

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.004

γ 辐射对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料性能的影响

田青亮, 郭文慧, 张振亚, 刘树博, 杨明成, 张本尚, 陈超, 牛帅

(河南省科学院同位素研究所有限责任公司, 郑州 450015)

摘要:以线型低密度聚乙烯(PE-LLD)、乙烯-乙酸乙烯酯塑料(EVAC)为基体树脂,氢氧化镁[Mg(OH)₂]和微胶囊化红磷(MRP)为阻燃剂,通过熔融挤出法制备PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料;利用⁶⁰Co- γ 射线对其进行辐射改性,并研究辐射剂量对材料力学性能、耐热性能、耐热老化性能和阻燃性能的影响。结果表明,当辐射剂量不高于40 kGy时,复合材料的拉伸强度、凝胶含量、热变形温度均随辐射剂量的增加而提高;当辐照敏化剂三烯丙基异腈酸酯质量分数为2%,辐射剂量为40 kGy时,复合材料的拉伸强度达到了15.9 MPa,断裂伸长率为240%,热变形温度提高至135℃,极限氧指数为34%,耐热老化性能得到明显改性,能够满足国家标准GB/T 12528-2008的相关要求,并达到耐温125℃等级。

关键词:线型低密度聚乙烯; 乙烯-乙酸乙烯酯塑料; 氢氧化镁; 微胶囊化红磷; 辐射改性; 阻燃

中图分类号: TQ322.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0022-06

Effects of γ -irradiation on Properties of PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP Composites

Tian Qingliang, Guo Wenhui, Zhang Zhenya, Liu Shubo, Yang Mingcheng, Zhang Benshang, Chen Chao, Niu Shuai

(Isotope Institute Co. Ltd., Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Taking linear low density polyethylene (PE-LLD) and ethylene-vinyl acetate plastic (EVAC) as matrix resin, magnesium hydroxide [Mg(OH)₂] and microencapsulized red phosphorus (MRP) as flame retardant, PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP composites were prepared by melt extrusion. The composites were modified by ⁶⁰Co- γ ray, and the effects of radiation dose on mechanical properties, heat resistance, heat aging resistance and flame resistance of the composites were studied. The results show that when radiation dose is not higher than 40 kGy, the tensile strength, gel content and heat deformation temperature of the composite increase with the increase of radiation dose. When mass fraction of irradiation promoter TAIC is 2%, radiation dose is 40 kGy, the tensile strength of the composite reaches 15.9 MPa, the elongation at break is 240%, the heat deformation temperature is increased to 135℃, the limiting oxygen index is 34%, and the heat aging resistance is improved obviously, the performances of the composite can meet the requirements of the national standard GB/T 12528-2008, and reach the 125℃ heat-resistance rating.

Keywords: linear low density polyethylene; ethylene-vinyl acetate plastic; magnesium hydroxide; microencapsulized red phosphorus; radiation modification; flame retardant

电线电缆是当今社会生活和生产必备的工业用品之一,随着现代化城市经济的快速发展与进步,其社会和市场需求量越来越大^[1-2],同时,人们的环保与安全意识不断提高,对电线电缆的要求也越来越高,低烟无卤阻燃电缆料因其环保安全的特点被推广应用^[3-4]。随着其应用范围的扩大,应用场合的增多,能够满足耐油、耐温、耐腐蚀、抗低温开裂等

不同特殊要求的低烟无卤阻燃电缆料的需求量也在逐年增加^[5-7]。市场的需求不断刺激着电线电缆材料的发展,线型低密度聚乙烯(PE-LLD)作为一种重要的电线电缆基体材料,具有无毒、质优、价廉、优异的电绝缘性和耐化学腐蚀性等优点,其电学性能和力学性能均较优秀,但当其作为电线电缆材料时,具有明显的缺点:阻燃和耐热性能差,极限氧指数

基金项目: 河南省科技攻关项目(182102210356),河南省科学院基本科研费项目(18JL16016)

通讯作者: 杨明成,博士,研究员,主要从事核技术应用研究 E-mail: ymch-7305@126.com

收稿日期: 2019-03-28

引用格式: 田青亮,郭文慧,张振亚,等. γ 辐射对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用,2019,47(7): 22-27.

