

基于异氰酸酯键改性 SIS 基热熔压敏胶的制备及耐候性能的研究

王俊盛,袁永坤,代子硕,孔德智*
(新疆大学化工学院,新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要:为解决热熔压敏胶在大温差环境条件下粘接性能衰减问题,以异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)和甲基丙烯酸2-羟乙基酯(HEMA)合成单体HI作为接枝改性剂,对苯乙烯-异戊二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SIS)进行改性,后制备成改性热熔压敏胶并对比了其热氧老化前后性能。红外、热重分析结果表明在SIS中成功引入了异氰酸酯键。且单一、复合改性下胶料基本物理、流变和粘接性能均有所提升,为耐候性热熔压敏胶的研发和产业化提供了可行方案和理论支撑。

关键词:热熔压敏胶;SIS;化学改性;异氰酸酯键;耐候性能

中图分类号:TQ436.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0275-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.045

Preparation and weather resistance of SIS-based hot-melt pressure-sensitive adhesive modified by isocyanate groups

WANG Jun-sheng, YUAN Yong-kun, DAI Zi-shuo, KONG De-zhi*
(School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: To address the deterioration of bonding performance of hot-melt pressure-sensitive adhesives under conditions of large temperature fluctuations, a monomer HI was synthesized from isophorone diisocyanate (IPDI) and 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) as a grafting modifier. This monomer was subsequently used to modify a styrene-isoprene-styrene block copolymer (SIS). The modified hot-melt pressure-sensitive adhesive was then prepared, and its performance was compared before and after thermal oxidative aging. Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and thermogravimetric analysis (TGA) confirmed the successful incorporation of the isocyanate bond into the SIS matrix. Furthermore, both individual and combined modifications led to improvements in the fundamental physical, rheological, and adhesive properties of the adhesive. This study provides a viable approach and theoretical foundation for the development and industrial application of weather-resistant hot-melt adhesives.

Key words: isocyanate group; SIS; chemical modification; modified hot-melt pressure-sensitive adhesive; weather resistance

热熔压敏胶是一种依靠物理熔融即可实现粘接的胶粘材料,其生产和使用过程中无需使用有机溶剂,挥发性有机物(VOCs)排放少,使用热熔压敏胶不仅符合环保理念,同时还具有固化速度快、使用方便的优点,正逐步替代传统溶剂型压敏胶,广泛应用于包装、建筑防水、电子等行业^[1]。

SIS基热熔压敏胶(SIS-HMPA)是以苯乙烯-异戊二烯-苯乙烯(SIS)嵌段共聚物为主要成分的热熔压敏胶,具有模量低,熔融黏度低,加工性能好等优点^[2]。其高分子链结构侧链上存在甲基,使得SIS基热熔压敏胶拥有良好的初粘性能,能快速与被粘物表面贴合;同时还具备优异的抗剥离性能,在粘接后能承受一定程度的外力拉扯而不易脱落。然而,SIS分子极性较小,导致对常见的无机非金属

材料的粘接强度不足,在一些需要与极性表面紧密结合的应用场景中受限;此外,SIS分子中存在不饱和键,使得其抗老化能力不足,在长期使用过程中,尤其是受到光照、氧气、温度变化等因素影响时,容易发生氧化、交联等反应,导致性能衰减^[3]。在新疆等昼夜温差大的地区,高低温极端气候频繁出现,SIS基热熔压敏胶制成的胶层在高温下易发生热氧老化产生脱粘失效现象;在低温环境中,其粘附性降低,不能满足实际使用要求,严重影响了其在建筑等行业的应用效果,普通的SIS基热熔压敏胶难以满足特殊环境下的使用需求^[4]。

接枝改性是改善SIS性能的有效技术路径,通过在SIS分子链上引入极性基团或功能性链段,能够改变SIS分子的极性,进而改善其与极性材料的

收稿日期:2026-03-30;修回日期:2026-07-10

基金项目:新疆大学大学生创新创业训练计划项目(S202410755001X);新疆维吾尔自治区昌吉州两区科技发展计划项目(2023LQG03)

