

布基线束胶带用高性能丙烯酸酯压敏胶的制备

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1009

李瑞超^{1,2} 童 赞^{1,2}

王亚权¹ 倪华钢²

1. 天津大学

化工学院

天津 300072

2. 浙江理工大学

化学与化工学院

浙江 杭州 310018

摘 要: 布基线束胶带广泛应用于汽车、电子行业,但国产布基线束胶带应用时普遍存在开胶、开线、剥离残胶等问题。以丙烯腈(AN)为硬单体,丙烯酸丁酯(BA)和丙烯酸异辛酯(2-EHA)为软单体,丙烯酸(AA)和丙烯酸十二烷基酯(LA)为功能单体,乙酸乙酯为溶剂,过氧化苯甲酰(BPO)为引发剂,通过自由基溶液聚合合成了聚丙烯酸酯,并添加增黏树脂(氢化松香甘油酯)和交联剂(乙酰丙酮铝),制备了高性能布基线束压敏胶。通过对聚丙烯酸酯分子链的设计,改变配方组成,调控了压敏胶的黏接强度和表面能,并利用流变、接触角测试等手段,探究了聚合物分子结构与压敏胶黏接性能、表面能及应用性能关系。结果表明,硬单体 AN 质量分数为 10%、软单体(BA 与 2-EHA 质量比为 1:4)质量分数为 80%、功能单体 AA 和 LA 质量分数分别为 9.4% 和 0.6%,氢化松香树脂和乙酰丙酮铝用量分别为总单体质量的 6% 和 0.8% 时,所制备丙烯酸酯压敏胶的初黏为 10# 钢球,180° 剥离强度为 30 N/25 mm,持黏大于 100 h,该压敏胶能有效解决布基线束胶带包线开胶、剥离残胶的问题。

关键词: 布基线束胶带; 聚丙烯酸酯; 压敏胶; 分子链结构; 表面能

中图分类号: TB484.9; TQ436⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0071-09

引文格式: 李瑞超,童 赞,王亚权,等.布基线束胶带用高性能丙烯酸酯压敏胶的制备[J].包装学报,2025,17(1):71-79.

1 研究背景

布基线束胶带广泛应用于电子制造业,用作固定和保护电子设备的线束。在设备运行过程中,要确保线束不会因为振动、温度变化等因素而松动或损坏。随着电子行业的快速发展,对电子线束胶带的性能要求也在不断提高。电子线束胶带由基材、压敏胶(pressure-sensitive adhesives, PSA)、覆盖层、导电层、隔离层、背涂层组成^[1],其中压敏胶为电子线束胶带最关键的部分。

丙烯酸酯压敏胶因其配方简单易调整、黏接范围广、黏接强度高、成本较低且耐老化性能良好等优点,得到了广泛的发展^[2]。当前,布基线束胶带采用溶剂型丙烯酸酯压敏胶为主。溶剂型压敏胶制备简便,同时兼顾高性能压敏胶所需的多层次胶膜结构和可涂布性。国际领先的压敏胶与胶带制造企业如 3M、Tesa、Nitto 等,掌握了大量对压敏胶结构调控的核心技术,可以精准调控压敏胶性能,其压敏胶带产品在高端市场上占据了主导地位^[3]。我国对丙烯酸酯压敏胶制备的布基线束胶带的研究起步较晚,目前其仍

收稿日期:2024-09-12

作者简介:李瑞超,男,硕士生,主要研究方向为高性能压敏胶,E-mail: ruichao07@163.com

通信作者:童 赞,女,副教授,博士,主要从事表面薄膜的改性及性能研究,E-mail: tongyun@mail.ustc.edu.cn

存在包线开胶、剥离力低且剥离残胶等问题。究其原因压敏胶与被黏材料之间的结合力较低；压敏胶膜的表面能较高，黏接低表面能材料（布基材料）时，难以在其表面铺展开来，从而导致压敏胶与基材的有效接触面积较少^[4]。

压敏胶的界面黏接作用主要依赖于分子间作用力，其性能强烈依赖于聚合物的黏弹性。压敏胶的初黏力、剥离力、内聚力等三个基本性能之间相互制约，调控压敏胶性能更是一项平衡艺术^[5-7]。溶剂型压敏胶三项性能的平衡通常是依靠调控共聚物组成、聚合物分子量与控制交联度实现的。因此，本研究通过丙烯酸酯压敏胶分子链的设计，通过调整硬单体含量、软单体组成、增黏树脂用量、交联剂用量等提高压敏胶的黏接强度，并引入长链烷基侧链丙烯酸酯来调控压敏胶膜表面能，提高润湿效果，从而解决包线开胶、剥离残胶问题。

2 实验部分

2.1 主要原材料

丙烯酸异辛酯（2-ethylhexyl acrylate, 2-EHA）、丙烯酸丁酯（butyl acrylate, BA）、丙烯酸（acrylic acid, AA）、丙烯腈（acrylonitrile, AN）、过氧化苯甲酰（benzoyl peroxide, BPO），工业级，东莞永正化工有限公司；丙烯酸十二烷基酯（dodecyl acrylate, LA），工业级，湖北隆信化工实业有限公司；乙酰丙酮铝（aluminum acetylacetonate, AIACA），分析纯，湖州海谱化工有限公司；氢化松香甘油酯，深圳吉田化工有限公司。