Tian Qingliang, Guo Wenhui, Zhang Zhenya, et al. Effects of γ -irradiation on properties of PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7): 22-27.

(LOI) 仅为 17.5%^[8-10]。因而,为了拓宽 PE-LLD 在电线电缆行业的应用,对其进行改性是十分必要的。

氢氧化镁 [Mg(OH)₂] 作为一种来源广泛,价格低廉的阻燃剂,将其与聚烯烃复合制备聚烯烃 / Mg(OH)₂ 复合材料,不但可以提高材料的阻燃性能、耐热性能,还能降低材料生产成本,满足市场需求。红磷本身是一种具有高效阻燃性和抑烟性能的阻燃剂,其作为协效阻燃剂,与 Mg(OH)₂ 复配能够起到很好的协同效果^[11]。除此之外,对电线电缆基体材料进行交联改性,可以有效提高其抗老化、耐热性能,而在电线电缆行业中常用的交联方法可以归结为三大类:辐射交联、过氧化物交联和硅烷交联^[12],其中 γ 辐射交联具有绿色、生产工艺简单、过程可控的优点,尤其适用阻燃与耐高温性能材料。为此,笔者以 Mg(OH)₂ 和微胶囊化红磷 (MRP) 为复配阻燃剂,制备了一种 γ 辐射交联的 Mg(OH)₂ 和 MRP 协效阻燃 PE-LLD 基复合材料,该材料是一种极具发展前途的绿色环保电缆材料,研究和开发该类材料对电线电缆行业的发展、环境保护和节约能源具有重要的意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-LLD: YLF-1802,中国石化扬子石油化工有限公司;

乙烯-乙酸乙烯酯塑料 (EVAC): 1828,韩华化学公司;

Mg(OH)₂: Aitemag[®]55,江苏艾特克阻燃材料有限公司;

MRP: 深圳市宏泰基实业有限公司;

抗氧剂 1010、抗氧剂 168: 工业级,宁波金海雅宝化工有限公司;

三烯丙基异腈酸酯 (TAIC): 上海方锐达化学品有限公司;

马来酸酐接枝 EVAC (EVAC-g-MAH): C250,接枝率 0.8%,上海日之升新技术发展有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机: SHJ-36 型,南京杰恩特机电有限公司;

注塑机: HTF80B-W2 型,宁波海天股份有限公司;

⁶⁰Co 放射源: 河南省科学院同位素研究所有限责任公司;

万能试验机: RGM-3010 型,深圳市瑞格尔仪

器有限公司;

LOI 测定仪: JF-3 型,北京恒奥德仪器仪表有限公司;

电线电缆烟密度测试仪: XLR-1900 型,东莞市塘厦鑫磊仪器厂;

差示扫描量热 (DSC) 分析仪: STA449c 型,德国 Netzsch 公司;

热变形维卡温度测定仪: WKW: 300 型,长春市智能仪器设备有限公司;

空气热老化箱: RLH-100 型,南京环科试验设备有限公司;

热延伸箱: NR8851C 型,东莞市纳瑞仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

将 PE-LLD, EVAC 置于 60℃ 真空干燥箱中干燥 12 h; 将干燥好的 PE-LLD 与 EVAC 按照一定的比例在高速共混机中共混 3 min, 然后将 TAIC 加入共混机中共混 2 min, 接着添加复配好的阻燃剂及各种助剂 (其中 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP/EVAC-g-MAH 的质量比为 70/30/40/10/10), 待混合均匀后将混合料在挤出机中挤出、造粒, 干燥并使用注塑机注射成标准试样。将标准试样真空包装并放置于 ⁶⁰Co 放射源辐射室内辐射, 辐射后对试样进行测试和表征。图 1 为复合材料的制备工艺流程, 表 1 和表 2 分别为主要挤出和注塑工艺参数。

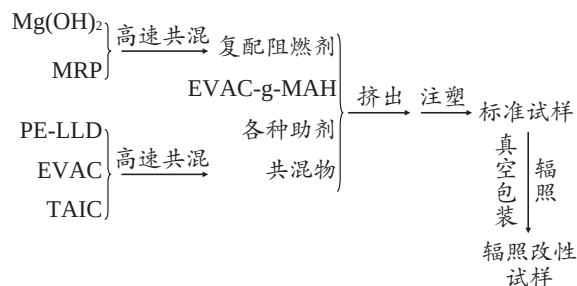


图 1 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的制备工艺流程图

表 1 主要挤出工艺参数

机头温度 / 度 / °C	熔体压力 / MPa	机筒温度 / °C							
		一区	二区	三区	四区	五区	六区	七区	八区
180	0.18	175	178	185	188	188	185	185	180

