

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.030

PVC 阻燃材料在建筑中的应用

韩恒梅¹, 张红²

(1. 平顶山工业职业技术学院, 河南平顶山 467001; 2. 河南质量工程职业学院, 河南平顶山 467000)

摘要: 主要介绍了无机阻燃剂、有机阻燃剂和复合型阻燃剂改性的聚氯乙烯 (PVC), 以及这些阻燃剂对 PVC 阻燃性能的影响。其中无机阻燃剂的阻燃效果最为明显, 不过消烟效果较差; 有机阻燃剂消烟效果较为明显, 但阻燃能力不如无机阻燃剂; 复合型阻燃剂兼具有机 / 无机阻燃剂的优点, 或具有多种无机阻燃剂的优点, 一般既具有较强的阻燃能力, 又具有较为显著的消烟效果, 是未来 PVC 用阻燃剂的发展方向。

关键词: 阻燃型聚氯乙烯; 无机阻燃剂; 有机阻燃剂; 复合型阻燃剂; 进展

中图分类号: TQ325.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)07-0149-04

Flame Retardant PVC and Its Application in Construction Engineering

Han Hengmei¹, Zhang Hong²

(1. PingDingShan Industrial College of Technology, Pingdingshan 467001, China;

2. Henan Engineering Vocational College Construction Engineering Quality, Pingdingshan 467000, China)

Abstract : Polyvinyl chloride (PVC) modified by inorganic flame retardants, organic flame retardants and composite flame retardants was introduced. The flame-retardant effect of inorganic flame retardants is most obvious, but its smoke suppressing effect is poor. Organic flame retardants show better smoke suppressing effect, but the flame retardant ability is poorer than inorganic flame retardant. Composite flame retardant, which possess both advantages of organic and inorganic flame retardant or the advantages of several inorganic flame retardant, not only exhibit excellent flame retardant ability, but also promise smoke suppressing effect. It is the future development direction of the flame retardant of PVC.

Keywords : flame retardant polyvinyl chloride ; inorganic flame retardant ; organic flame retardant ; composite flame retardant ; progress

聚氯乙烯 (PVC) 具有优异的耐候性、耐化学腐蚀以及高力学强度, 常用于工业制品、包装、建筑材料中, 其中在建筑工程中主要用于地板、管材以及建筑用复合材料中^[1-4]。PVC 本身具有较好的阻燃性能, 但是由于在加工过程中添加大量的增塑剂, 从而导致了其阻燃性能出现了较大幅度降低, 而且 PVC 的软化点仅为 80℃ 左右, 这使得其在建筑工程中应用安全系数大大降低^[5-9]。而且 PVC 由于其聚合物主链中含有卤素, 在燃烧时会产生大量的有毒烟雾和气体, 严重危害到人类身体健康, 这些弊端大大限制了其在建筑工程中的应用^[10]。

为了克服 PVC 阻燃性能方面的不足, 学术研究和工业生产中均将提高 PVC 阻燃性能和降低 PVC 燃烧生烟量作为研究重点^[11-14]。目前为止, 应用最为广泛的改性手段是将具有阻燃性能和消烟作用的填料添加到 PVC 基体中。目前已有报道的阻燃剂主要分为有机阻燃剂、无机阻燃剂和复合型阻燃剂。无机阻燃剂主要有金属氧化物 (例如 Sb_2O_3)、金属氢氧化物, 例如 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、金属盐 (硼酸锌) 以及多组分无机阻燃剂等, 这类阻燃剂的阻燃效果较好, 但是

消烟效果不尽理想。用于 PVC 改性的有机阻燃剂较少, 其中以磷系阻燃剂应用最为广泛; 复合型阻燃剂是指有机无机复合型阻燃剂或多种无机阻燃剂复配的阻燃剂, 这类阻燃剂综合多种阻燃剂的优点, 既具有较为理想的阻燃效果, 又具有较为明显的消烟作用。笔者将从有机阻燃剂、无机阻燃剂和复合型阻燃剂改性 PVC 等方面分别进行阐述。