2.2 仪器及设备

恒温加热磁力搅拌器，DF-101S 型，杭州惠创仪器设备有限公司；接触角测量仪，JC2000CS 型，上海中晨数字技术设备有限公司；智能涂胶机，JYT-G 型，瑞安建升机械有限公司；初黏性测试仪，CZY-G 型，广东中野精科仪器设备有限公司；智能拉力试验机，HTS-BLY2510A 型，广东中野精科仪器设备有限公司；温控型持黏性测试仪，CNY-HS 型，济南三泉智能科技有限公司；流变仪，MCR92 型，奥地利 Anton Paar 公司。

2.3 试样制备

采用先滴加聚合软单体（BA 与 2-EHA 混合物），后滴加硬单体（AN）和功能单体（AA 或 AA 与 LA）的方法，以乙酸乙酯为溶剂、BPO 为引发剂，

进行自由基溶液聚合制备聚丙烯酸酯，随后加入增黏树脂（氢化松香甘油酯）和交联剂（乙酰丙酮铝），搅拌均匀后制成压敏胶。具体制备过程如下：1）在 80 ℃ 氮气氛围下，向反应釜中加入 100 g 乙酸乙酯、0.3 g BPO，在 190 r/min 的转速下匀速搅拌 0.5 h；2）将 70~90 g 软单体（占单体总质量的 70%~90%）BA 与 2-EHA 按一定比例混匀后，加入到反应釜中，在氮气保护下，继续搅拌 3.0~3.5 h，之后采用注射泵将 10~30 g 硬单体（占单体总质量的 10%~30%）和 10 g 功能单体混合液（占单体总质量的 10%）在 120 min 内均匀滴加至反应釜中；3）待滴加结束后，保持温度和转速不变，继续反应 2~3 h。4）待预聚物取出冷却后，加入适量增黏树脂与交联剂搅拌均匀，制成布基线束胶带用压敏胶。

2.4 测试与表征

1) 流变

采用流变仪进行丙烯酸酯压敏胶的流变分析。测试条件为：样品尺寸 10 mm × 10 mm × 2 mm，测试频率 0.01~200 Hz，测试温度 25 ℃。

2) 接触角与表面能

采用接触角测量仪，按照 GB/T 30693—2014《塑料薄膜与水接触角的测量》中的方法，以水和二碘甲烷为测试液体，测定其在丙烯酸酯压敏胶膜上的接触角。采用同样的方法，以蒸馏水和乙二醇作为润湿剂，测试其在丙烯酸酯压敏胶膜上接触角，再通过二液法计算得到压敏胶的表面能。

3) 黏接性能

初黏测试：采用初黏性测试仪，按照标准 GB/T 31125—2014《胶黏带初黏性试验方法 环形法》中的方法，对压敏胶的初黏进行测定。

剥离测试：采用智能拉力试验机，按照标准 GB/T 2792—2014《胶黏带剥离强度的试验方法》中的方法，对压敏胶进行 180° 剥离测试。

持黏测试：采用温控型持黏性测试仪，按照标准 GB/T 4851—2014《胶黏带持黏性的试验方法》中的方法，对压敏胶的持黏进行测定。

3 结果与讨论

3.1 硬单体含量对压敏胶黏接性能的影响

压敏胶的分子链结构显著影响着压敏胶的黏接性能，其中硬单体分子结构紧密，提供了更高的内聚力^[8]；软单体通常具有较低的玻璃化转变温度（ T_g ）

和较长的聚合物侧链,使聚合物具有较高的柔韧性^[9]。通过调整压敏胶中硬单体含量,可以改变压敏胶的内聚力。本研究固定功能单体 AA 质量分数为 10%, BA 为软单体,考察了硬单体 AN 含量变化对压敏胶黏接性能的影响,结果如图 1 所示。

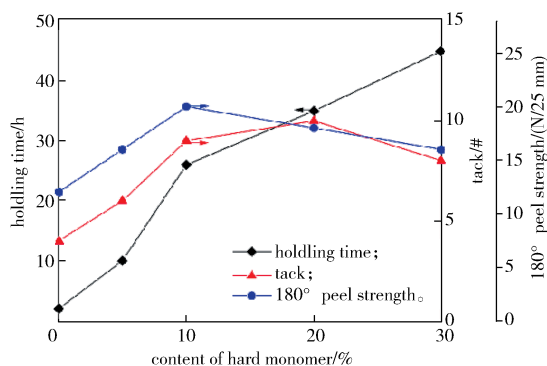


图 1 硬单体含量对压敏胶黏接性能的影响

Fig. 1 Effects of contents of hard monomer on adhesive performance of PSA

由图 1 可知,随着硬单体含量的增加,压敏胶的初黏和剥离均呈现先增大后减小的趋势,在 AN 质量分数分别为 20%、10% 时,初黏和剥离强度分别达到最大值(10# 钢球、20 N/25 mm)。持黏则随着硬单体含量增加而逐渐增加,从 2 h 增加到 40 h。这是由于软单体 BA 的 T_g 较低,当硬单体含量较低时,聚合物的分子链运动自由,内聚力低,剥离测试均为内聚破坏。随着硬单体含量的升高,聚合物的 T_g 升高,分子自由体积降低,链段活动能力减弱,内聚力逐渐增大,致使压敏胶的初黏、剥离、持黏逐渐增大^[4]。但随着硬单体含量继续增加,压敏胶整体 T_g 继续增大,分子链运动受限,分子间相互作用增强,流动性减弱,与基材接触时不易于流动和润湿^[10],导致初黏和剥离下降,但内聚力继续增大,压敏胶持黏继续增大。故最终选择压敏胶中硬单体 AN 质量分数为 10%,此时压敏胶的初黏为 9# 钢球,剥离强度为 20 N/25 mm,持黏可达 26 h。

