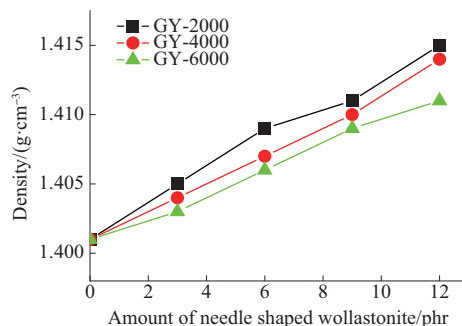


图5 针状硅灰石含量对聚烯烃电缆料密度的影响

Fig. 5 Effect of needle shaped wollastonite amount on density of polyolefin cable material

## 2.6 针状硅灰石/氢氧化镁填充POE电缆料冲击断面的SEM分析

图6为针状硅灰石/高细氢氧化镁填充聚烯烃电缆料冲击断面形貌的SEM照片。从图6的断面扫描结果可以看出,当针状硅灰石添加量为0份时,断面相对平整,片状氢氧化镁颗粒分散均匀,但存在部分界面缝隙,界面结合弱导致力学性能受限(图6a);当添加9份的GY-2000时,断面粗糙化,存在一定的交错“骨架”结构,界面模糊化表明复配的针状硅灰石粒度较大,局部可见硅灰石拔出孔洞及基体塑性变形,证实应力分散与增韧效应(图6b);对比添加9份GY-4000的样品,断面撕裂棱与褶皱密度显著增加,针状硅灰石在聚烯烃基体中的分布均匀性有效提升,冲击断面的撕裂效果与褶皱更为密集,

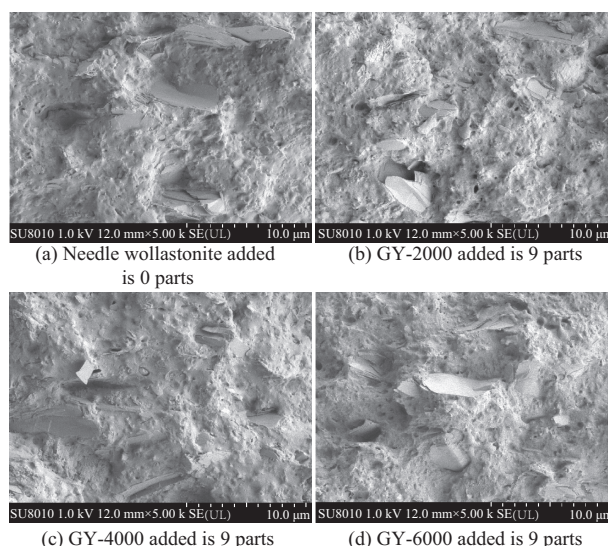


图6 针状硅灰石/氢氧化镁填充聚烯烃电缆料冲击断面形貌的SEM照片

Fig. 6 SEM photos of impact fracture morphology of needle-shaped wollastonite/magnesium hydroxide filled polyolefin cable material

硅灰石的分布均匀性显著提升,相较于GY-2000,针状硅灰石GY-4000比表面积更大,强化了界面应力传递,断面处未见明显的硅灰石团聚现象(图6c);当采用9份GY-6000填充时,形成致密连续“蜂窝状”网络结构,这表明复配了高比表面积( $10.12 \text{ m}^2/\text{g}$ )的针状硅灰石可以促使聚烯烃分子链紧密缠绕颗粒表面,形成强界面层,硅灰石与基体协同韧性断裂,无显著拔出效应(图6d)。综上,针状硅灰石通过高长径比结构构建物理交联网络,结合粒径细化(比表面积增大)强化的界面相互作用,协同诱导多重能量耗散机制,可显著提升聚烯烃电缆料的断裂韧性。

### 3 结论

(1)针状硅灰石通过高长径比结构在基体中起到增强骨架作用,显著提升了聚烯烃电缆料的拉伸强度和断裂伸长率,微观断面也分析证实其通过界面强韧化与多重能量耗散,诱导蜂窝状韧性断裂结构,形成更粗糙的断面结构,从而提升材料的力学性能,但过量添加(超过9份时)会因团聚导致性能波动。

(2)针状硅灰石能与氢氧化镁产生协同阻燃效应,促进燃烧时致密连续炭层的形成,延缓热量传递和可燃气体释放,提升聚烯烃电缆料的LOI值,但过量添加则因界面相容性劣化,导致材料LOI值轻微下降。

(3)聚烯烃电缆料的密度随针状硅灰石添加量的增加而上升,二者呈正相关,在相同添加量下,采用粒径越细、比表面积越大的针状硅灰石GY-6000制备的电缆料密度相对更低。