表 2 主要注塑工艺参数

模具温度 / °C	保压压力 / MPa	机筒温度 / °C			
		一区	二区	三区	四区
60	60	180	188	190	185

1.4 测试及表征

力学性能测试: 按照 GB/T 1040.2-2006 测试拉伸性能, 拉伸速度设为 50 mm/min。

凝胶含量及热延伸性能测试参照文献[13]相关部分进行。

熔融结晶行为测试:将试样于真空下干燥约12 h至恒重,称取3~5 mg进行DSC测试;在高纯 N_2 为保护气体条件下,以 $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $150\text{ }^\circ\text{C}$,以相同速率降温至 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 后再次升温至 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。

热老化试验:将试样悬挂在空气热老化箱中部且间距不少于20 mm,在恒温 $(158 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 下处理168 h,测试中将空气热老化箱内的全部空气按每小时8~20次更换。

热变形温度测定:按照GB/T 1634.1-2004,将试样平放,设置升温速度为 $120\text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$,取温度误差在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 以内的两个试样的平均值作为最终测试结果。

烟密度测试:按照GB/T 17651.2-1998,制备一根外径为45 mm长1 m的线缆,在燃烧室中燃烧,火焰熄灭之后5 min或者试验持续时间达到40 min时,若透光率不再减小,则试验结束,记录透光率作为烟密度的表征指标。

LOI测试:按照GB/T 2406-1993,采用顶面点燃法,截取矩形标准试样 $80\sim 150\text{ mm}$,在距试样顶端50 mm处划线,当燃烧达到标线时火焰熄灭,则记录得到试样的LOI,或者火焰恰好燃烧3 min熄灭也可以记录得到LOI。至少测试15根试样,直到相邻三组数据误差不超过0.5%,记录数据。

2 结果与讨论

2.1 辐射对PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料力学性能的影响

不同辐照敏化剂TAIC含量下辐射剂量对PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料拉伸强度的影响结果如图2所示。

由图2可以看出,相同辐射剂量下,没有添加敏

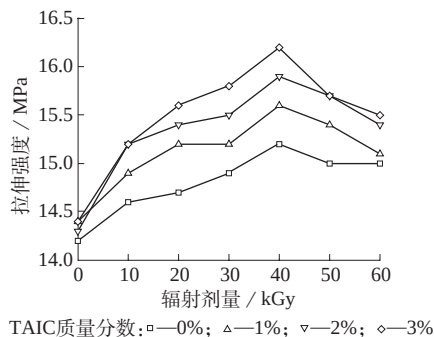


图2 不同TAIC含量下不同辐射剂量的PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料的拉伸强度

化剂的材料拉伸强度相比于添加辐射敏化剂的材料偏低,这表明敏化剂的添加能够在一定程度上提高PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料的拉伸强度。相同TAIC添加量下,随着辐射剂量的增加,PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料的拉伸强度曲线出现先升高后下降的趋势,下降拐点均在辐射剂量40 kGy处。当辐照剂量为40 kGy时,TAIC质量分数为3%的复合材料的拉伸强度相对最高,由14.4 MPa(未辐射)增加至16.2 MPa,提高了12.5%,其次为TAIC质量分数为2%的复合材料,其拉伸强度为15.9 MPa,相比未辐射时提高了10.4%。这可能是因为,随着辐射剂量的增加,复合材料的交联度增大,形成交联网状结构,从而使得复合材料的拉伸强度提高;但当辐射剂量大于40 kGy时,复合材料的拉伸强度出现了下降的趋势,这可能是因为辐射剂量过大,复合材料发生降解导致的^[14]。

从图2推测可知,PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料经 γ 射线辐射后拉伸强度的变化是由交联度的变化引起的,而交联度的变化可以用测定凝胶含量的方法来表征。为了探究不同辐射剂量下交联度的变化,对复合材料的凝胶含量进行了测试,结果如图3所示。