3.2 软单体组成对压敏胶黏接性能的影响

丙烯酸酯压敏胶中软单体的 T_g 及侧链结构直接影响压敏胶的黏接性能。 T_g 较高的单体含量越高,压敏胶的 T_g 越大,分子链运动受限,从而使压敏胶内聚力增大。侧链烷基越长,链运动的空间位阻增大,分子链间堆积密度降低,压敏胶分子链更加柔顺,增强了胶黏剂的柔软性和弹性。侧链烷基越短,链运动的空间位阻减小,分子链之间的堆积密度增大,压敏

胶的刚性增大^[11-12]。本研究固定其它条件不变,研究了软单体 BA 与 2-EHA 组成(以 2-EHA 的质量分数为参数)对压敏胶黏接性能的影响,结果如图 2 所示。

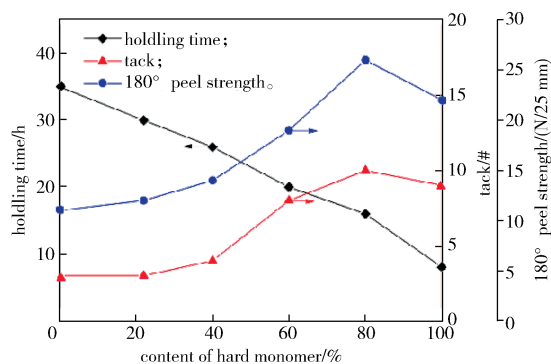


图 2 2-EHA 含量对压敏胶黏接性能的影响

Fig. 2 Effects of contents of 2-EHA on adhesive performance of PSA

由图 2 可以看出,随着软单体中 2-EHA 含量的增大,压敏胶的初黏和剥离均呈现先增大后减小的趋势,持黏则逐渐降低。当 2-EHA 质量分数为 80% (即 BA 与 2-EHA 质量比为 1:4) 时,压敏胶的综合性能最佳,初黏为 10# 钢球,剥离强度为 26 N/25 mm,持黏为 16 h。2-EHA 占比增大,压敏胶的长侧链烷基含量逐渐增大,分子链堆积密度降低,分子链运动更加自由,能够有效地调节压敏胶的初黏和剥离^[12-13]。同时,压敏胶的玻璃化温度逐渐降低,分子链运动自由度增大,压敏胶能够更好地贴合于基材表面,初黏与剥离逐渐增大,但随着压敏胶 T_g 的逐渐降低,内聚力降低,持黏不断降低,压敏胶的界面破坏转变为内聚破坏。

3.3 增黏树脂用量对压敏胶黏接性能的影响

与压敏胶相容性好的增黏树脂能使胶体的储能膜量下降,起到“分子链润滑剂作用”,有效改善压敏胶的初黏和剥离^[14]。当增黏树脂含量较少时,其物理性能主要体现出丙烯酸酯共聚物性质,其作用类似于增塑剂^[15]。随着增黏树脂含量提升,黏度降低,而黏合力迅速增强;当含量增至某一特定水平时,黏合力将达到峰值,同时体系黏度达到最低点。超过这一数值,内聚能下降,黏合力也迅速下降^[16]。图 3 为氢化松香甘油酯增黏树脂用量(占总单体质量分数)对压敏胶黏接性能的影响。

由图 3 可知,随着增黏树脂含量增加,压敏胶的初黏和剥离均呈现先增大后减小的趋势,相应的持黏却逐渐下降。当增黏树脂质量分数为 6% 时,初黏和

剥离达到最大值, 初黏为 14# 钢球, 剥离强度为 35 N/25 mm, 持黏为 10 h。当继续增大增黏树脂用量时, 压敏胶的初黏、剥离和持黏均下降。由于氢化松香甘油酯与丙烯酸酯压敏胶的相容性较好, 随着增黏树脂用量增大, 压敏胶的流动性逐渐增大, 促进了分子链的运动, 降低了体系的内聚能, 明显提升了压敏胶的初黏和剥离; 然而, 随着增黏树脂用量的继续增大, 压敏胶的脆性增加, 反而不能有效地润湿基材, 导致初黏和剥离迅速下降。

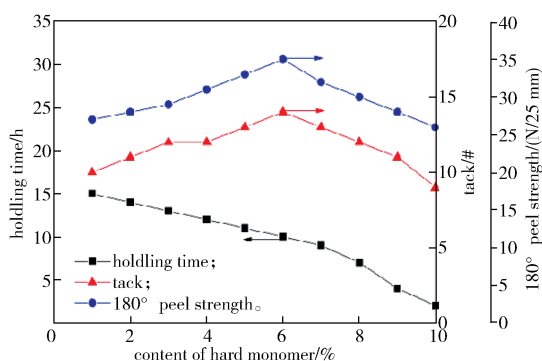


图 3 增黏树脂用量对压敏胶黏接性能的影响

Fig. 3 Effects of contents of tackifying resin on adhesive performance of PSA

3.4 交联剂用量对压敏胶黏接性能的影响

3.4.1 黏接性能分析

溶剂型压敏胶通常在涂布后发生交联构建交联网络, 其交联密度可通过交联剂的用量灵活调控。交联剂可以使压敏胶形成一个完善的交联网络, 获得良好的黏弹性, 最终表现出均衡的初黏力、剥离力与内聚力^[17-19]。本研究以乙酰丙酮铝为交联剂, 通过与丙烯酸的羧基发生金属配位 (交联反应示意图见图 4) 实现交联, 改善压敏胶的黏接性能^[20]。

