

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.029

# 环保型复配阻燃剂在木塑复合材料中的应用进展

赵梓函, 李祥瑞, 李春风, 刘明利  
(北华大学材料科学与工程学院, 吉林吉林 132000)

**摘要:**木塑复合材料(WPC)兼具木材的生态性和塑料的可加工性,是一类生态环保材料。基于当前WPC易燃且燃烧后产生有害气体,从而造成了对人体健康的危害和对环境的污染等问题,围绕进一步提升WPC的阻燃效率和满足环保条件进行了讨论,着重介绍了WPC的燃烧特性,综述了碳系、金属系、矿质系、磷系、硼系环保型阻燃剂与其他元素阻燃剂进行复配协同提升WPC阻燃抑烟的研究进展,对比单一阻燃剂,环保型复配阻燃剂在阻燃和环保方面具有优越性。同时,还对环保型WPC阻燃剂的未来发展趋势提出了展望和建议。

**关键词:**木塑复合材料;环保阻燃;碳系;金属系;矿质系;磷系;硼系

**中图分类号:**TQ327.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2024)03-0186-06

## Application progress of environmentally friendly composite flame retardants in wood plastic composites

ZHAO Zihan, LI Xiangrui, LI Chunfeng, LIU Mingli

(School of Materials Science and Engineering, Beihua University, Jilin 132000, China)

**Abstract:** Wood plastic composites (WPC) combine the ecological properties of wood and the processability of plastic are a type of environmentally friendly materials. Based on the current situation where WPC is flammable and produces harmful gases after combustion, it poses a threat to human health and pollutes the environment. A discussion was conducted on further improving the flame retardant efficiency of WPC and meeting environmental conditions. The combustion characteristics of WPC were introduced and the research progress on the synergistic improvement of flame retardants and smoke suppression in WPC by compounding environmentally friendly flame retardants with other element flame retardants in carbon, metal, mineral, phosphorus, and boron systems were summarized. Compared with single flame retardants, environmentally friendly composite flame retardants have superiority in flame retardancy and environmental protection. Meanwhile, prospects and suggestions for the future development trend of environmentally friendly wood plastic composite flame retardants were provided.

**Keywords:** wood plastic composite; environmentally friendly flame retardant; carbon series; metal series; mineral series; phosphorus series; boron series

木塑复合材料(WPC),是一种由木材或木材加工剩余物作为增强体或填料,以热塑性聚合物如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)和回收再生料等作为基体,添加各种添加剂,经过熔融(挤出、混炼、注塑和热压等)加工成型而制得的一种绿色复合材料<sup>[1-4]</sup>。由于WPC具有优异的物理性能、良好的可塑性和多样化的选择性,而且WPC制成的家具具有出色的色彩、纹理和质感等表面效果,即使经过长时间的风吹日晒也几乎不会褪色<sup>[5-6]</sup>,因此广泛应用于生产生活、化工工业和环境保护等领域。WPC的应用可以节约木材资源,减少塑料处理不当造成的污染问

题<sup>[7-8]</sup>。然而,木材和塑料都属于易燃物质,所以WPC属于易燃材料,具有一定的安全隐患,这对其应用造成了一定的限制<sup>[9]</sup>。因此,研究WPC的阻燃性能变得越来越重要,常用阻燃剂包括磷氮阻燃剂、铝镁阻燃剂及硅系阻燃剂等,但单一阻燃剂往往达不到理想阻燃效果,采用复配阻燃剂可以综合多种阻燃剂的优点,弥补单一阻燃剂的不足,从而达到更好的阻燃效果,同时还可以降低阻燃剂的用量,减少对环境的影响。

近年来,学界的研究重点已经转向环保型阻燃剂之间的协同效应以及表面改性技术,旨在改善阻燃体系与WPC的

**通信作者:**刘明利,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为生物质复合材料及木材功能改良

**收稿日期:**2024-01-27

**引用格式:**赵梓函,李祥瑞,李春风,等.环保型复配阻燃剂在木塑复合材料中的应用进展[J].工程塑料应用,2024,52(3):186-191.

ZHAO Zihan, LI Xiangrui, LI Chunfeng, et al. Application progress of environmentally friendly composite flame retardants in wood plastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 186-191.