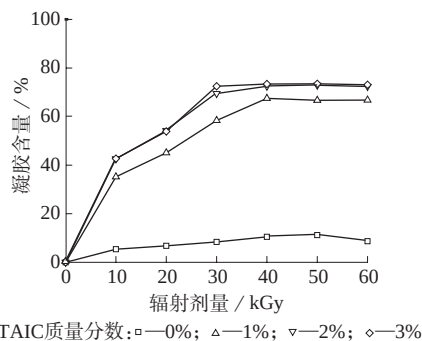


图3 不同TAIC含量下不同辐射剂量的PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料的凝胶含量

从图3可以看出,随着辐射剂量的提高,未添加敏化剂的复合材料交联度虽有所提高,但远低于添加敏化剂的复合材料。而加入了敏化剂的复合材料的凝胶含量随着辐射剂量的增加急剧增加,这主要是因为辐射会促使复合材料内部大分子链形成三维网状交联结构,交联度增加,表现为凝胶含量提高;当辐射剂量持续增加达到40 kGy后,凝胶含量趋于稳定。除此之外,还可以观察到,随着TAIC含量的增加,PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP复合材料的凝胶含量也随之提高,但当TAIC质量分数达

到 2% 后,继续提高 TAIC 含量,凝胶含量增加趋势不明显,这是因为敏化剂含量的增加提供了更多的活性自由基分子,能够促进复合材料的交联反应,因而表现出凝胶含量增加,但敏化剂不能无限制地提高活性自由基的量,因而继续增加敏化剂含量,凝胶含量趋于稳定。在敏化剂 TAIC 质量分数为 2%,辐射剂量为 40 kGy 时,复合材料的凝胶含量达到了稳定值,为 72.5%。

图 4 示出不同 TAIC 含量下辐射剂量对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料断裂伸长率的影响。由图 4 可以看到,未添加 TAIC 的复合材料和添加质量分数 1%,3% TAIC 的复合材料的断裂伸长率均略低于添加 2% TAIC 的复合材料;且每组复合材料的断裂伸长率随辐射剂量的增加而减小,当辐射剂量为 60 kGy 时,添加 2% TAIC 的复合材料的断裂伸长率降低至 170%,相比未辐射时的断裂伸长率 (390%) 下降了 56.0%。这一变化出现的原因可能是,辐射剂量的增加,提高了复合材料的交联程度,完善了聚烯烃分子链的三维网络结构,网络结构的完善使大分子链之间的相对滑移变得困难,限制了链段的运动,增加了分子链间的作用力,从而增强了材料的拉伸强度,但高分子链间的相对滑移几乎完全被交联网限制,因而出现断裂伸长率降低的现象。综合图 2、图 3、图 4 来说,敏化剂 TAIC 的添加对复合材料的力学性能有一定的改善作用。总体来看,TAIC 质量分数为 2% 和 3% 时,复合材料的力学性能相差不大,为降低成本,可将 TAIC 适宜的质量分数定为 2%。

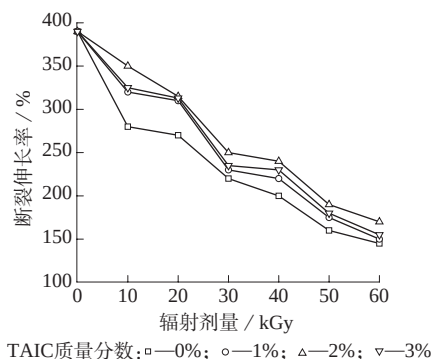


图 4 不同 TAIC 含量下不同辐射剂量的 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的断裂伸长率

2.2 辐射对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料热变形温度的影响

不同辐射剂量对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料热变形温度的影响如图 5 所示。从

图 5 可以看出, PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的热变形温度随着辐射剂量的增加先升高后降低;当辐射剂量达到 40 kGy 时,复合材料的热变形温度提高至 135℃,相比于未辐射的复合材料 (热变形温度 118℃) 提高了 17℃。这主要是由于辐射改性后,复合材料内部交联形成三维交联网状结构,刚性骨架结构形成,从而提高了复合材料的耐热性能。但当辐射剂量继续增大时,复合材料的热变形温度却随之降低,这可能是因为过量的辐射导致复合材料发生降解或者其它副反应^[15],出现老化现象,从而使复合材料的耐热性能有所下降。