作者简介:王俊盛(2003-),男,本科生,js0821w@163.com;孔德智(1990-),男,博士,副教授,研究方向为天然功能高分子材料,通讯联系人,kongdz@xju.edu.cn。

相容性和粘接性能^[5-6]。Hsieh 等^[7]以乙烯基吡啶为接枝单体,将其接枝到 SIS 上并进行研究,发现其气密性较改性前大幅改善。Zhao 等^[8]将活性聚丁二烯(Polybutadiene, PB)阴离子接枝于环氧化 SIS,成功合成 SIS-g-PB。研究结果表明。由于 PB 可以改善环氧化主链与增粘树脂的相容性的同时,还可以保留 SIS-g-PB 共聚物中大部分环氧基团,使得其粘接强度提升 2 倍。

基于此,本研究采用异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)与甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)合成接枝单体 HI,通过化学改性制备得到甲基丙烯酸羟乙酯-异佛尔酮二异氰酸酯接枝 SIS(SIS-g-HI);随后将 SIS-g-HI 按不同比例与环烷油、增粘树脂等组分共混,制备系列改性热熔压敏胶。通过软化点测试、黏度测试、流变性能分析、剥离强度测试及耐候性能评估,系统探究改性剂对热熔压敏胶综合性能的影响规律,最终确定 SIS-g-HI 的最佳改性条件,为大温差环境适配型 SIS 基热熔压敏胶的研发提供技术支撑^[9]。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

原材料:SIS(YH-1126),中石化湖南石油化工有限公司;环烷油(kn-4010),广州鑫鑫正化工有限公司;氢化树脂 DCPD(E-5400),深圳市丹松塑胶有限公司;浓硫酸(H_2SO_4 ,分析纯);甲基丙烯酸 2-羟乙基酯(HEMA,纯度 99%)、异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI,纯度 99%)、过氧化苯甲酰(BPO,分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

仪器:集热式磁力加热搅拌器(DF-II 型),江苏金怡仪器科技有限公司;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9245A 型),上海一恒科技仪器有限公司;共聚焦显微拉曼光谱仪(HR Evlution 型),法国 HORIBA 公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Nicolet iS20 型),美国赛默飞世尔科技公司;热重分析仪(TG, Q600 SDT 型),美国 TA 公司;动态剪切流变仪(DSR, MCR 302e 型),奥地利安东帕有限公司;低温弯曲梁流变仪(TE-BBR SD 型),美国 Cannon 公司;智能沥青软化点实验仪(HR-2806F 型)、布氏旋转黏度计(NDJ-1C 型),沧州峰建仪器设备有限公司;万能实验机(ETM104B),深圳万测实验设备有限公司;热光学老化箱(XJ-1),新疆大学化工学院自制,电子天平(FA2004N 型),上海鼎科科学仪器有限公司。

1.2 SIS-g-HI 的制备

HI 的合成:在氮气气氛保护下,将 55 mL HEMA 滴入到 100 mL IPDI 中,于 40℃ 下反应 6 h,得到接枝单体 HEMA-IPDI(记为 HI)。

SIS-g-HI 的制备:将 SIS 和二甲苯加入三颈烧瓶中,冷凝回流并加热至 80℃,待 SIS 完全溶胀后加入质量分数 20% HI 和质量分数 2.0% BPO, N_2 氛围下反应 4 h。反应结束后用甲醇析出接枝产物,超声搅拌 30 min 后,使用甲醇抽滤洗涤 3~5 次去除未反应单体及均聚物,后将淡黄色产物在真空干燥箱中烘干得到 SIS-g-HI(图 1)。