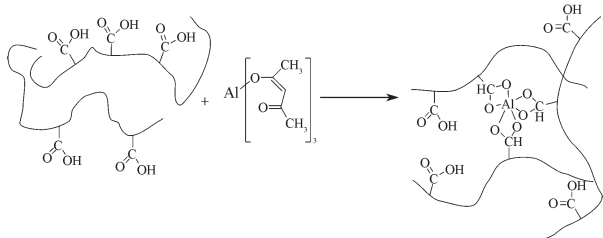


图 4 PSA 交联反应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of crosslinking reaction for PSA

为了探究交联剂用量对压敏胶黏接性能的影响, 本研究固定其它条件不变, 添加不同质量分数的乙酰丙酮铝 (总单体质量的 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%)

进行交联固化, 制成不同交联度的压敏胶 (PSA-C02、PSA-C04、PSA-C06、PSA-C08、PSA-C10), 其黏接性能如图 5 所示。

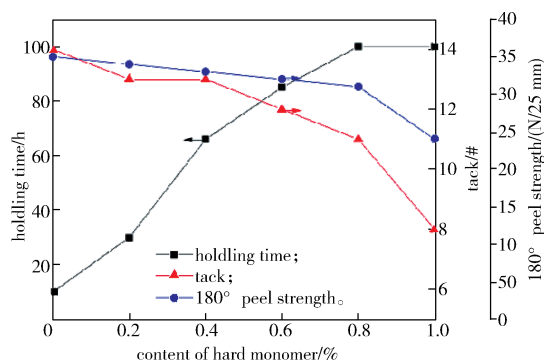


图 5 交联剂含量对压敏胶黏接性能的影响

Fig. 5 Effects of contents of curing agent on adhesive performance of PSA

由图 5 可知, 随着交联剂用量逐渐增大, 交联度增加, 压敏胶的初黏从 14# 钢球降到 8# 钢球, 剥离强度从 35 N/25 mm 降低到 24 N/25 mm, 持黏从 10 h 增加到 100 h。当乙酰丙酮铝质量分数为 0.8% 时, 压敏胶的综合性能最佳, 初黏为 11# 钢球, 剥离强度为 31 N/25 mm, 持黏超 100 h。当适量加入交联剂后, 交联形成的网状结构使压敏胶的分子链运动受限, 内聚增大, 压敏胶的持黏不断增大, 初黏和剥离不断降低, 故选择交联剂质量分数为 0.8% 最佳。

3.4.2 流变分析

通常用流变学分析压敏胶对施加的应力或变形的响应。压敏胶的黏弹性行为由储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 等参数来描述。压敏胶的弹性与 G' 相关, 流动性与 G'' 相关。本研究在恒定温度 (25 °C) 下, 探究不同交联度的压敏胶 PSA-C02、PSA-C04、PSA-C06、PSA-C08 的流变行为与其黏接性能之间的关系。

图 6 为不同交联度压敏胶的 G' 和 G'' 随频率变化曲线。由图可知, 随着频率增大, G' 及 G'' 同时增大。压敏胶的 G' 随着交联剂用量增大而增大, 且交联剂用量增大, 交联度增大, G' 曲线随频率增大而逐渐变缓。交联剂用量增大, 压敏胶形成交联网络结构, 分子量进一步增大, 储能模量变化趋势随着分子量的增大而逐渐变缓^[21]。大多数压敏胶流变曲线中 G' 值高于 G'' , 表明 PSA 在这些频率下主要具有弹性行为。高频区域 G' 较低的 PSA 具有较高的剪切性能, 易于剥离 (如 PSA-C02), 低频区域高

G' 的 PSA 具有良好的抗蠕变能力 (如 PSA-C06、PSA-C08)。高频脱黏区域 G'' 的高值与能量耗散的增加有关, 促进了压敏胶的黏附。此外, 图 6 上部实线表示达尔奎斯特准则, 该准则确定了 G' 的极限

为 3×10^5 Pa。 G' 的取值应低于这个值, 以确保 PSA 在短时间内可以黏合基底。由图可知, PSA-C02、PSA-C04、PSA-C06 和 PSA-C08 等样品均满足这一标准。