1 无机阻燃剂改性 PVC

无机阻燃剂在 PVC 的改性中应用较为广泛, 其中以金属氧化物、金属氢氧化物、金属盐最为典型, 按照金属元素主要分为锑系、铝系、硅系、镁系、铅系、锌系等。 Sb_2O_3 是应用最为广泛的锑系阻燃剂, 对塑料、橡胶、涂料、纺织品的阻燃改性效果都较为理想。 Sb_2O_3 本身并没有阻燃效果, 但是当聚合物发生燃烧时, 其与聚合物基体中的卤素发生反应生成卤化锑后, 可阻止燃烧进一步进行。

周生刚^[15]以 Sb_2O_3 阻燃剂, 通过熔融共混法制备阻燃性 PVC 材料, 并且通过选用不同粒径的 Sb_2O_3 , 研究了其对

联系人: 韩恒梅, 副教授, 主要从事建筑设计及新型建筑材料研究

收稿日期: 2017-05-03

PVC材料阻燃性能的影响。研究发现,随着 Sb_2O_3 的粒径减小,与微米级 Sb_2O_3 粒子相比,纳米级 Sb_2O_3 粒子在PVC基体中的分布更为均匀,因此也直接导致了纳米 Sb_2O_3 /PVC材料的阻燃效果更好。其中当微米级 Sb_2O_3 的掺杂量为3%(质量分数)时,所制备出的阻燃性PVC的氧指数为27%,而纳米级 Sb_2O_3 的掺杂量仅为1.85%时,氧指数便可达到同等水平。另外,利用表面活性剂对 Sb_2O_3 进行改性,可以有效提高 Sb_2O_3 在PVC基体中的分散性,从而提高阻燃性能。利用PEG-6000作为表面活性剂对 Sb_2O_3 进行改性,当微米级 Sb_2O_3 添加量为1.85%时,改性后的 Sb_2O_3 可以将PVC的氧指数由25.2%提升至27.1%。不同的表面活性剂的改善效果也不尽相同,当以OP-10作为表面活性剂时,改性前后PVC的阻燃性能没有明显变化;而当以笼型聚倍半硅氧烷(POSS)作为表面改性剂时,纳米 Sb_2O_3 粒子反而更易发生团聚,从而导致阻燃性能有所降低。

沈治华等^[16]也选用 Sb_2O_3 作为阻燃剂,并通过熔融混炼法制备出了阻燃性PVC电缆料。经实验发现,当 Sb_2O_3 的质量分数达到3%~4%时,所制备的PVC电缆料的氧指数便可提高至27%以上(难燃性),并且随着 Sb_2O_3 的添加量增多,PVC电缆料的氧指数稳步上升,当其质量分数为10%时,PVC的氧指数可高达32%。但随着 Sb_2O_3 含量的增加,PVC电缆料在200℃下的稳定时间逐渐降低。当 Sb_2O_3 的质量分数为3%~4%时,PVC电缆料的热稳定时间可高达126 h,当 Sb_2O_3 含量增大到40%后,热稳定时间下降至82 h左右。当 Sb_2O_3 的质量分数为3%~4%时,PVC电缆料综合性能最为优异,可以应用于建筑工程的电缆中,具有较高的安全系数。

除了锑系阻燃剂外,铝系阻燃剂的应用也较为广泛,其中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是较为常见的铝系阻燃剂。徐晓萍^[17]在软质PVC中添加 $\text{Al}(\text{OH})_3$,并对其燃烧性能进行了研究,实验结果表明,未添加 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的软质PVC在200℃便发生较为明显的分解,并且随后500℃和700℃再次发生二次分解和三次分解,而添加了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的软质PVC在700℃时才发生分解第一次分解。

刘立华等^[18]也研究了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 对软质PVC阻燃性能的影响,他们发现当 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 添加量逐渐增大时,所制备的PVC材料的阻燃性能逐渐得到改善,当在100 gPVC中添加60 g $\text{Al}(\text{OH})_3$ 后,其氧指数便可由25.5%提升至28.5%,并且利用硬脂酸和硬脂酸钠对 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 进行表面改性后,由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 与PVC基体相容性得到改善,可以进一步提升PVC的阻燃性能。但随着阻燃剂含量的提高,PVC的力学性能有所下降,实验结果表明,硬脂酸钠改性的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的添加量为60 g/100 gPVC时,最终所制备的材料综合性