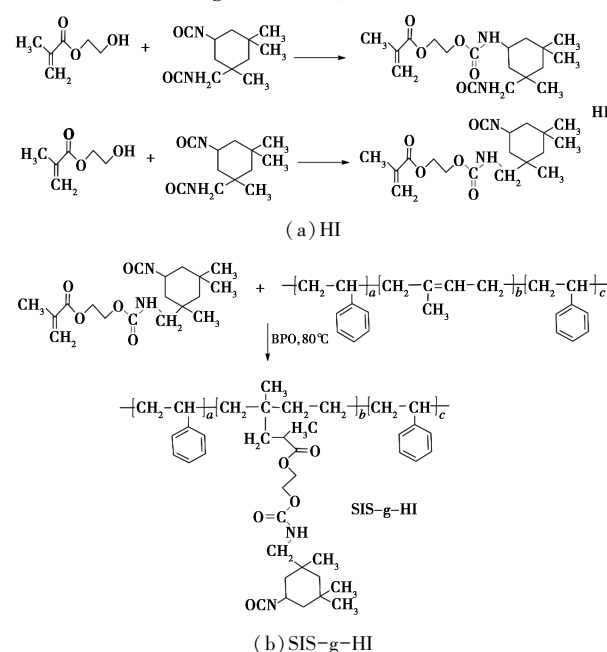


图 1 合成机理图

1.3 改性热熔压敏胶的制备

将 40 g 环烷油和 80 g 增粘树脂在 120℃ 下玻璃棒搅拌 30 min,待完全溶解后,加入 60 g 改性 SIS,在 1 000 r/min、170℃ 下机械搅拌 1.5 h,制得热熔压敏胶。

1.4 分析与测试

1.4.1 FT-IR 分析

采用傅里叶红外光谱仪测试改性前后 SIS 的官能团。样品采用压片机制成 2 cm×2 cm×2 mm 的薄片,旋转探头至薄片表面,以 4 cm⁻¹ 的扫描分辨率扫描 32 次,测试范围为 4 000~400 cm⁻¹。

1.4.2 热重分析

热重分析能够通过测量样品在设定温度区间内的质量变化确定样品的分解温度范围,评估其热稳定性。本研究采用热重-差热同步分析仪(STA7300,日本 HITACHI 公司),在 N_2 气氛下,以 10℃/min 的

升温速率对 30~700℃ 温度范围内样品的热分解情况进行分析。

1.4.3 热氧化老化实验

根据 GB/T 14522—2008,将不同反应条件下的改性热熔压敏胶放进老化箱,设置老化时间为 24 h、温度为 163℃。老化 2、4 h 时分别取样,定期测试其物理性能

1.5 物理性能测试

1.5.1 热熔压敏胶软化点测试

采用智能沥青软化点实验仪(HR-2806F 型),测定方法参照 GB/T4507—2014,起始加热介质温度为(32℃±1℃),加热介质为甘油,取 2 次实验平均值。

1.5.2 热熔压敏胶黏度测试

采用布氏旋转黏度计(NDJ-C 型),测定方法参照 GB/T 0625—2011,选用 27 号转子,实验温度区间为 160~180℃。

1.5.3 热熔压敏胶流变特性

DSR 测试:采用旋转流变仪(MARS 60,德国 Haake 公司)进行温度扫描实验,实验平板直径为 25 mm,热熔压敏胶试样厚度为 1 mm,温度扫描区间为 20~70℃,角频率设定 10 rad/s。

BBR 测试:采用低温弯曲梁流变仪(TE-BBR SD,美国 Cannon 公司)测试改性热熔压敏胶在-12℃的蠕变劲度模量值(S)和蠕变速率值(m)。

1.5.4 卷材与卷材剥离强度测试

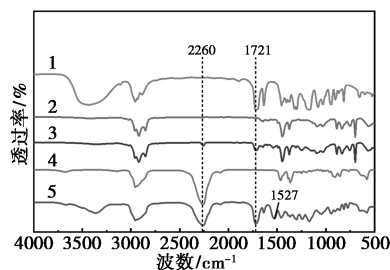
按 GB/T 2791 的规定进行测定,选用 PE 片材作为基材,裁剪为 100 mm×50 mm 的试件,将热熔压敏胶熔融涂覆于其中一块试件表面(涂胶量 20 g/m²),迅速与另一块 PE 试件贴合,贴合面积 50 mm×70 mm,用质量 2 kg、宽度 50~60 mm 的压轮反复滚压 3 次,在标准环境(温度 23℃±2℃、相对湿度 50%±5%)下放置 24 h。采用万能实验机进行剥离测试,拉伸速度(100±10)mm/min,平行测试 5 个试件,取算术平均值作为剥离强度结果。