相容性。通过这些方法,可以同步提升材料的阻燃效率、力学性能和工艺性能,并且有效地降低对环境的污染。基于此,笔者对碳系、金属系、矿质系、磷系、硼系复配阻燃体系进行了综述<sup>[10]</sup>。

## 1 碳系复配阻燃体系

碳系复配阻燃体系是一种通过物理或化学方法将碳材料与阻燃剂进行复合,以提高材料的阻燃性能。这种体系利用碳材料的高导热性、高稳定性以及阻燃剂的阻燃作用,有效地提高了材料的耐火极限和阻燃等级。同时,复配阻燃体系还可以改善材料的力学性能和加工性能,拓宽了碳材料在各个领域的应用范围。碳基阻燃剂以其出色的防火潜能,在阻燃技术中发挥着重要作用。这种阻燃剂不仅可以改变材料燃烧降解的过程,还可以减少可燃气体的产生,从而降低对环境的污染<sup>[11-12]</sup>。碳元素可以形成多种形态的碳基材料,如炭黑、碳纳米管等。这些材料满足了阻燃性能要求,也达到了环保条件,因此在环保型WPC阻燃剂中具有广阔的应用前景。然而,碳系阻燃剂需要很高的添加量才有阻燃效果,且价格昂贵<sup>[13]</sup>。因此,通常与其他阻燃剂复配协同使用,以提高阻燃效率。

炭黑(CB)是一种无机非金属材料,具有较好的阻燃性能和热稳定性,可以提高材料的防火等级,减少火灾的风险。CB具有较低的毒性和较好的生物相容性,不会对环境造成严重的污染,因此被认为是一种环保型的阻燃剂。同时,CB还具有较好的耐候性、耐化学腐蚀性和导电性,可以延长材料的使用寿命,提高材料的性能<sup>[14]</sup>。尹朝露等<sup>[15]</sup>的研究聚焦于导电CB在PP/PE共混物中的选择性分布及其对阻燃抗静电复合材料性能的影响。他们通过控制导电CB在聚合物基体中的分布,以降低阻燃剂和导电填料之间的相互作用,从而达到提高复合材料综合性能的目的。实验结果表明,导电CB在聚合物基体中的选择性分布不仅减少了阻燃剂对导电网络构建的影响,显著改善了复合材料的抗静电性能,还为提高复合材料的阻燃性能提供了可能,降低了导电填料对阻燃剂分解过程的影响,从而提高了复合材料的热稳定性。Zhou等<sup>[16]</sup>的研究表明,在PE/木粉(WF)复合材料中添加CB,可以形成CB网络,隔离内部材料与外部热量和氧气的接触,降低燃烧动力。

碳纳米管(CNT)因其独特的物理和化学性质,如柔韧性、良好的黏附性、优异的导电性和耐腐蚀性,在WPC的阻燃处理中展现出一定的潜力。CNT由碳元素构成,燃烧时不会产生有毒物质,因此被视为一种环保的阻燃剂。此外,CNT还具有较好的热稳定性和抗氧化性能,可以提高材料的阻燃性能和热稳定性,减少火灾的风险<sup>[17-18]</sup>。基于此,CNT作为一种环保且性能优良的阻燃剂,具有较好的应用前景。然而,Dittrich等<sup>[19]</sup>采用熔融共混的方式制备了PP/多壁碳纳米管(MWCNTs),并对其热性能和燃烧性能进行了表征。结果表明,MWCNTs的加入对PP的极限氧指数(LOI)及UL 94等测试的影响不大,不能通过UL 94任何级别的测试。

这是因为CNT本身易于团聚,与聚合物基体的相容性不佳,这限制了其阻燃效果的发挥。为了克服这一问题,目前的研究主要集中在通过化学改性或与其他阻燃剂进行复配协同作用,以提高CNT在WPC中的阻燃性能。Fu等<sup>[20]</sup>的研究表明,通过添加CNT或羟基化的CNT,PP/WF复合材料的热释放速率峰值和总热释放量均明显降低。另外,Ameen等<sup>[21]</sup>发现,当使用MWCNTs、氢氧化镁与季戊四醇磷酸酯进行复配时,PE/洋麻纤维/尼龙复合材料的总热释放量降低,点燃时间延长,显示出MWCNTs和氢氧化镁之间良好的复配协同效果。这些研究成果为CNT在WPC阻燃处理中的应用提供了新的思路和方法。