能最好。另外,由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的分解温度仅为200℃,所以与具有较高分解温度的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (340~490℃)进行复配,可以进一步提高PVC阻燃性能。

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ 也可单独用作PVC的阻燃剂,林雅莲^[19]在硬质PVC中添加了不同质量份的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,当100 g PVC中添加20 g $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (20份)时,制备的硬质PVC的氧指数便可提高至27%以上,为难燃型PVC。随着 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 添加量的增加,PVC材料的氧指数逐渐升高。但PVC的力学性能随 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 含量的升高而逐渐降低,当其添加量为20~30份时,综合性能最好,可用于建筑工程中的电气管道。

蛭石是一种硅酸盐类矿物质,也是一种较为理想的无机阻燃剂,属于硅系阻燃剂。与 Sb_2O_3 不同,蛭石本身便具有阻燃性能。虞华东等^[20]制备PVC/蛭石复合材料,当二者质量比为100/125(PVC/蛭石)时,所制备的PVC复合材料的氧指数可达到26.8%,但是进一步提高蛭石的含量,氧指数增加不再明显。因而在PVC/蛭石复合材料中添加了300份的钢渣粉(即PVC/蛭石/钢渣粉质量比为100/125/300),所得的PVC复合材料的氧指数大幅提升,高达29.6%,而将钢渣粉替换为同等质量的硫酸钡后,所得PVC复合材料的氧指数可提升至31.0%。又进一步向其中添加了8份的羟基锡酸锌,所制备PVC复合材料的氧指数再次大幅提升,高达35.8%。该阻燃型PVC材料已经完全满足难燃型PVC的性能要求,应用在建筑物的地板、管材中。

蒙脱土也是一种常见的硅系阻燃剂,林雅莲^[19]在硬质PVC中添加了不同质量份的蒙脱土,蒙脱土添加量为30份时,所制备的硬质PVC的氧指数便可提高至27.5%以上,并且随着蒙脱土添加量的增加,所制备的PVC的氧指数逐渐升高。不过PVC的力学性能随蒙脱土含量的升高而逐渐降低,当蒙脱土添加量为30份时,综合性能最好,可用于建筑工程中的电气管道。

除上述较为常见的无机阻燃剂外,铁酸锌、铁酸铍、铁酸铜等铁酸盐也是有效的PVC阻燃剂,铁酸盐可以促进PVC在燃烧时释放氯化氢,进而产生氯原子自由基,抑制氢氧根自由基的链式反应,从而起到阻燃作用。

韩丽静^[21]分别利用空气氧化湿法、水热法和共沉淀法制备了铁酸锌、铁酸铍和铁酸铜,并将其作为阻燃剂分别添加到PVC中。实验发现,铁酸铍的阻燃效果最好,当其添加质量分数为5%~20%时,PVC的氧指数由原来的24.8%提高至27.7%~31.1%,为难燃材料,并且烟密度也由原来的91.0%降低至73.0%~71.6%;铁酸锌的阻燃效果次之,当其添加量为20%时,材料的氧指数提高至28.9%,也为难燃材料,烟密度降低至85.0%;三者之中,铁酸铜的阻燃效果相对较差,当其添加量为20%时,所制备的PVC的氧指数为

26.5%,烟密度为 85.6%。与常见的无机阻燃剂相比,所制备的铁酸盐类阻燃剂的排烟效果得到了改善。

无机阻燃剂的阻燃机理各不相同,例如 Sb_2O_3 是利用燃烧时与 PVC 分解产生的氯乙烯单体发生反应而阻止进一步燃烧,但硅系阻燃剂则是利用自身的阻燃性能来提高 PVC 的阻燃性能。无机阻燃剂的阻燃效果随其添加量增多而提高,但 PVC 材料的热稳定性和力学性能随阻燃剂含量增多而降低,要综合考虑材料的阻燃性能和应用性能,选择合适的阻燃剂添加量,以制备满足建筑工程的阻燃性 PVC 材料。