2 结果与讨论

2.1 FT-IR 分析

图 2 是 HI 合成和改性前后 SIS 的红外光谱图。HI 在 1 527 cm⁻¹处出现的吸收峰归属于 N—H 的弯曲振动,说明 HEMA 中的羟基(—OH)与 IPDI 的异氰酸酯基(—NCO)发生反应,成功合成了 HI。对比未改性 SIS 与 SIS-g-HI 的红外光谱图可发现,SIS-g-HI 的红外谱图中,1 721 cm⁻¹处是 HEMA 的羰基

吸收峰,2 260 cm⁻¹是—NCO 的红外特征峰。并且红外光谱图中 SIS-g-HI 的其余的振动峰均与 SIS 呈对应关系,由此可说明 HI 成功接枝到了 SIS 分子链上,接枝共聚物 SIS-g-HI 被成功合成^[9]。

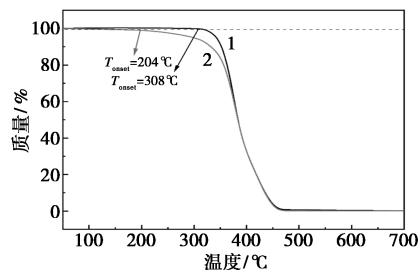


1—HEMA;2—SIS;3—SIS-g-HI;4—IPDI;5—HI

图 2 HI、SIS 和 SIS-g-HI 的 FT-IR 谱

2.2 热重分析

图 3 是 SIS 改性前后的热重曲线(TG),SIS 经改性后,其热稳定性略有下降,这一现象主要归因于接枝引入的 HI 链段(含酯基、脲基等官能团)热稳定性略低于 SIS 主链的碳碳骨架结构,导致整体热分解起始温度轻微降低。SIS-g-HI 的热分解起始温度 T_{onset} 为 204℃,大于 170℃(改性热熔压敏胶制备温度),表明截至共聚物在后续制备改性热熔压敏胶时不会发生分解^[10]。



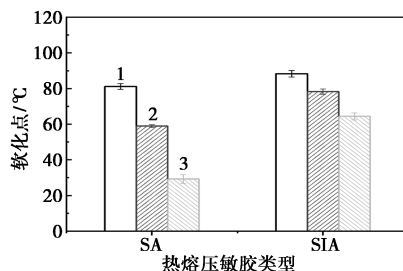
1—SIS;2—SIS-g-HI

图 3 改性前后 SIS 热重分析

2.3 改性热熔压敏胶物理特性

2.3.1 软化点分析

图 4 是热熔压敏胶样品的软化点结果。由图可



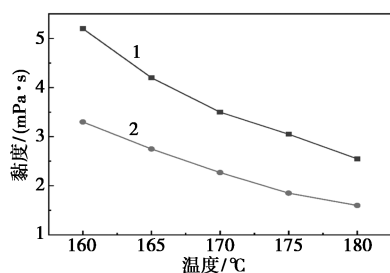
1—未老化;2—163℃老化 2 h;3—163℃老化 4 h

图 4 改性前后及老化后热熔压敏胶的软化点

见,改性前热熔压敏胶软化点为 82.4℃,改性后热熔压敏胶的软化点为 89.4℃,有所提升。SIS-HI 中—NCO 与环烷油中的一OH 可进一步形成氨酯键,增强了分子间作用力,限制了链段运动,从而提高了胶料的软化点。同时,接枝侧基形成的交联网络能抑制热氧降解,可以延缓热老化过程中软化点的衰减,使改性热熔压敏胶在极端高温(163℃)下仍保持较好的结构稳定性^[11]。

2.3.2 黏度分析

图 5 为改性前后 SIS 基热熔压敏胶的黏度实验结果,所有样品的黏度均随温度升高而下降。SIS 基热熔压敏胶 SA 在 160℃ 下的黏度为 5.2 Pa·s,而 SIA 的黏度为 3.3 Pa·s,提高了其粘接时的浸润性和相容性。这是由于异氰酸酯键接枝侧基插入 SIS 分子链间时,破坏了部分苯乙烯嵌段的有序缠结,同时由于接枝侧基空间位阻大而未引发过度交联,因此熔融状态下分子链运动阻力减小,黏度明显降低^[12]。