石墨烯纳米片(GNS)在阻燃方面表现出色。GNS不易燃烧,且不释放有毒气体,在高温下,GNS可以形成稳定的炭保护层,隔绝氧气和可燃物,从而有效阻止火焰的蔓延。此外,GNS还具有较低的生产成本,这使得它在WPC的阻燃处理中具有广泛的应用前景。然而,虽然GNS具有阻燃性能,但在具体使用中,往往需要达到较高的添加量才能产生阻燃效果,这可能会影响最终产品的性能。因此,通常需要将其与其他阻燃剂配合使用。于云鹏等<sup>[22]</sup>以三聚氰胺甲醛树脂(MF)为成膜树脂,以磷酸-季戊四醇( $H_3PO_4$ -PER)为膨胀阻燃体系,以氧化石墨烯(GO)为阻燃协效助剂制备透明膨胀型阻燃涂层,从而提高WPC的阻燃抑烟性能。结果表明,涂层的透明度高,物理性能良好,阻燃抑烟性能优异。GO的加入,未改变涂层物理性能,但显著提高复合材料的热稳定性和阻燃抑烟性能。加入0.2%的GO,热重(TG)分析测试表明<sup>[23]</sup>,涂层的残炭率增加了11.0%;模拟大板燃烧法显示,涂层的耐燃时间较对照组提升了75.0%;锥形量热仪(CONE)燃烧测试表明,可以有效抑制涂层的热释放和烟释放,涂层的总热释放量和总烟释放量最大分别下降35.6%和43.5%。片状结构的GO在涂层受热膨胀后成为交联点,提高炭层整体的力学性能和稳定性,进而达到阻燃抑烟的作用。Idumah等<sup>[24]</sup>采用了GNS与氢氧化镁、氧化镁、聚磷酸铵(APP)等阻燃剂进行复配,以探讨其对PP/洋麻粉末复合材料阻燃性能的影响。结果显示,GNS在复合材料中起到了热传导桥连的作用,使得材料的内部结构更加致密,从而减少了可燃性气体的逸出。这种复配体系使得复合材料的总热释放量大幅度降低,垂直燃烧性能也达到了UL 94 V-0级别。

## 2 金属系复配阻燃剂

铝/镁系阻燃剂是常见的用于WPC阻燃处理的金属阻燃体系,主要由 $Al(OH)_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 组成。这类阻燃剂热稳定性好,在高温下不易分解,能够保持较好的阻燃性能,而且不含有对人体和环境有害的物质,使用安全,在使用过程中不会挥发,能够保持长久的阻燃效果,也不会产生腐蚀性气体,不会对设备和环境造成损害<sup>[25-26]</sup>。研究表明, $Al(OH)_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 能够有效延长点燃时间,降低热释放速率。然而,要达到垂直燃烧试验UL 94 V-0级别,需要添加大量的 $Al(OH)_3$ 和 $Mg(OH)_2$ (通常达到50%),这会导致材料的力学性能

严重恶化<sup>[27-28]</sup>。李斌等<sup>[29]</sup>采用 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 对WF/高密度聚乙烯(PE-HD)复合材料进行了阻燃性能和力学性能的测试,通过实验发现,随着 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的添加量的增加,复合材料的阻燃效果也显著提高,但力学性能有所下降。表1总结了不同添加

量的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 对复合材料阻燃性能和力学性能的影响。目前,采用纳米技术或与其他材料进行复配使用可以显著降低金属氢氧化物的用量,同时提高WPC的阻燃性能和力学性能。

表1 不同添加量的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 对复合材料阻燃性能和力学性能的影响

Tab. 1 Effect of different amounts of  $\text{Al}(\text{OH})_3$  added on flame retardancy and mechanical properties of composite materials

| Serial Number | WF/PE-HD mass ratio | $\text{Al}(\text{OH})_3$ content/% | LOI/% | Tensile strength/<br>MPa | Bending strength/<br>MPa | Impact strength/<br>( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |
|---------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1             | 50:50               | 0                                  | 18.9  | 28.0                     | 41.0                     | 20.0                                                  |
|               |                     | 30                                 | 23.7  | 28.0                     | 50.0                     | 13.0                                                  |
|               |                     | 40                                 | 27.1  | 29.0                     | 44.5                     | 10.0                                                  |
| 2             | 70:30               | 0                                  | 18.3  | 23.9                     | 28.5                     | 25.0                                                  |
|               |                     | 30                                 | 22.8  | 24.5                     | 33.2                     | 17.0                                                  |
|               |                     | 40                                 | 25.8  | 26.1                     | 41.0                     | 15.0                                                  |