#### 参考文献

- [1] 金赣,苏梦悦,王奕隆,等. 无卤阻燃聚烯烃电缆料及其与阻燃剂相容性的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3):172-178.  
JIN Gan, SU Mengyue, WANG Yilong, et al. Research progress on halogen-free flame retardant polyolefin cable materials and their compatibility with flame retardants[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3):172-178.
- [2] 张伟,陈杰,李陈莹,等. 无卤阻燃聚烯烃电力电缆料的应用现状[J]. 中国塑料, 2022, 36(1):184-191.  
ZHANG Wei, CHEN Jie, LI Chenying, et al. Applications of halogen-free flame-retardant polyolefin power cable materials[J]. China Plastics, 2022, 36(1):184-191.
- [3] 蔡安惠,曾昌作,刘洋,等. 低烟无卤阻燃聚烯烃绝缘料耐水性能研究[J]. 电线电缆, 2025(3):28-33.  
CAI Anhui, ZENG Changzuo, LIU Yang, et al. Research on water resistance of low-smoke halogen-free flame retardant polyolefin insulation[J]. Wire & Cable, 2025(3):28-33.
- [4] 金楷皓,王新古,赵健军,等. 阻燃剂对低烟无卤聚烯烃电缆料性能的影响[J]. 绝缘材料, 2020, 53(3):1-6.  
JIN Kaihao, WANG Xingu, ZHAO Jianjun, et al. Effect of flame retardant on properties of low-smoke halogen-free polyolefin cable materials[J]. Insulating Materials, 2020, 53(3):1-6.
- [5] 李计彪,付晓,王中武,等. 高性能低烟无卤聚烯烃电缆护套料の開発[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(7):114-120.  
LI Jibiao, FU Xiao, WANG Zhongwu, et al. Development of high performance low smoke halogen-free polyolefin cable sheath[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(7):114-120.
- [6] 吕子璇,王云飞,王福海,等. 纳米蒙脱土与新型膨胀型阻燃体系协同阻燃聚丙烯[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4):152-160.  
LYU Zixuan, WANG Yunfei, WANG Fuhai, et al. Montmorillonite and new intumescent flame retardant system synergistic flame retardant polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4):152-160.
- [7] 叶翔宇. 三聚氰胺氰尿酸盐在阻燃聚乙烯电缆料中的应用与性能研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(7):28-31.  
YE Xiangyu. Application and performance study of melamine cyanurate in flame-retardant polyethylene cable materials[J]. China Plastics, 2025, 39(7):28-31.
- [8] 吴松金,田冠楠,何洪瑞,等. 磷氮铝协同阻燃低烟无卤聚烯烃材料性能研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(4):22-27.  
WU Songjin, TIAN Guannan, HE Hongrui, et al. Properties of phosphorus nitrogen aluminum synergistic flame retardant low smoke halogen-free polyolefin materials[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4):22-27.
- [9] 任政,王旭. 氢氧化铝/氢氧化镁协同阻燃低烟无卤聚烯烃电缆料的研究[J]. 塑料助剂, 2018(4):36-40.  
REN Zheng, WANG Xu. Collaborative flame retardant of aluminum hydroxide and magnesium hydroxide for low-smoke non-halogen flame-retardant polyolefine cable materials[J]. Plastics Additives, 2018(4):36-40.
- [10] 段春来,孙凯,洪森林. 氢氧化镁在低烟无卤阻燃聚烯烃绝缘料和护套料中的应用[J]. 电线电缆, 2024(3):7-10.  
DUAN Chunlai, SUN Kai, HONG Senlin. Application of magnesium hydroxide in low-smoke halogen-free flame-retardant polyolefin insulation and sheathing compounds[J]. Wire & Cable, 2024(3):7-10.
- [11] 周鑫,高天奇,刘文庭,等. 聚烯烃护套用无卤阻燃剂的研究进展[J]. 电线电缆, 2025(3):1-9.  
ZHOU Xin, GAO Tianqi, LIU Wenting, et al. Research progress of halogen-free flame retardants for polyolefin sheathing[J]. Wire & Cable, 2025(3):1-9.
- [12] WONG J F, CHAN J X, BIN HASSAN A, et al. Thermal and

- flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: A review[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(15):8 911–8 950.
- [13] WU Q, CUI X Y, MU C Z, et al. Toward a new approach to synchronously improve the fire performance and toughness of polylactic acid by the incorporation of facilely synthesized ammonium polyphosphate derivatives[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106595.
- [14] 肖小兵, 宋建强, 邱文福. 硅灰石替代滑石粉在聚丙烯复合材料中的应用[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(9):158–162.  
XIAO Xiaobing, SONG Jianqiang, QIU Wenfu. Application of wollastonite instead of talc in polypropylene composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(9):158–162.
- [15] 王忠光, 赵桂英, 秦广辉, 等. 硅灰石/氯磺化聚乙烯电缆料的性能研究[J]. *橡塑技术与装备*, 2020, 46(12):8–10.  
WANG Zhongguang, ZHAO Guiying, QIN Guanghui, et al. Properties study of wollastonite/CSM cable compounds[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2020, 46(12):8–10.
- [16] CHEE S S, JAWAID M, ALOTHMAN O Y, et al. Thermo-oxidative stability and flammability properties of bamboo/kenaf/nanoclay/epoxy hybrid nanocomposites[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(37):21 686–21 697.
- [17] XUE C Y, QIN Y, FU H D, et al. Thermal stability, mechanical properties and ceramization mechanism of epoxy resin/Kaolin/quartz fiber ceramifiable composites[J]. *Polymers*, 2022, 14(16). DOI:10.3390/polym14163372.
- [18] SHANG K, LIN G D, JIANG H J, et al. Flame retardancy, combustion, and ceramization behavior of ceramifiable flame-retardant room temperature vulcanized silicone rubber foam[J]. *Fire and Materials*, 2023, 47(8):1 082–1 091.