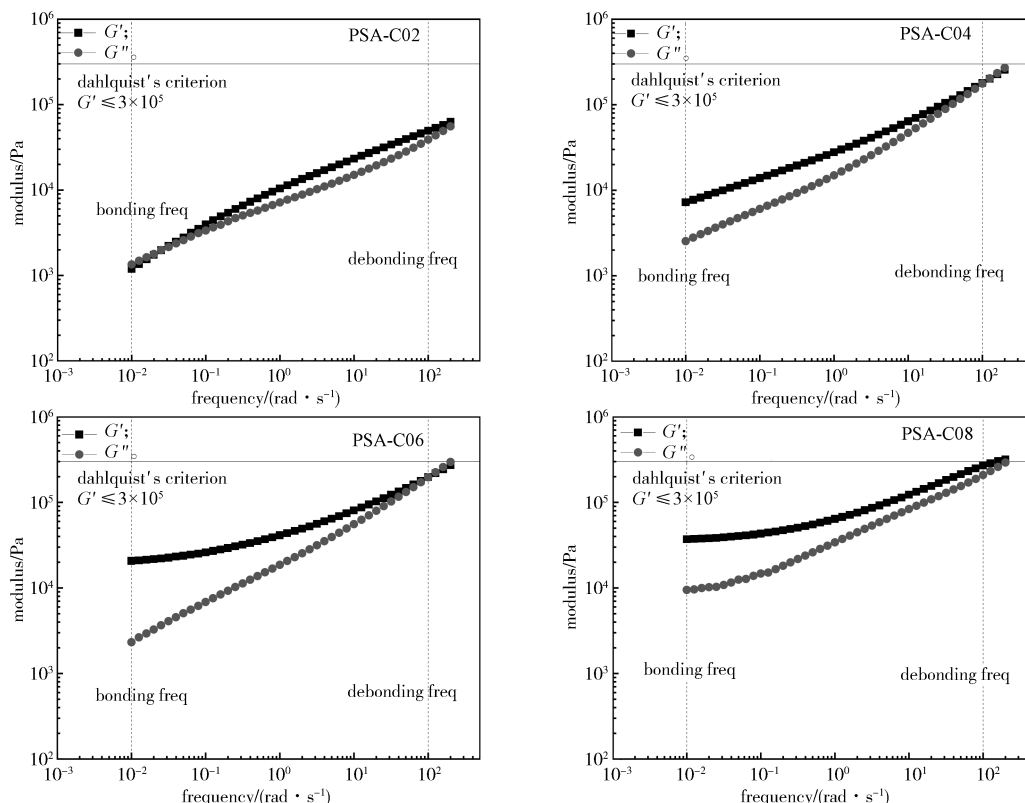


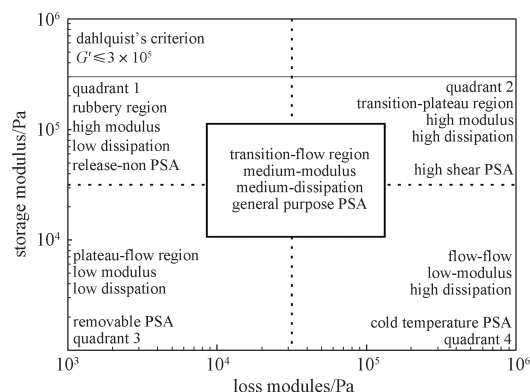
图 6 不同交联度压敏胶的 G' 和 G'' 与频率关系图

Fig. 6 G' and G'' of PSA with different crosslinking degrees at various frequency

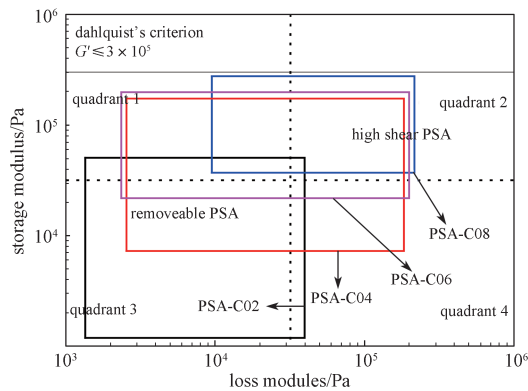
压敏胶的黏弹性还可以通过黏弹窗口来描述。以 0.01 rad/s 和 100 rad/s 频率下的 G' 和 G'' 值, 绘制了 4 坐标的黏弹窗口, 并通过其所在象限位置来判断应用范围, 结果如图 7a 所示。Quadrant1 (第一象限) 具有高 G' 低 G'' 特点, 常见于弹性体和涂层材料, 此象限材料具有高键合模量和高弹性性质, 流动受限。Quadrant2 (第二象限) 具有高 G' 高 G'' 特点, 常见于高黏接力和高剪切力的高性能压敏胶中。Quadrant3 (第三象限) 具有低 G' 低 G'' 特点, 常见于一些易移除压敏胶。Quadrant4 (第四象限) 具有低 G' 高 G'' 特点, 常见于快速黏接或耐低温的压敏胶, 允许材料在非常低的温度或很短的接触时间下也能黏附。

不同交联度的压敏胶 (PSA-C02~PSA-C08) 的黏弹性窗口如图 7b 所示。由图可知, 压敏胶 PSA-C02 的黏弹性窗口基本处于第三象限区域, 为

低剪切低黏接态, 属于易移除压敏胶。随着交联度的逐渐增大, 压敏胶内部逐渐形成交联网络, 压敏胶的内聚力逐渐增大, G' 和 G'' 逐渐增大, 最终 PSA-C08 大部分处于第二象限, 为高剪切高黏接态, 属于高性能压敏胶。



a) 黏弹性窗口模型



b) 不同交联度的压敏胶的黏弹性窗口

图 7 黏弹性窗口模型及不同交联度的压敏胶的黏弹性窗口

Fig. 7 Viscoelastic window model and viscoelastic window of PSA with different degrees of crosslinking

流变分析进一步验证了之前初黏、剥离和持黏等测试结果。即采用硬单体 AN 质量分数为 10%，软单体 (BA 与 2-EHA 质量比为 1:4) 质量分数为 80%，功能单体 AA 质量分数为 10%，合成的聚丙烯酸酯中加入总单体质量 6% 的增黏树脂 (氢化松香甘油酯) 和 0.8% 的交联剂 (乙酰丙酮铝) 制备的压敏胶黏接性能最佳，且黏弹性窗口处于第二象限，属于一种高剥离、高黏接的丙烯酸酯压敏胶。