层状双金属氢氧化物(LDH)是一种具有独特层状结构的阻燃剂,LDH在燃烧过程中会产生吸热效应从而分解成二氧化碳、水、金属氧化物等。一方面,二氧化碳和水可以稀释可燃气体和降低燃烧时的温度;另一方面,金属氧化物有利于炭层的形成,起到隔绝氧气和热量的作用,进一步降低基材的降解速率,从而阻止火焰的蔓延。同时,LDH片层中的铝、镁离子分解后产生碱性孔状物质,可以吸附有害气体,达到阻燃和抑毒的双重保护作用。曾义<sup>[30]</sup>将LDH与APP/可膨胀石墨/微胶囊包覆红磷进行复配,用于杨木纤维/聚丁二酸丁二酯复合材料的阻燃处理,结果表明,垂直燃烧等级达到了UL 94 V-0级别,展现出良好的阻燃效果。Kalali等<sup>[31]</sup>将APP与物理改性的层状双氢氧化物(Ph-LDH)相结合,开发了一种新型阻燃体系。Ph-LDH与APP产生协同阻燃作用,当在APP中掺杂少量的Ph-LDH时,复合材料的初始热分解温度提前,热解过程中生成较多的热稳定产物,从而改善了炭层形成,达到UL 94 V-0级别。

### 3 矿质系复配阻燃剂

我国矿石资源丰富,因此应当采取各种措施对矿石资源进行充分利用。天然矿物的使用可以在一定程度上提高WPC力学性能的同时提高其阻燃性能。通过使用天然矿物对WPC进行改性,可以获得性能优良的WPC。例如,Lin等<sup>[32]</sup>将碳纤维加入到椰壳/PP/WPC中,赋予了材料电屏蔽性能。然而,为了节约成本,一般选择用无机矿物来增强WPC。常见的矿物填料包括碳酸钙、蒙脱土、碳纳米管和二氧化硅等,Pan等<sup>[33]</sup>在他们的研究中开发了蒙脱土-钛酸纳米管基涂层,有效地防止了材料在燃烧过程中氧气的穿透和挥发性气体的释放。蒙脱土的隔热性能也提高了WPC的碳化能力。这些矿物不仅具有优良的环保性质,还可以有效地提高WPC的性能<sup>[34]</sup>。矿质生物基WPC具有无毒无味、抗菌防腐、浸水不胀、干燥不裂等优势,相较传统WPC,矿质生物基WPC经过破坏而断裂后不会出现锋利的缺口,对于室内装饰<sup>[35]</sup>和包装<sup>[36]</sup>十分有利。

碳酸钙作为一种天然的阻燃剂,可以在木材表面形成一层保护膜,从而提高木材的阻燃性能。它不含重金属、卤素

等对环境和人体有害的物质,并且在制造和使用过程中不会释放出挥发性有机物等污染物质。因此,碳酸钙作为一种环保型的阻燃剂,具有较好的应用前景。纳米碳酸钙(NCC)作为一种新型的功能性填料,被广泛应用于橡胶、塑料、涂料等领域。Stivabut等<sup>[37]</sup>制备了回收PP/橡胶木纤维复合材料,之后在其中加入少量的NCC,结果发现复合材料的性能得以提升。赵永生等<sup>[38]</sup>在PVC基WPC中加入NCC,但结果发现,直接加入NCC时,力学性能和阻燃性能提升并不明显,之后增加偶联剂对复合材料的改性,使得NCC能够更好地发挥作用,结果发现复合材料的力学性能和阻燃性能显著提升。另外,邓传福等<sup>[39]</sup>采用 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550)对NCC进行特殊表面改性,通过多种测试手段探究了改性后的NCC对PVC复合材料综合性能的影响。结果表明,通过在NCC湿法改性阶段引入过量的羟基,有助于提升硅烷偶联剂的接枝包覆效果,可以获得分散性和加工性较好的纳米填料,能够有效改善复合材料的热稳定性,提高其阻燃性能并实现复合材料的增强增韧效果。

二氧化硅来源广泛且制备方法成熟,该材料不含任何卤素元素,在高温下分解会产生无害的氧化硅,不会污染环境也不会对健康造成伤害。因此,二氧化硅阻燃剂被认为是一种环保型的阻燃剂,从而被广泛应用于WPC的阻燃改性中。徐伟华<sup>[40]</sup>利用纳米二氧化硅的高热稳定性和增强效应,通过熔融共混法在WF/聚乙烯复合材料中加入使用KH-550改性的纳米二氧化硅,当改性后的纳米二氧化硅质量分数仅为3%时阻燃效果最佳。改性后的WPC的峰值热释放速率、总热释放量、峰值质量损失速率和峰值比消光面积均降低,拉伸强度大幅度提升。张爱丽等<sup>[41]</sup>通过加入二氧化硅、APP和氯化铵,之后使用偶联剂对二氧化硅进行改性,结果发现复合材料的阻燃效果明显提升,并且拉伸强度、弯曲强度、冲击强度也得以改善。另外,Ma等<sup>[42]</sup>采用碱处理和溶胶-凝胶法相结合的方式对WF进行处理,制备了WF/二氧化硅杂化物,并将其用于制备WPC。与添加纳米二氧化硅的WPC相比,填充杂化物的复合材料具有更好的力学性能和热稳定性,也有利于改善复合材料的耐热氧化性。