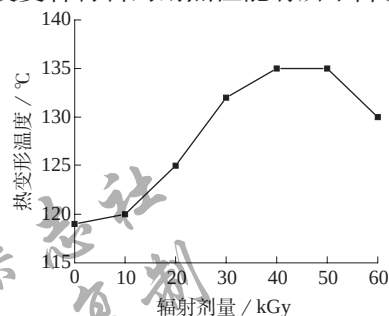
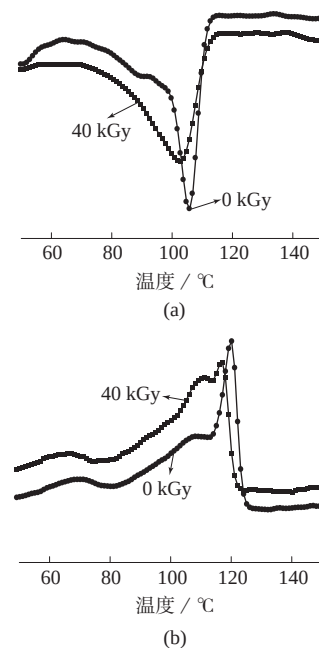


图 5 不同辐射剂量的 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的热变形温度

2.3 辐射对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料熔融结晶行为的影响

图 6 为辐射前后 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的降温和二次升温 DSC 曲线。



a—降温曲线; b—二次升温曲线

图 6 辐射前后 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的降温和二次升温 DSC 曲线

从图 6a 可以得出,辐射后复合材料的结晶温度较辐射前有所降低,结晶峰变宽,结晶焓下降;从图 6b 可以得出,辐射后复合材料的熔融温度较未辐射的降低,熔融峰变宽,熔融焓降低。以上熔融结晶行为结果表明:PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料经辐射改性后,聚烯烃分子链交联形成了三维网状结构,内部大分子链段的运动更加困难,降低了结晶完善性,使内部出现晶格缺陷^[16-17]。

2.4 辐射对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料耐热老化性能和热延伸性能的影响

表 3 和表 4 分别示出经不同辐射剂量处理的 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料热老化前后的拉伸强度和断裂伸长率的变化情况。从表 3、表 4 可以看出,当辐射剂量偏低时,经热老化处理后材料的抗拉强度和断裂伸长率的变化明显,下降率较大,当辐射剂量为 20 kGy 时,材料的拉伸强度由 15.4 MPa 变为 10.2 MPa,降低了 34%,断裂伸长率更是由 310% 下降至 140%,降低了 55%,出现这一明显变化的原因可能是因为辐射剂量偏低,复合材料交联度与凝胶含量低,耐热老化性能差,经热老化处理后,材料发生老化反应,性能降低明显^[18]。而当辐射剂量为 40 kGy 时,经热老化处理后材料的拉伸强度和断裂伸长率的下降率相对最小,拉伸强度由 15.9 MPa 降低至 13.8 MPa,下降率为 13%,断裂伸长率由 240% 降低至 182%,下降率为 24%。GB/T 12528-2008 要求材料老化后拉伸强度的下降率 ≤ 25%,断裂伸长率的下降率 ≤ 40%。亦即是说,经 40 kGy 辐射剂量处理的 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的热老化性能完全满足国家标准的要求。

表 3 经不同辐射剂量处理的复合材料热老化前后的拉伸强度

辐射剂量 / kGy	拉伸强度 / MPa		下降率 / %
	老化前	老化后	
0	14.2	9.5	33
20	15.4	10.2	34
40	15.9	13.8	13
60	15.6	12.8	18

表 4 经不同辐射剂量处理的复合材料热老化前后的断裂伸长率

辐射剂量 / kGy	断裂伸长率 / %		下降率 / %
	老化前	老化后	
0	390	120	69
20	310	140	55
40	240	182	24
60	170	90	47

辐射剂量对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料热延伸性能影响的结果如表 5 所示。未辐射的材料在负荷下直接断裂,没有热延伸数据,即未