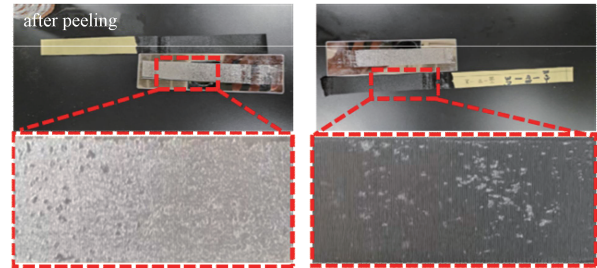
3.6 功能单体组成对压敏胶黏接性能的影响

3.6.1 功能单体为 AA 制成的压敏胶

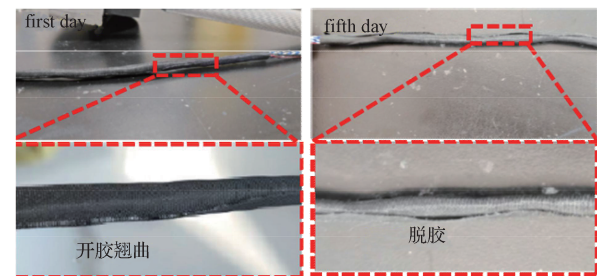
如前面所述，依据标准对功能单体为 AA 制成的丙烯酸酯压敏胶进行测试，得到的最佳测试结果为：初黏 11# 钢球，剥离 31 N/25 mm，持黏大于 100 h。由于标准中所用基材为 PET 薄膜，与本研究具体使用的基材黏接情况有所差别。故将压敏胶按规定厚度涂于胶带用的布基材料表面，烘干除去溶剂，制成布基线束胶带，并考察了胶带的剥离测试、残胶及包线开胶情况，结果如图 8 所示。

由图 8a 可知，以布基材料为基材时，布基线束胶带的剥离测试存在大量脱胶、残胶现象。由图 8b 可知，布基线束胶带在包线后的第 1 d 出现开胶翘曲现象，在第 5 d 出现脱胶现象。尽管功能单体为 AA 所制备压敏胶的初黏、剥离和持黏很高，但并不满足布基线束胶带的实际使用标准。因为常规的丙烯酸酯压敏胶膜表面能较高，应用于布基类的低表面能材料时会出现表面能不匹配的问题，即高表面能的压敏胶不易在低表面能的布基一侧铺展开来，使二者之间的有效接触面积较少，黏附性能低，在剥离测试时压敏

胶从布基胶带表面脱落，黏附于表面能高的钢板一侧，从而导致钢板表面出现残胶现象。实际生产应用时，布基线束胶带会出现开胶翘曲、脱胶，与布基材料黏接不牢固等问题。



a) 钢板测试



b) 包线测试

图 8 布基线束胶带的剥离及包线测试结果

Fig. 8 Peeling test and wire wrapped test results of cloth line tape

3.6.2 功能单体为 AA 和 LA 制成的压敏胶

丙烯酸酯聚合物分子链的烷基侧链越长，聚合物表面越疏水，表面能越低^[22]。因此，引入长侧链烷基的 LA，降低压敏胶膜的表面能。本研究在固定其它条件不变的情况下，在功能单体中引入疏水性的 LA 替换部分 AA 来制备压敏胶，并考察了 LA 质量分数 (单体总质量的 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%) 对压敏胶表面能、黏接强度、包线应用的影响。

图 9 为不同 LA 质量分数的压敏胶对水及二碘甲烷的接触角。由图可知，随着 LA 质量分数逐渐增大，丙烯酸压敏胶膜对水的接触角逐渐增大。这是由于 LA 侧链为长链烷基，具有一定的疏水性，LA 含量增大使压敏胶膜的疏水性增强。

根据杨氏方程可知，随着水接触角 (θ) 逐渐增大 ($89.46^\circ \sim 102.95^\circ$)， $\cos \theta$ 逐渐减小，液体表面能 (σ_l) 不变，则压敏胶膜的表面能 (σ_s) 逐渐降低^[23]。

$$\cos \theta = \frac{\sigma_s}{2\sigma_l} \quad (1)$$

利用实验测得的压敏胶膜的二碘甲烷及水接触

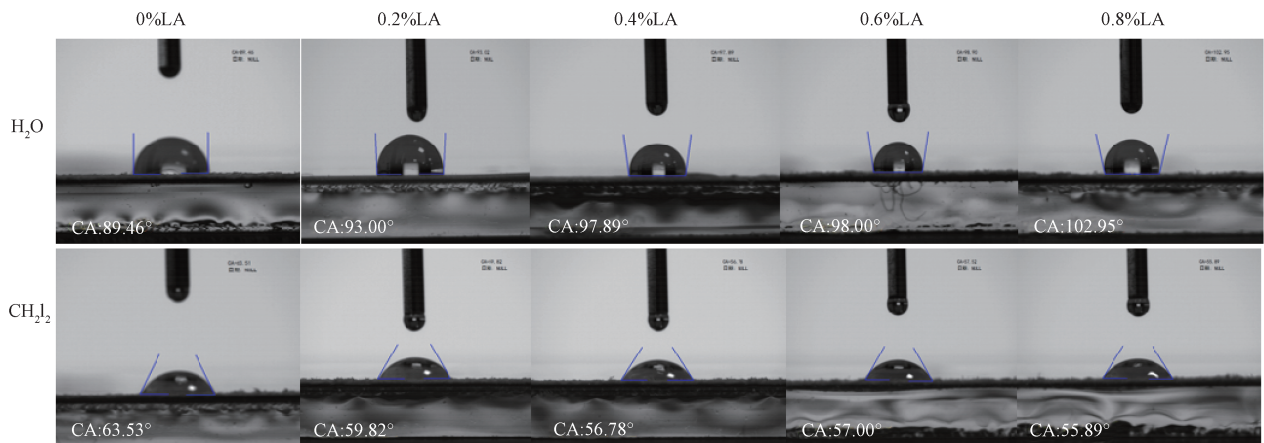


图9 LA 含量对压敏胶膜的水及二碘甲烷接触角的影响

Fig. 9 The water and methylene iodide contact angle for PSA with different contents of dodecyl acrylate