#### 4 磷系复配阻燃剂

磷系阻燃剂是一种优良的阻燃剂,其阻燃反应通常分为3个阶段:①脱水反应,在加热条件下,磷系阻燃剂中的磷元素与水反应,生成磷酸或偏磷酸,这个过程可以吸收大量的热量,降低材料的温度;②形成玻璃状覆盖层,磷酸或偏磷酸与材料表面反应,形成一层不透气的玻璃状覆盖层,这层覆盖层可以有效地隔离氧气和可燃物,阻止火焰的蔓延;③分解和气化,在高温下,磷系阻燃剂中的其他成分会分解并气化,形成不燃性气体,如氨气和二氧化碳,这些气体可以稀释氧气和可燃物,进一步抑制火焰的燃烧<sup>[43]</sup>。磷系阻燃剂的阻燃效果通常比其他类型的阻燃剂更好,因为他们可以在多个方面抑制火焰的燃烧。此外,磷系阻燃剂通常具有较低的环境影响,因此被广泛认为是一种环保的阻燃剂<sup>[44-45]</sup>。然而,磷系阻燃剂的价格通常较高,因此,在使用磷系阻燃剂时需要综合考虑其成本和效果。高效阻燃型APP是一种低成本、无毒、环保的无机磷阻燃化合物。在燃烧时,APP会释放气态氨,降低氧气等气体的浓度。在缩合阶段,APP分解产生聚磷酸,促进聚合物的脱水和炭化反应。最终,形成的炭层可以将氧气隔离,达到阻燃的效果。但单一的APP作为阻燃剂不如改性后的APP或与其他阻燃剂协调复配的阻燃效果好。周叶星等<sup>[46]</sup>研究了APP的用量对PP/竹粉复合材料的阻燃效果,通过与二乙基次磷酸铝(ADP)进行复配,研究结果发现,APP与ADP复配对复合材料有协同阻燃的效果,当ADP与APP复配质量比为1:6时复合材料的LOI达到24%,烟释放量、热释放速率、热释放总量均显著降低,此时阻燃效果最好。张帅等<sup>[47]</sup>通过改性将APP聚电解质化,之后将聚电解质化的APP加入到WPC中得到阻燃WPC,通过实验发现,与未改性的APP相比,聚电解质化的APP在保留了原有的阻燃效果的同时还提升了WPC的力学性能。Ding等<sup>[48]</sup>将乙二胺(EDA)、对苯二甲醛(TPA)与APP进行反应,通过在APP表面形成可逆的交联网状结构,成功合成了一种改性APP(pAPP)。随后,他们将这种pAPP应用在PE基WPC中。研究结果显示,添加了pAPP的复合材料的LOI明显提高,垂直燃烧等级达到UL 94 V-0级别,显示了APP功能化改性的显著效果。李臻等<sup>[49]</sup>把APP加入到废弃秸秆/聚己内酯复合材料中,对其阻燃性能进行了探究。采用单因素实验法,研究结果表面,当APP质量分数为12%时,复合材料的LOI达