通过热延伸性能测试;辐射剂量较低 (20 kGy) 的材料在负荷下的热延伸率最大,冷却后永久变形率超出 GB/T 12528-2008 的要求 (热延伸率 ≤ 175%, 冷却后永久变形率 ≤ 20%);而当辐射剂量为 40, 60 kGy 时,复合材料热延伸性能满足国家标准要求。其中辐射剂量为 40 kGy 的复合材料热延伸率为 15%,冷却后永久变形率为 5%,相对于其它辐射剂量下的数值均为最小。

表 5 经不同辐射剂量处理的复合材料的热延伸性能

辐照剂量 / kGy	热延伸率 / %	冷却后永久变形率 / %
0		
20	50	25
40	15	5
60	18	10

2.5 辐射对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料阻燃性能的影响

图 7 为不同辐射剂量对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料 LOI 和透光率 (烟密度测试指标) 的影响。由图 7 可以明显看到,随着辐射剂量的增加,复合材料的透光率曲线,也就是烟密度曲线基本保持稳定,数值在 82% 左右;而 LOI 随着辐射剂量的增加而增加,且数值均在 31% 以上,表明不同辐射剂量的复合材料阻燃性能均能满足相关要求 (GB/T 12528-2008 要求材料经烟密度测试后透光率 ≥ 70%,而工业上 LOI 超过 27% 即可认为达到难燃级别)。当辐射剂量为 40 kGy 时,LOI 达到了 34%,继续增加辐射剂量,LOI 的变化幅度较小。综合所测试的其它性能,作为低烟无卤阻燃聚烯烃电缆料,只有经 40 kGy 辐射剂量处理的 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料能够满足 GB/T 12528-2008 的要求,并达到耐温 125℃ 等级。

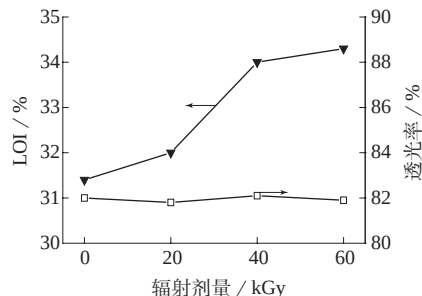


图 7 不同辐射剂量的复合材料的阻燃性能

3 结论

(1) 辐照敏化剂 TAIC 的加入对 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料力学性能具有一定的改善作用;且在辐射剂量不高于 40 kGy 时,复合材料的拉伸强度、凝胶含量、热变形温度均随辐射

剂量的增加而增大。

(2) 辐射改性后,复合材料的结晶温度和熔融温度降低,结晶峰和熔融峰变宽,结晶焓和熔融焓下降,表明辐射改性后复合材料的结晶受到抑制。

(3) 复合材料的耐热老化性能、热延伸性能和阻燃性能均会受到 γ 辐射处理的影响。其中,LOI 随辐射剂量的增加而增大;而在受到低剂量辐射处理时,热老化后的拉伸性能下降率,以及热延伸率和冷却后永久变形率相对高剂量时更高。

(4) 经 40 kGy 辐射剂量处理的 PE-LLD/EVAC/Mg(OH)₂/MRP 复合材料的性能满足 GB/T 12528-2008 的要求,并达到耐温 125℃ 等级。