角, 通过接触角法计算压敏胶膜的表面能, 结果如图 10 所示。由图可知, 随着 LA 质量分数的增大, 压敏胶膜的表面能逐渐降低, 由未添加 LA 的 46 mJ/m² 降低到 33 mJ/m²。布基材料的表面能是 26 mJ/m² 左右, 添加 LA 可降低了压敏胶与布基材料的表面能差异, 从而增加了压敏胶的润湿性。

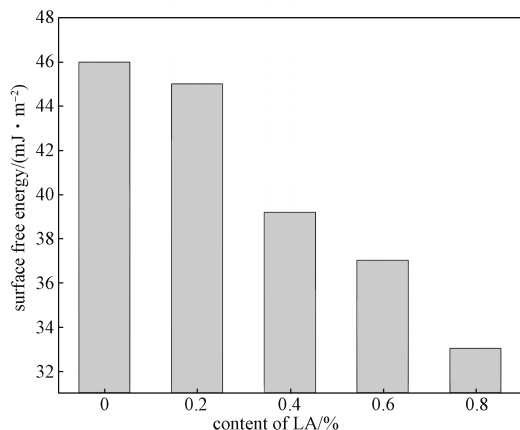


图 10 LA 用量对压敏胶膜表面能的影响

Fig. 10 The surface energy of PSA with different contents of LA

图 11 为 LA 用量对压敏胶黏接性能的影响。由图可知, 随着 LA 用量的增大, 压敏胶初黏从 11# 钢球降低至 9# 钢球, 剥离强度从 31 N/25 mm 降低至 28 N/25 mm, 但持黏均大于 100 h。这是因为 LA 的 T_g 较高, 随着 LA 含量的逐渐增大, 压敏胶的 T_g 增大, 分子链流动受限, 压敏胶的内聚力逐渐增大。当 LA 质量分数为 0.6% 时, 压敏胶的综合性能最佳, 初黏为 10# 钢球, 剥离强度为

30 N/25 mm, 持黏大于 100 h。

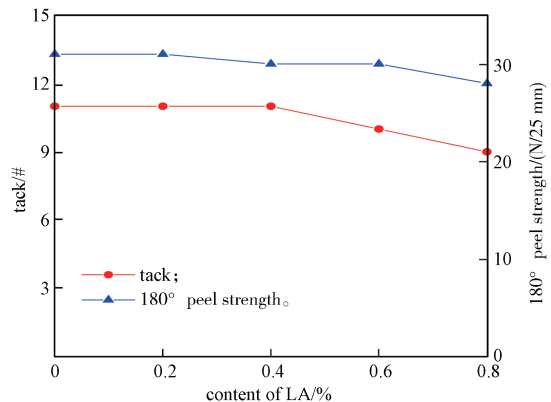
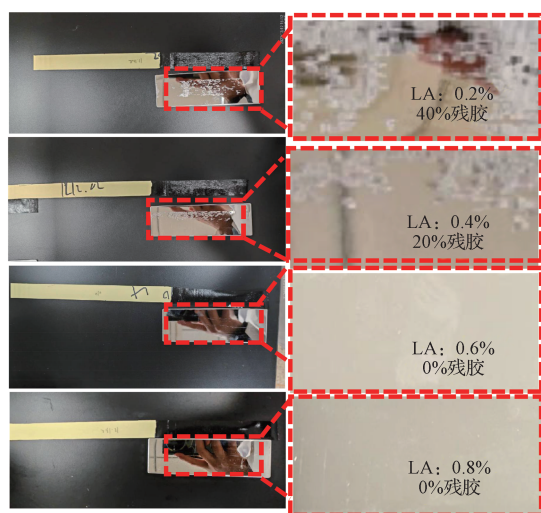


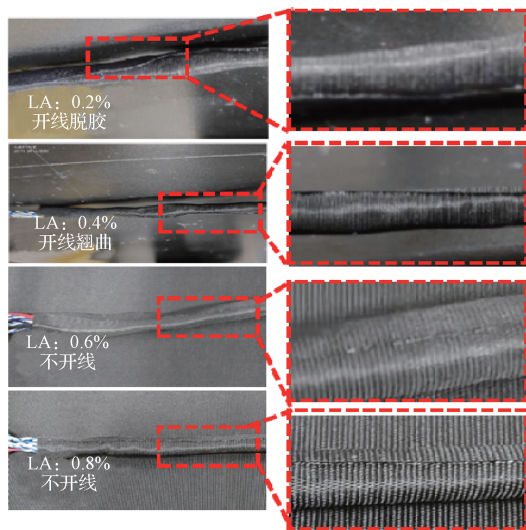
图 11 LA 用量对压敏胶黏接性能的影响

Fig. 11 Effects of contents of LA on adhesive performance of PSA

图 12 为添加 LA 后布基丙烯酸酯压敏胶带的剥离测试及包线黏接情况。由图可知, 在剥离测试中, 随着 LA 用量逐渐增大, 钢板残胶情况有明显好转, 从 0.2%LA 时有 40% 左右的残胶, 降低至 0.6%LA 时的无残胶、无暗影。同时, 包线测试中, 随着 LA 用量逐渐增大, 包线性能逐渐提升, 从 0.2%LA 时的开线脱胶, 降低至 0.6%LA 时的不开线。这是因为 LA 的长烷基侧链具有良好的疏水性, 能有效降低压敏胶的表面能。随着 LA 质量分数逐渐增大, 长侧链烷基在压敏胶表面含量逐渐提高, 使压敏胶表面能逐渐降低, 其在低表面能的布基材料上具有更好的润湿性, 能更快铺展开来, 从而使得丙烯酸酯压敏胶与布基材料黏合面积更大, 黏合更加牢靠, 改善了压敏胶的残胶和开胶情况。