1—SA; 2—SIA

图 5 改性前后热熔压敏胶的黏度

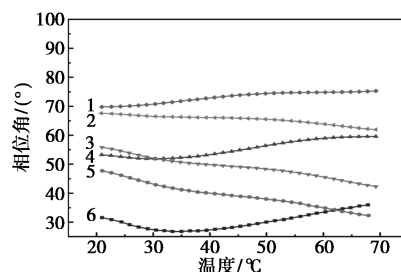
2.4 流变性能

2.4.1 温度扫描实验

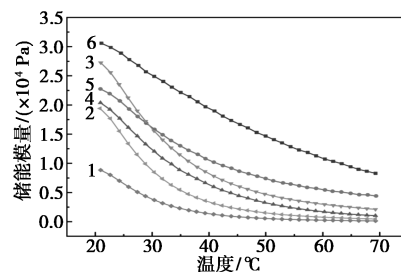
改性前后热熔压敏胶的相位角 δ 结果如图 6(a) 所示。 δ 反映热熔压敏胶中的粘弹性成分占比, δ 越大说明热熔压敏胶中粘性成分越大,由图 6(a) 可知未改性热熔压敏胶相位角随温度升高先减小后增大, δ 在 35℃ 前下降,在 35℃ 后逐渐升高,原因为 35℃ 时材料发生从弹性固体向粘性流体的转变。改性后热熔压敏胶的相位角增大,随着温度的升高,SIA 呈下降趋势。随着老化程度的加深,两种材料的相位角都明显高于未老化的相位角,且老化时间越长,增大的越多,这是由于高温老化弱化了材料的弹性网络,进一步提升了粘性占比^[13]。

改性前后的热熔压敏胶的储能模量如图 6(b) 所示,由图可知改性前后的热熔压敏胶的储能模量均呈现出随着温度的升高而降低的趋势,且在相同

的温度下,改性热熔压敏胶的储能模量较未改性的低。随着老化程度的加深,两种材料的储能模量均降低,SA 储能模量已经明显低于 SIA 的储能模量,且老化时间越长,降低值越大,这表明改性后的热熔压敏胶较改性前有着更好的贴合性和浸润性^[14]。



(a) 相位角



(b) 储能模量

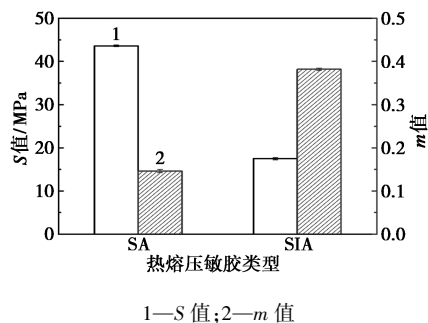
1—SA 于 163℃ 老化 4 h; 2—SIA 于 163℃ 老化 4 h;
3—SIA 于 163℃ 老化 2 h; 4—SA 于 163℃ 老化 2 h; 5—SIA; 6—SA

图 6 改性热熔压敏胶动态流变性能

2.4.2 低温弯曲梁流变实验

弯曲梁流变(Bending Beam Rheometer, BBR)测试可以表征粘弹性材料的低温力学行为,通过测定 S 和 m 值,可表示热熔压敏胶的低温蠕变特性与应力松弛能力, S 值越低表明材料在低温环境下的变形阻力越弱, m 值越高则反映其应力松弛能力越强。为研究改性热熔压敏胶的低温性能,本实验选择在 -12℃ 条件下进行测试。

如图 7 所示,同一温度条件下,经异氰酸酯键接枝改性后热熔压敏胶的 S 值由改性前的 43.6 MPa 降至 17.6 MPa,减少了 59.6%,表明材料在低温环