参考文献

- [1] 包金芳,张尔梅,杜业波. 辐照交联低烟无卤阻燃聚烯烃电缆料抗撕性能的研究[J]. 塑料助剂,2017(1):48-52.
Bao Jinfang, Zhang Ermei, Du Yebo. Study on tear-resistant property of irradiation crosslinkable low-smoke non-halogen flame-retardant polyolefin cable material[J]. Plastics Additives, 2017(1):48-52.
- [2] 马宝红,鲍文波,姜国发,等. 紫外光交联对低烟无卤阻燃电缆绝缘材料性能的影响[J]. 中国塑料,2017,31(6):95-99.
Ma Baohong, Bao Wenbo, Jiang Guofa, et al. Influence of UV crosslinking on properties of insulation materials used for low-smoke halogen-free flame-retardant cables[J]. China Plastics, 2017, 31(6):95-99.
- [3] 茅雪林. 阻燃电缆的现状与发展综述[J]. 科技风,2008(20):31.
Mao Xuelin. Summary of the status and development of flame retardant cables[J]. Technology Wind, 2008(20):31.
- [4] 何亮,王献民,王跃,等. 中国电线电缆行业经济现状[J]. 中国外资,2013(7):72,74.
He Liang, Wang Xianmin, Wang Yue, et al. Economic status of China's wire and cable industry[J]. Foreign Investment in China, 2013(7):72,74.
- [5] 王竞. 低烟无卤阻燃聚烯烃电缆料抗开裂性能的研究[J]. 上海塑料,2014(2):25-27.
Wang Jing. Study on anti cracking performance of low-smoke halogen-free flame retardant polyolefin cable material[J]. Shanghai Plastics, 2014(2):25-27.
- [6] 胡涛,李春光,曾自强,等. 电子束辐射制备木塑复合材料的研究[J]. 原子能科学技术,2016,50(5):944-949.
Hu Tao, Li Chunguang, Zeng Ziqiang, et al. Study on preparation of wood-plastic composite based on electron beam irradiation[J]. Atomic Energy Science & Technology, 2016, 50(5):944-949.
- [7] 刘玲,叶红卫. 无卤阻燃聚烯烃电缆料的发展概况[J]. 石化技术与应用,2000,18(1):40-43.
Liu Ling, Ye Hongwei. Development of halogen free flame retardant polyolefin cable material[J]. Science & Technology of Lcic, 2000, 18(1):40-43.
- [8] Fu Qiang. The pyrolysis of inorganic fire retardant polyolefin cable materials[J]. Procedia Engineering, 2016, 135:293-298.
- [9] 张凯,李秀峰,徐曼,等. 一种抗开裂低烟无卤阻燃聚烯烃电缆护套料[J]. 电线电缆,2013(3):21-23.
Zhang Kai, Li Xiufeng, Xu Man, et al. An anti-cracking low smoke halogen free and flame retardant polyolefin cable sheath material[J]. Electric Wire & Cable, 2013(3):21-23.
- [10] 梁伟,罗福安,肖义. 充电桩电缆用 PVC 护套料的开发[J]. 聚氯乙烯,2017,45(10):21-24.
Liang Wei, Luo Fuan, Xiao Yi. Development of PVC compounds for charging pile cable sheath[J]. Polyvinyl Chloride, 2017, 45(10):21-24.
- [11] 陈刚,张志平. 赤磷阻燃母料在再生尼龙中的应用[J]. 塑料工业,2008,36(12):64-67.
Chen Gang, Zhang Zhiping. Application of red phosphorus flame retardant masterbatch in field of recycled nylon[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(12):64-67.
- [12] 周盼,肖成,夏发明,等. 辐照交联聚烯烃/硅橡胶弹性体性能研究[J]. 胶体与聚合物,2018,36(4):154-156.
Zhou Pan, Xiao Cheng, Xia Faming, et al. Study on properties of irradiation crosslinked polyolefin / silicone elastomers[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2018, 36(4):154-156.
- [13] 牛帅. 125℃低烟无卤阻燃聚烯烃电缆料的制备[D]. 郑州:郑州大学,2016.
Niu Shuai. Preparation of 125℃ irradiation LSZH flame retardant polyolefin cable sheath[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2016.
- [14] Beveridge C, Sabiston A. Methods and benefits of crosslinking polyolefins for industrial applications[J]. Materials & Design, 1987, 8(5):263-268.
- [15] 王吉祥,谢放华,曾虹燕,等. 辐照对聚丙烯粉末氧化裂解的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2018,36(5):21-29.
Wang Jixiang, Xie Fanghua, Zeng Hongyan, et al. Effects of radiation on oxidation scission of polypropylene powder[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, 36(5):21-29.
- [16] Beneš M, Plaček V, Matuschek G, et al. Characterization of PVC cable insulation materials and products obtained after removal of additives[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 99(3):788-795.
- [17] Beneš M, Milanov N, Matuschek G, et al. Thermal degradation of PVC cable insulation studied by simultaneous TG-FTIR and TG-EGA methods[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2004, 78(2):621-630.
- [18] Csányi G M, Tamus Z Á. Temperature dependence of conductive and polarization processes of PVC cable[C]//Proceedings of the 32nd electrical insulation conference. New York:IEEE, 2014:299-302.