到了27.7%,并发现阻燃处理后复合材料能够生成具有保护作用的炭层,验证了APP的阻燃机理。

#### 5 硼系复配阻燃剂

硼系阻燃剂是一种无机阻燃剂,它主要成分是含硼化合物。硼系阻燃剂在高温下能使材料发生凝胶化反应,形成一层膜状物质,能有效隔绝燃烧源与空气接触,起到阻燃作用。硼系阻燃剂具有防火、防烟、无毒、低挥发等特点,广泛用于家庭电器、装饰材料、建筑材料、高分子材料等领域<sup>[50-51]</sup>。硼酸锌(ZB)具有优良的阻燃和抑烟性能,无毒、无污染,易于推广,因此,常用于提高电线电缆、防锈涂料、塑料和橡胶的阻燃性能。ZB作为一种常见的硼系阻燃剂,它通常与其他阻燃剂复配使用,可以获得优异的阻燃和抑烟效果。其阻燃作用主要表现在能够降低着火物温度,形成玻璃态的无机膨胀涂层从而隔绝空气,阻碍挥发性可燃物的逸出,同时,在高温下脱水,具有吸热、发泡和稀释燃料的功能。Lei等<sup>[52]</sup>采用复合APP与ZB质量比为4:1的组合复配成阻燃剂,APP/ZB协同阻燃剂质量分数分别为0%,5%,10%,15%和20%。所得木塑发泡复合材料(FWPC)分别命名为FWPC-0,FWPC-5,FWPC-10,FWPC-15,FWPC-20。随着APP/ZB协同阻燃剂用量的增加,制备的FWPC体系的LOI也逐渐增大。在复合体系中加入质量分数20%的APP/ZB协同阻燃剂,FWPC-20的LOI值达到27.3%,与FWPC-0相比,LOI值增加了5.30%。结果表明,FWPC的阻燃性能显著提高,达到了阻燃材料的水平。这一过程的主要原因是FWPC燃烧时,系统中APP热分解产生的聚磷酸和聚偏磷酸可以促进物质脱水成炭。生成的炭层可以减少氧和材料之间的接触。材料内部传热受限,燃烧性能减弱,同时释放出H<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>等惰性气体,稀释周围可燃气体。因此随着复合体系中APP/ZB含量的增加,材料的阻燃性得到了提高。Chan-hom等<sup>[53]</sup>通过实验发现在PE和PE-HD中加入WF后制备成的WF/PE复合材料和WF/PE-HD复合材料的阻燃性明显降低,之后通过加入ZB使其保留了原本的阻燃性。董珂等<sup>[54]</sup>通过将ZB分别与纳米二氧化硅、聚硅氧烷进行复配研究其对WPC的阻燃效果,实验结果发现当纳米二氧化硅与ZB复配质量比为2:3时阻燃效果最佳,ZB脱去结晶水吸收热量以及发挥了凝聚相阻燃作用,与此同时,ZB的抑烟效果最佳。有关该实验不同复配质量比对复合材料的影响分析见表2。李奇等<sup>[55]</sup>通过APP和ZB作

表2 纳米SiO<sub>2</sub>与ZB不同复配质量比对复合材料的阻燃效果

Tab. 2 Flame retardant effects of composite materials with different mass ratios of nano SiO<sub>2</sub> and ZB

| Serial Number | Flame retardant system                                                | LOI/% | UL 94 | Tensile strength/<br>MPa | Bending<br>strength/MPa | Impact strength/<br>(kJ·m <sup>-2</sup> ) |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| 1             | WF 40/PP 32/Antioxidant1/Coupling agent7/nanoSiO <sub>2</sub> 4/ZB16  | 30.5  | V-1   | 18.5                     | 38.1                    | 3.48                                      |
| 2             | WF 40/PP 32/Antioxidant1/Coupling agent7/nanoSiO <sub>2</sub> 8/ZB12  | 32.1  | V-0   | 18.0                     | 37.2                    | 3.84                                      |
| 3             | WF 40/PP 32/Antioxidant1/Coupling agent7/nanoSiO <sub>2</sub> 10/ZB10 | 31.9  | V-0   | 17.4                     | 36.9                    | 4.33                                      |
| 4             | WF 40/PP 32/Antioxidant1/Coupling agent7/nanoSiO <sub>2</sub> 12/ZB8  | 31.8  | V-0   | 17.2                     | 35.4                    | 4.64                                      |
| 5             | WF 40/PP 32/Antioxidant1/Coupling agent7/nanoSiO <sub>2</sub> 16/ZB4  | 30.3  | V-1   | 17.0                     | 34.8                    | 4.82                                      |

为阻燃剂和抑烟成分进行复配,以纳米CB为导电材料,研究了APP/ZB协效阻燃剂质量比对FWPC力学性能、阻燃抑烟性能及热稳定性能的影响。结果表明,单独加入APP阻燃效果不佳且力学性能降低,当APP和ZB质量比为4:1时,该复

配体系对FWPC的阻燃抑烟效果最好,热稳定性性能提高且力学性能也得到明显改善。有关该实验不同复配质量比的阻燃剂应用于FWPC的燃烧性能总结见表3。

表3 APP和ZB不同复配质量比FWPC的阻燃效果

Tab. 3 Flame retardant effects of FWPC with different blending ratios of APP and ZB

| Serial Number | APP/ZB mass ratio | LOI/% | Average yield of carbon monoxide/kg <sup>-1</sup> | Tensile strength/MPa | Bending strength/MPa | Impact Strength/(kJ·m <sup>-2</sup> ) |
|---------------|-------------------|-------|---------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1             | Pure APP          | 27.6  | 0.200 0                                           | 14.9                 | 31.0                 | 3.85                                  |
| 2             | APP:ZB=4:1        | 27.3  | 0.101 4                                           | 14.8                 | 30.2                 | 3.70                                  |
| 3             | APP:ZB=3:2        | 26    | 0.029 5                                           | 14.5                 | 30.0                 | 3.40                                  |
| 4             | APP:ZB=2:3        | 24.5  | 0.019 7                                           | 14.4                 | 28.8                 | 3.50                                  |
| 5             | APP:ZB=1:4        | 23.5  | —                                                 | 14.6                 | 28.3                 | 3.30                                  |
| 6             | Pure ZB           | 23    | —                                                 | 13.8                 | 28.0                 | 3.45                                  |