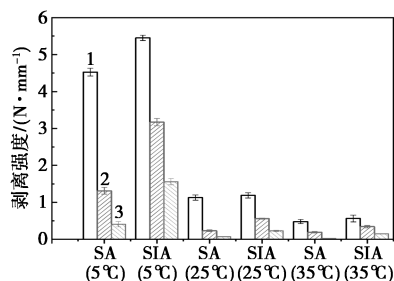
1— S 值; 2— m 值

图 7 改性前后热熔压敏胶的弯曲梁流变性能

境下的变形阻力大幅减弱;同时, m 值从 0.148 升至 0.385,提升幅度为 159.9%,反映出材料的应力松弛能力显著增强。这是由于异氰酸酯键接枝引入的柔性侧基可破坏 SIS 分子链间的物理交联,增加了链段运动能力同时降低了低温下的刚性,另一方面极性基团可提升材料对低温的适应能力,使其在昼夜温差大或冬季施工环境中的适用性提高。

2.5 防水卷材的抗剥离性能

改性前后不同温度 and 不同老化程度下卷材与卷材剥离强度如图 8 所示,由图可知,相同老化程度下,随着温度的升高,各试样的剥离强度逐渐降低,这是由于热熔压敏胶的特性所致^[15]。相同温度和老化程度下,改性热熔压敏胶的剥离强度均高于未改性热熔压敏胶的剥离强度,以未老化为例,SIA 在 35、25、5℃ 下的剥离强度较 SA 各提高了 21.2%、5.1%、17.4%。相同温度下,随着老化时间的延长,2 种样品的剥离强度均呈现明显下降趋势,但是改性热熔压敏胶的剥离强度始终高于未改性热熔压敏胶的剥离强度。综合分析,通过改性处理,热熔压敏胶的粘接性和耐候性得到显著提升,有更好的施工性和适用性^[16]。



1—未老化;2—163℃老化 2 h;3—163℃老化 4 h

图 8 改性前后热熔压敏胶的抗剥离强度

3 结论

本研究通过向 SIS 中引入异氰酸酯基团,表征了改性前后及不同老化时间的热熔压敏胶,通过软化点、熔融黏度、流变性能、剥离强度等分析改性热熔压敏胶的高低温性能,主要结论如下。

(1) 红外光谱表征证明, SIS-g-HI 中出现了 C=O 键和 NCO 键的特征峰,证明 SIS-g-HI 成功制备。通过热重分析,异氰酸酯基团的引入降低了 SIS 的热稳定性,但热分解起始温度 T_{onset} 大于 170℃,后续制备改性热熔压敏胶时不会分解^[17]。

(2) 与未改性热熔压敏胶相比,改性热熔压敏胶软化点有所提高,熔融黏度有所降低,其原因在于

形成了氨基键增强分子作用力,交联网络提高了其高温稳定性^[18]。未改性热熔压敏胶的 160℃ 的黏度 5.2 Pa·s,改性后 SIA 为 3.3 Pa·s,接枝侧基破坏分子缠结且未过度交联,降低链段阻力,提升粘接浸润性,接枝改性改善了热熔压敏胶的浸润性能和加工性能^[19]。

(3) 改性后热熔压敏胶的相位角 (δ) 显著提高、储能模量 (G') 降低,说明粘性成分占比增加、弹性形变阻力减小,高低温环境下的粘弹性适配性更好;经 2、4 h 热氧老化后,改性后的相位角与储能模量衰减幅度均小于改性前,证实改性后的弹性网络结构更难被高温老化破坏,能适应极端温差下的动态服役需求^[20]。

(4) 改性后热熔压敏胶的剥离强度提升超 20%,改性高分子自粘防水卷材的卷材与卷材剥离强度更大,粘结性能更好,在未老化条件下,在 35、25、5℃ 下的剥离强度较改性前各提高了 21.2%、5.1%、17.4%。热氧老化后,2 样品剥离强度均呈下降趋势,但改性后的剥离强度始终高于改性前样品,且衰减幅度更小(如 35℃ 老化 4 h 后,SIA 剥离强度保留率较 SA 高 13.6%),表明其在长期高温服役环境中仍能维持良好的粘接性能,可满足新疆等极端温差地区的使用需求^[21]。