2 有机阻燃剂改性 PVC

有机阻燃剂种类繁多多样,在阻燃性 PVC 制备中,最常见的有机阻燃剂为磷系阻燃剂。冯国东等^[22]利用 9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO)与粗甘油和油酸反应,制备了含磷的阻燃性聚甘油脂肪酸酯。以阻燃性聚甘油脂肪酸酯作为 PVC 的增塑剂,制备出了阻燃性 PVC 材料。实验结果表明,当增塑剂质量分数增高至 60% 时,所制备的 PVC 材料的氧指数由原有的 21.3% 提高至 28.7%,阻燃剂别达到了 V-0 级别,并且依然具有较高的力学性能。

林辉等^[23]也通过在 PVC 中添加磷系增塑剂,从而达到了改善 PVC 阻燃性能的目的。在所制备的无机阻燃剂改性 PVC 无纺布中添加了磷酸三甲苯酯,使所制备的 PVC 的氧指数由 26.7% 提高到了 32.5%,并且燃烧烟密度由原有的 15.2% 降低至 11.8%,氧指数和烟密度分别提高和降低了 51.2% 和 21.9%。所制备的阻燃型 PVC 无纺布满足国家标准 GB 8624-2012 中 B1 级阻燃材料的要求,可用作建筑工程中的室内阻燃性壁纸。

林雅莲^[19]在硬质 PVC 中添加了不同质量份的聚磷酸铵,当聚磷酸铵添加量为 50 份时,所制备的硬质 PVC 的氧指数便可提高至 27.5% 以上,并且随着聚磷酸铵添加量的增加,所制备的 PVC 的氧指数逐渐升高。与无机阻燃剂改性硬质 PVC 相比,聚磷酸铵改性的阻燃型 PVC 的阻燃效果相对较差,不过其力学性能却明显优于无机阻燃剂改性的硬质 PVC。根据国家标准 JG 3050-1998,当聚磷酸铵添加量为 50 份时,所制备的阻燃型 PVC 满足建筑工程中电气管路材料的应用性能要求。

与无机阻燃剂相比,有机阻燃剂的阻燃效果较差。不过由于有机阻燃剂对 PVC 力学性能的影响较小,可以通过提高阻燃剂添加量来改善其阻燃效果。另外,与无机阻燃剂相比,有机阻燃剂的排烟效果要明显改善。

3 复合型阻燃剂改性 PVC

无机阻燃虽具有较高的阻燃效果,但其排烟效果一般,使得 PVC 在燃烧时仍会产生大量有毒的烟雾;而有机阻燃对 PVC 燃烧时的排烟效果较为明显,但其阻燃效果远远不

如无机阻燃剂。因此,在 PVC 阻燃性的改性中,往往会添加同时兼具无机阻燃剂的阻燃作用和有机阻燃剂的排烟作用的复合型阻燃剂,进而制备出应用性能优异的 PVC 材料。

林辉等^[23]制备了氧化锌/ B_2O_3 /水(质量比为 2/3/3.5,简称 ZB-2335)改性的无纺纸基 PVC, ZB-2335 在受热后分解生成氯化锌和 B_2O_3 ,紧密覆盖在 PVC 壁纸表面,从而抑制可燃气体产生,阻止 PVC 壁纸发生进一步燃烧和分解;另外 B_2O_3 在受热时与氯乙烯单体反应生成 BCl_3 ,结晶水受热挥发,二者反应产生 HCl 气体,进一步生成氯原子自由基,有效阻止羟基自由基的链式反应,进而起到阻燃作用。但当 ZB-2335 在 PVC 中的质量分数为 10% 时,所制备出的 PVC 壁纸的氧指数仅为 26.7%,远低于国家标准 GB 8624-2012 规定的氧指数标准(32.0%),烟密度为 15.2%。并且进一步提高阻燃剂用量,氧指数不会进一步明显提高。因而向 PVC 阻燃材料中添加了质量分数为 5% 的磷酸三苯甲酯,磷酸三苯甲酯在燃烧时会产生聚偏磷酸类产物,覆盖于 PVC 壁纸表面,可以阻止 PVC 与氧气接触,从而进一步提高阻燃效果。添加了有机/无机复合型阻燃剂的 PVC 壁纸,不仅氧指数提高至 32.5%,而且烟密度也成功降低至 11.8%。这说明,采用有机/无机复合型阻燃剂可以同时提高材料的阻燃性能和排烟性能。