## 6 展望

(1)环保型WPC阻燃剂是未来发展的重要趋势之一,随着人们对环保和安全的重视程度不断提高,对环保型WPC阻燃剂的需求也将不断增加。该类阻燃剂具有无毒、不易挥发等优点,能够显著提高木材和塑料的阻燃性能,同时还能保持良好的物理、力学性能和加工性能,因此备受市场青睐。

(2)环保型WPC阻燃剂的研发和应用需要不断的技术创新。目前,该类阻燃剂的制备方法主要有化学改性法、物理混合法、共混法等,但这些方法都存在一定的不足之处,如制备过程复杂、成本高、阻燃效果不稳定等。因此,未来需要进一步探索新的制备方法和技术,提高阻燃剂的阻燃性能、环保性能和生产效率,以满足市场的需求。

(3)环保型WPC阻燃剂的生产过程也必须符合环保要求,实现绿色生产。未来,该类阻燃剂的生产企业将需要采用更加环保的生产工艺和设备,减少生产过程中的废弃物排放和能源消耗,同时加强废水、废气、废渣等污染物的治理和循环利用,实现生产过程的绿色化和可持续发展。

## 参考文献

- [1] 李满枝,等.天津化工,2020,34(4):16-18,37.  
LI Manzhi, et al. Tianjin Chemical Industry, 2020, 34(4):16-18, 37.
- [2] YIN H, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2019, 30: 187-202.
- [3] GRILLO C C, et al. Journal of Natural Fibers, 2020. DOI:10.1080/15440478.2020.1764436.
- [4] 喻鹏祥,等.材料工程,2024,52(2):235-244.  
YU Pengxiang, et al. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(2): 235-244.
- [5] YU Qinghan, et al. Applied Sciences, 2021, 11(15). DOI:10.3390/app11156838.
- [6] SHI Q. International Journal of Frontiers in Sociology, 2021, 3(11): 3-11.
- [7] BRAGHIROLI F L, et al. Curr Forestry Reports, 2020. DOI: 10.1007/s40725-020-00112-9.
- [8] ZHANG Y, et al. Industrial Crops and Products, 2023. DOI:

10.1016/j.indcrop.2023.116705.

- [9] 张敬礼,等.塑料工业,2014,42(1):112-117.  
ZHANG Jingli, et al. China Plastics Industry, 2014, 42(1):112-117.
- [10] 孟令宇,等.塑料科技,2022,50(7):105-109.  
MENG Lingyu, et al. Plastics Science and Technology, 2022, 50 (7):105-109.
- [11] 魏丽菲,等.高分子材料科学与工程,2019,35(9):169-176.  
WEI Lifei, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(9):169-176.
- [12] 吴剑峰,等.北京工业大学学报,2023,49(11):1 232-1 250.  
WU Zhaofeng, et al. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(11):1 232-1 250.
- [13] 毕波,等.材料工程,2017,45(5):135-144.  
BI Bo, et al. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(5): 135-144.
- [14] 赵彦娜,等.塑料科技,2022,50(5):34-38.  
ZHAO Yanna, et al. Plastics Science and Technology, 2022, 50(5): 34-38.
- [15] 尹朝露,等.材料导报,2018,32(S2):290-292.  
YIN Zhaolu, et al. Materials Reports, 2018, 32(S2):290-292.
- [16] ZHOU H Y, et al. Construction and Building Materials, 2020, 233. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117369.
- [17] 韩越,等.塑料科技,2022,50(5):88-92.  
HAN Yue, et al. Plastics Science and Technology, 2022, 50(5): 88-92.
- [18] 张晓光,等.材料导报,2022,36(5):237-242.  
ZHANG Xiaoguang, et al. Materials Review, 2022, 36(5): 237-242.
- [19] DITTRICH B, et al. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98: 1 498-1 505.
- [20] FU S Y, et al. Journal of Materials Science, 2010, 45(13):3 520-3 528.
- [21] AMEEN K M, et al. Polymer Composites, 2017, 39(S3):E1474-E1486.
- [22] 于云鹏,等.森林工程,2023,39(5):197-208.