参考文献

- [1] 薛静,冯道硕,王鸣,等.SIS 基热熔压敏胶改性研究进展[J].中国胶粘剂,2020,29(11):61-66.
- [2] 裴磊.改性 SIS 型热熔压敏胶的性能影响研究[J].中国建筑防水,2020,(3):19-21.
- [3] 吴波.SIS/SBS 嵌段型热熔压敏胶的微多相结构动态粘弹性及力学性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [4] 张广彬,刘金涛,孙艳芳.高分子防水卷材用改性 SIS 热熔压敏胶性能研究[J].中国建筑防水,2020,(7):8-13.
- [5] 王占岳,周雍森,赵忠夫,等.改性 SIS 热熔压敏胶的结构及性能:北京粘接学会第二十三届学术年会暨粘接剂、密封胶技术发展研讨会论文集[C].大连:大连理工大学化工学院,精细化工国家重点实验室,2014:149-153.
- [6] 仪海霞,徐勤福,赵峰俊,等.SIS 型热熔压敏胶影响因素分析[J].化学与粘合,2015,37(1):28-30.
- [7] Hsieh C C, Chen S A. Radiation-induced graft polymerization of 4-vinyl pyridine to styrene-isoprene-styrene (SIS) triblock copolymer [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1990, 39(7): 1475-1484.
- [8] Zhao Z, Liu P, Zhang C, et al. Hot-melt pressure-sensitive adhesives based on SIS-g-PB copolymer for transdermal delivery of hydrophilic drugs [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 91: 72-76.
- [9] 吴传芬,范萍,李文林,等.SIS 型热熔压敏胶的粘接性能及动态流变行为研究[J].中国胶粘剂,2012,21(1):20-23.

(下转第 286 页)

- [17] Xiang Y, Xin L, Deetz J D, *et al.* Reaction mechanisms of the initial oligomerization of aluminophosphate [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2016, 120(18): 2902–2910.
- [18] Morris J H, Perkins P G, Li S. The relationship between the adhesion of aluminum dihydrogen phosphate and silica complex and the crystal form of aluminum dihydrogen phosphate [J]. *Inorganic Salt Industry*, 1980, (5): 53–55.
- [19] Wang K, Fu Y Q, Song J L, *et al.* Preparation of aluminum phosphate-coated nano-silica and its effect on the flame retardancy of PAN nanofibers [J]. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(10): 13–17.
- [20] Wang Z, Wen Y, Zhao S, *et al.* Soy protein as a sustainable surfactant to functionalize boron nitride nanosheets and its application for preparing thermally conductive biobased composites [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 137: 239–247.
- [21] Akech S R O, Harrison O, Saha A. Removal of a potentially hazardous chemical, tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium chloride, from water using biochar as a medium of adsorption [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, 12: 196–210.
- [22] Walkley B, Nicolas R S, Sani M, *et al.* Phase evolution of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O gels in synthetic aluminosilicate binders [J]. *Dalton Transactions*, 2016, 45(13): 5521–5535.
- [23] He Y, Liu L, He L, *et al.* Characterization of chemosynthetic H₃PO₄-Al₂O₃-2SiO₂ geopolymers [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(9): 10908–10912.
- [24] Tchakouté H K, Fotio D, Rüschler C H, *et al.* The effects of synthesized calcium phosphate compounds on the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 776–792.
- [25] Wang F, Wang Q, Wang X. Progress in research on fire retardant-treated wood and wood-based composites: A Chinese perspective [J]. *Forest Products Journal*, 2010, 60(7/8): 668–678.
- [26] Zhong S, Song S, Wang B, *et al.* Fast preparation of ERI-structure AlPO-17 and SAPO-17 in the presence of isomorphous and heterogeneous seeds [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 263: 11–20.
- [27] Lin H, Liu H, Li Y, *et al.* Properties and reaction mechanism of phosphoric acid activated metakaolin geopolymer at varied curing temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 144: 106425. ■

(上接第 274 页)