除了有机/无机复合型阻燃剂,多种无机阻燃剂复配的阻燃剂也是常见的复合型阻燃剂,并且这种复合型阻燃剂兼具多种无机阻燃剂的优点,阻燃效果和排烟效果均要高于任何一种阻燃剂单独使用时的效果。

PVC/木粉复合材料是一种在建筑工程中常见的天花板用木塑复合材料,刘建中等^[24]分别以八钼酸铵、八钼酸铵/水滑石、八钼酸铵/ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 作为阻燃剂添加到了 PVC/木粉复合材料中,并且这三种阻燃剂均能有效改善 PVC 的阻燃性能。与八钼酸铵单独做阻燃剂相比,添加了复合型阻燃剂八钼酸铵/水滑石和八钼酸铵/ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的 PVC/木粉复合材料在燃烧时,热释放速率降低了 27%,烟释放率降低了 60%。这说明,无机复配的复合型阻燃剂也能够有效提高 PVC 材料的阻燃性能,并同时改善其排烟性能。

赵程波等^[25]将硼酸锌和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 复配,制备了复合型阻燃剂,并用到了 PVC 纺织结构材料中。实验结果表明,随着复合阻燃剂在 PVC 基体中添加量的增大,所制备的 PVC 材料的氧指数逐渐上升,并且通过光老化实验可以进一步提高材料的氧指数。另外,随着复合型阻燃剂中硼酸锌比重的增加,材料在燃烧时烟密度显著下降。当复合型阻燃剂中硼酸锌的质量分数为 40%~60%,100 g PVC 纺织结构材料中添加 30 g 复合型阻燃剂时,PVC 烟密度由原来的 98% 成功降低至 50%。

孙英娟等^[26]以微胶囊红磷、硼酸锌、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为原料,制备了复合型阻燃剂,并应用于PVC改性。研究表明,当PVC、微胶囊红磷、硼酸锌、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的质量比为100/3/1/20/20时,所得材料的氧指数高达35.9%。并且与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 改性的PVC相比,由于多种无机阻燃剂的协同作用,复合型阻燃剂改性PVC的氧指数更高,且在燃烧时烟气、一氧化碳和二氧化碳的释放量更低,材料的热稳定性和燃烧成碳率也明显更低。

4 结语

用于阻燃型PVC的阻燃剂主要分为无机阻燃剂、有机阻燃剂和复合型阻燃剂。其中无机阻燃剂主要有铈系阻燃剂、铝系阻燃剂、硅系阻燃剂和铁酸盐类阻燃剂,无机阻燃剂的阻燃效果较好,通过调节阻燃剂的添加量可以将PVC的氧指数提高至27%以上,制备出难燃的PVC建筑用料。有机阻燃剂主要以磷系阻燃剂为主,这类阻燃剂在燃烧时通常会在PVC表面产生致密的聚偏磷酸类物质,从而起到阻燃效果,与无机阻燃剂相比,有机阻燃剂的阻燃效果较差,但消烟效果较为明显。复合型阻燃剂分为有机/无机复合型阻燃剂和无机复配型阻燃剂,其中有机/无机复合型阻燃剂兼具有机阻燃剂优良的消烟效果和无机阻燃剂显著的阻燃效果,而无机复配型阻燃剂则兼具多种无机阻燃剂的优点。这两类复合型阻燃剂是今后PVC阻燃的发展方向。