- YU Yunpeng, et al. *Forest Engineering*, 2023, 39(5):197–208.
- [23] 李卓,等.林产化学与工业,2021,41(3):63–70.  
LI Zhuo, et al. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2021, 41(3):63–70.
- [24] IDUMAH C I, et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 134(3):1 681–1 703.
- [25] 张广良,等.盐业与化工,2016,45(11):25–28.  
ZHANG Guangliang, et al. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2016, 45(11):25–28.
- [26] 李博,等.功能材料,2018,49(6):6 213–6 220.  
LI Bo, et al. *Function Materials*, 2018, 49(6):6 213–6 220.
- [27] 王林锋,等.中国塑料,2023,37(10):125–130.  
WANG Linfeng, et al. *China Plastics*, 2023, 37(10):125–130.
- [28] 王涛,等.塑料工业,2023,51(5):109–114, 141.  
WANG Tao, et al. *China Plastics Industry*, 2023, 51(5): 109 – 114, 141.
- [29] 李斌,等.中国塑料,2004,18(6):33–35.  
LI Bin, et al. *China Plastics*, 2004, 18(6):33–35.
- [30] 曾义. PBS/杨木纤维复合材料的制备及其阻燃和发泡研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2013.  
ZENG Yi. Preparation of PBS-based biodegradable wood-polymer composites and its flame retardancy and foaming behavior[D]. Zhuzhou:Hunan University of Technology, 2013.
- [31] KALALI E N, et al. *Fire Safety Journal*, 2019, 107:210–216.
- [32] LIN C W, et al. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2015, 28(7):1 047–1 057.
- [33] PAN Ying, et al. *RSC Advances*, 2016, 6(59). DOI: 10.1039/c6ra05213d.
- [34] HUANG R, et al. *BioResources*, 2013. DOI: 10.15376/biores. 8.2.2283-2299.
- [35] 郭小曼. 长春大学学报, 2021, 31(10):30–35.  
GUO Xiaoman. *Journal of Changchun University*, 2021, 31(10): 30–35.
- [36] 肖峰,等.化工新型材料,2021,49(7):10–14.  
XIAO Feng, et al. *New Chemical Materials*, 2021, 49(7):10–14.
- [37] STIVABUT C, et al. *Construction and Building Materials*, 2018, 162:450–458.
- [38] 赵永生,等.高分子材料科学与工程,2013,29(2):66–69.  
ZHAO Yongsheng, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2013, 29(2):66–69.
- [39] 邓传福,等.橡塑技术与装备,2023,49(11):13–17.  
DENG Chuanfu, et al. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2023, 49(11):13–17.
- [40] 徐伟华.林产工业,2022,59(2):13–16, 27.  
XU Weihua, et al. *China Forest Products Industry*, 2022, 59(2):13–16, 27.
- [41] 张爱丽,等.工程塑料应用,2021,49(10):148–152.  
ZHANG Aili, et al. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49 (10):148–152.
- [42] MA Y, et al. *Polymer Composites*, 2020, 41(2):573–584.
- [43] 吴义迎,等.山东化工,2022,51(18):87–89.  
WU Yiyang, et al. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(18): 87–89.
- [44] 刘晓双.山东化工,2022,51(13):83–84, 88.  
LIU Xiaoshuang. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(13):83–84, 88.
- [45] 丁春瑞,等.河南化工,2023,40(6):1–4.  
DING Chunrui, et al. *Henan Chemical Industry*, 2023, 40(6):1–4.
- [46] 周吓星,等.林业工程学报,2020,5(6):36–42.  
ZHOU Xiaxing, et al. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(6): 36–42.
- [47] 张帅,等.林业工程学报,2020,5(4):52–59.  
ZHANG Shuai, et al. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(4): 52–59.
- [48] Ding Chunxiang, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2021. DOI: 10.1016/j.cej.2021.130295.
- [49] 李臻,等.上海纺织科技,2022,50(10):22–24, 30.  
LI Zhen, et al. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2022, 50 (10):22–24, 30.
- [50] 赵博,等.塑料助剂,2010(3):6–8.  
ZHAO Bo, et al. *Plastics Additives*, 2010(3):6–8.
- [51] 张月琴,等.塑料科技,2007,35(9):110–113.  
ZHANG Yueqin, et al. *Plastics Science and Technology*, 2007, 35 (9):110–113.
- [52] LEI Zhitao, et al. *Coatings*, 2023, 13(4). DOI: 10.3390/coat-ings13040789.
- [53] CHAN-HOM T, et al. *Fire and Materials*, 41(6):675–687.
- [54] 董珂,等.化工新型材料,2016,44(6):66–68.  
DONG Ke, et al. *New Chemical Materials*, 2016, 44(6):66–68.
- [55] 李奇,等.化工新型材料,2024,52(1):264–269.  
LI Qi, et al. *New Chemical Materials*, 2024, 52(1):264–269.