- [14] 王菁, 杨冰冰, 陈蕾, 等. 无卤阻燃母粒及其改性纤维的制备和性能研究 [J]. *合成纤维工业*, 2024, 47(1): 23–27.
- [15] 李湘, 方松刚, 徐娟, 等. 聚乙烯基阻燃母粒的制备及其在木塑复合材料中的应用 [J]. *塑料工业*, 2025, 53(6): 139–143, 168.
- [16] Konrad G, Laurent C, Yongjun M. Thiazolium-containing poly(ionic liquid)s and ionic polymers [J]. *Polymers and Ionic Liquids*, 2014: 67–77.
- [17] Zhang W, Kochovski Z, Bernhard V, *et al.* Crosslinked 1,2,4-triazolium-type poly(ionic liquid) nanoparticles [J]. *Polymer*, 2016, 107: 509–516.
- [18] 李艳伟. 咪唑基离子液体改性三聚氰胺阻燃硬质聚氨酯泡沫的研究 [J]. *现代化工*, 2013, 33(4): 71–74.
- [19] Xu D, Zhou M, Qian X. The influence of poly lactic acid's crystalline behavior and the compatibility by poly(ionic liquid) [C].

(上接第 279 页)

- [10] Li X, Zhang Y, Wang J. Preparation and properties of isocyanate modified SIS hot-melt pressure-sensitive adhesive for high temperature application [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35(15/16): 1689–1705.
- [11] 蹇磊. 增黏树脂对改性 SIS 型热熔压敏胶性能的影响 [J]. *中国建筑防水*, 2021, 41(8): 12–15.
- [12] 吕国松, 张广彬. 高密度聚乙烯自粘胶膜防水卷材的研制 [J]. *中国建筑防水*, 2014, (21): 30–33.
- [13] Park S H, Lee J H, Kim Y C. Rheological and adhesive properties of SIS-based HMPSAs modified with polar functional monomers [J]. *Polymer Testing*, 2022, 106: 107562.
- [14] Han L, Chen G, Zhang L. Effect of graft modification on the thermal and aging resistance of SIS-based hot-melt pressure-sensitive adhesives [J]. *European Polymer Journal*, 2023, 192: 111958.
- [15] Garcia M, Rodriguez L, Martinez J. Weather resistance of modified SIS hot-melt pressure-sensitive adhesives for outdoor construction applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120987.

Mechatronics and Intelligent Materials III: Trans Tech Publications, 2013: 334–337.

- [20] Guo P, Zhang H, Liu X, *et al.* Counteranion-mediated intrinsic healing of poly(ionic liquid) copolymers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(2): 2105–2113.
- [21] 马恩庆, 周俏, 郭立颖. 酸性离子液体催化合成生物基共聚酯 PEHF [J]. *塑料科技*, 2025, 53(11): 7–11.
- [22] Renjith S, Talasila P, Sudha J. Bio-based ionic liquid crystalline quaternary ammonium salts: Properties and applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(6): 4126–4133.
- [23] Chen X, Ding Y, Li Y, *et al.* Modification of polylactide by poly(ionic liquid)-b-polylactide copolymer and bio-based ionomers: Excellent toughness, transparency and antibacterial property [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 221: 1512–1526. ■
- [16] 张广彬. 高分子防水卷材用自粘胶的制备及性能研究 [J]. *中国建筑防水*, 2011(9): 6–8, 18.
- [17] Kim J H, Lee S W, Park J Y. Effect of isocyanate-based crosslinker on the thermal stability and adhesion properties of SIS hot-melt pressure-sensitive adhesives [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020, 89: 234–241.
- [18] Liu Y, Chen W, Wang L. Improvement of weather resistance of SIS-based HMPSAs by grafting with maleic anhydride and ethylene glycol diglycidyl ether [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 159: 106328.
- [19] Zhang Q, Li M, Zhao J. Influence of grafting degree of SIS-g-MMA copolymer on the rheological and adhesive properties of hot-melt pressure-sensitive adhesives [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(36): 52187.
- [20] 陈晨, 李娟, 张宏伟. 异氰酸酯改性 SIS 热熔压敏胶的耐老化性能研究 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(5): 68–74.
- [21] Zhou Y, Wang H, Chen F. Preparation of SIS-based HMPSAs with enhanced high and low temperature resistance by composite modification of IPDI and TiO₂ [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 368: 131345. ■