参考文献

- [1] 付海,等. 中国塑料,2017,31(1):20-24.
Fu Hai, et al. China Plastic, 2017, 31(1):20-24.
- [2] 朱晓静,等. 聚氯乙烯,2017,45(1):1-4,8.
Zhu Xiaojing, et al. Polyvinyl Chloride, 2017, 45(1):1-4,8.
- [3] 袁杰,等. 工程塑料应用,2017(2):42-45.
Yuan Jie, et al. Engineering Plastics Application, 2017(2):42-45.
- [4] 李静,等. 聚氯乙烯,2017,45(1):9-18.
Li Jing, et al. Polyvinyl Chloride, 2017, 45(1):9-18.
- [5] 相军. 塑料工业,2016,44(8):102-105.
Xiang Jun. China Plastics Industry, 2016, 44(8):102-105.
- [6] 王超. 科技与创新,2016(22):91-92.
Wang Chao. Science and Technology & Innovation, 2016(22):91-92.
- [7] 陈辽阳. 黑龙江科技信息,2016,22:208-208.
Chen Liaoyang. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016, 22:208-208.
- [8] 董志远. 科技与企业,2016(10):242-242.
Dong Zhiyuan. Technology and Business, 2016(10):242-242.
- [9] 冯光荣. 塑料工业,2016,44(2):137-140.
Feng Guangrong. China Plastics Industry, 2016, 44(2):137-140.
- [10] 陈震. 聚氯乙烯材料燃烧特性及阻燃抑烟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2003.
- [11] 包永忠,等. 聚氯乙烯,2008,36(1):24-28.
Bao Yongzhong, et al. Polyvinyl Chloride, 2008, 36(1):24-28.
- [12] 汪晓鹏,等. 聚氯乙烯,2015(6):1-5.
Wang Xiaopeng, et al. Polyvinyl Chloride, 2015(6):1-5.
- [13] 康永,等. 21世纪建筑材料,2010(6):46-48.
Kang Yong. 21ST Century Building Products, 2010(6):46-48.
- [14] 徐定红,等. 工程塑料应用,2012,40(2):101-103.
Xu Dinghong, et al. Engineering Plastics Application, 2012, 40(2):101-103.
- [15] 周生刚. 三氧化二锑/聚氯乙烯复合材料的制备及其阻燃性能的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2015.
Zhou Shenggang. Preparation and flame retardant properties of Sb_2O_3 / polyvinyl chloride composites[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [16] 沈治华,等. 电线电缆,2016(5):13-15.
Shen Zhihua, et al. Electric Wire & Cable, 2016(5):13-15.
- [17] 徐晓萍. 化工管理,2016,29:111-111.
Xu Xiaoping. Chemical Enterprise Management, 2016, 29:111-111.
- [18] 刘立华,等. 精细石油化工,2008,25(2):29-31.
Liu Lihua, et al. Speciality Petrochemicals, 2008, 25(2):29-31.
- [19] 林雅莲. 塑料工业,2016,44(12):99-102.
Li Yalian. China Plastics Industry, 2016, 44(12):99-102.
- [20] 虞华东,等. 浙江理工大学学报,2016,35(1):41-46.
Yu Huadong, et al. Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology, 2016, 35(1):41-46.
- [21] 韩丽静. 铁酸盐(ZnFe_2O_4 , BiFeO_3 , LaFeO_3)的合成及在PVC和PP中的阻燃应用[D]. 保定:河北大学,2015.
Han Lijing. Synthesis of metallic ferrites (ZnFe_2O_4 , BiFeO_3 , LaFeO_3) and their flame-retarding application on poly(vinyl chloride) and polypropylene[D]. Baoding: Hebei University, 2015.
- [22] 冯国东,等. 林产化学与工业,2016,36(1):77-84.
Feng Guodong, et al. Forest Products Chemistry and Industry, 2016, 36(1):77-84.
- [23] 林辉,等. 森林与环境学报,2016,36(3):283-288.
Lin Hui, et al. Journal of Forest and Environment, 2016, 36(3):283-288.
- [24] 刘建中,等. 现代塑料加工应用,2015(2):24-27.
Liu Jianzhong, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2015(2):24-27.
- [25] 赵程波,等. 纺织学报,2017,38(1):105-110.
Zhao Chengbo, et al. Chinese Journal of Textile Science, 2017, 38(1):105-110.
- [26] 孙英娟,等. 中国塑料,2016,30(7):12-17.
Sun Yingjuan, et al. China Plastics, 2016, 30(7):12-17.