a) 钢板剥离测试



b) 包线测试

图 12 LA 用量对布基线束胶带的剥离及包线测试影响
Fig. 12 Effects of contents of LA dosage on peeling test and wire wrapped test of cloth line tape

4 结论

本研究以 AN 为硬单体、BA 和 2-EHA 为软单体、AA 和 LA 为功能单体、氢化松香树脂甘油酯为增黏树脂、乙酰丙酮铝为交联剂，采用先聚合软单体，后滴加硬单体和功能单体的加料方式，制备出了一款高初黏、高剥离、高持黏的丙烯酸酯压敏胶。当硬单体 AN 质量分数为 10%、软单体（BA 与 2-EHA 质量比为 1:4）质量分数为 80%、功能单体 AA 和 LA 质量分数分别为 9.4% 和 0.6%，氢化松香树脂与乙酰丙酮铝用量分别为压敏胶单体总质量的 6% 和 0.8% 时，所制备的丙烯酸酯压敏胶的初黏为 10# 钢球，剥离强

度为 30 N/25 mm，持黏大于 100 h，该压敏胶能有效解决布基线束胶带包线开胶、剥离残胶的问题。

参考文献:

- [1] TAGHIPOUR E, VEMULA S S, GARGESH K, et al. Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of Electrical Wire Harnesses: High Fidelity and Reduced-Order Models[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 165: 105188.
- [2] SATO E, YAMANISHI K, INUI T, et al. Acetal-Protected Acrylic Copolymers for Dismantlable Adhesives with Spontaneous and Complete Removability[J]. Polymer, 2015, 64: 260-267.
- [3] 皮俊轲, 范鑫, 赵辉, 等. 丙烯酸酯嵌段共聚物胶乳赋能高端压敏胶“油改水”[J]. 中国胶粘剂, 2024, 33(6): 41-48.
- [4] 吴汝林, 元帅. 丙烯酸酯系水溶性压敏胶的制备及性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2009, 18(1): 35-39.
- [5] PINENQ P, WINNIK M A, ERNST B, et al. Polymer Diffusion and Mechanical Properties of Films Prepared from Crosslinked Latex Particles[J]. Journal of Coatings Technology, 2000, 72(903): 45-61.
- [6] BROWN K, HOOKER J C, CRETON C. Micromechanisms of Tack of Soft Adhesives Based on Styrenic Block Copolymers[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2002, 287(3): 163.
- [7] BENEDEK I, HEYMANS L J. Pressure-Sensitive Adhesives Technology[M]. New York: Springer Press, 1997: 35.
- [8] 李铭杰, 李健雄. 保护膜用高初粘低剥离力丙烯酸酯压敏胶的研制[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(6): 38-42.
- [9] 何伍南, 邹发泽, 谭征兵. 塑胶用高硬度高光泽热塑性丙烯酸树脂的研究[J]. 涂料工业, 2018, 48(2): 57-63.
- [10] 张晓勇, 贺金梅, 岳利培, 等. N-乙烯基吡啶改性丙烯酸酯耐高温压敏胶的制备及其性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(1): 7-11.
- [11] RYU C M, PANG B L, KIM H I, et al. Effect of Side Chain on Wettability and Adhesion Performance of Acrylic Pressure-Sensitive Adhesives on Thin Silicon Wafer[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(10): 1136-1145.
- [12] JUNG J, CHO H J, KIM D, et al. Degradable Natural Lacquer (Urushi) Adhesives Using a Reversible Polymer Based on Hemiaminal Dynamic Covalent Networks[J]. Chemistry Select, 2018, 3(23): 6665-6670.
- [13] YADAV H O, KUO A T, URATA S, et al.

- Effects of Packing Density and Chain Length on the Surface Hydrophobicity of Thin Films Composed of Perfluoroalkyl Acrylate Chains: A Molecular Dynamics Study[J]. *Langmuir*, 2019, 35(44): 14316–14323.
- [14] 姚婧娴, 张群朝, 蒋涛. 热塑性水胶体压敏胶力学性能与流变性能研究[J]. *胶体与聚合物*, 2015, 33(2): 65–67.
- [15] 王雪荣, 焦剑, 黄旭东, 等. 增粘树脂在丙烯酸酯乳液胶粘剂中的共聚改性研究[J]. *中国胶粘剂*, 2006, 15(7): 13–16.
- [16] 吴文莉. 增粘树脂对丙烯酸酯压敏胶性能的影响[J]. *广西化工*, 2001, 30(3): 25–27.
- [17] 梁俊, 唐晓林, 李典, 等. 耐高温聚丙烯酸酯压敏胶的合成与研究[J]. *中国胶粘剂*, 2021, 30(1): 18–23.
- [18] 王贝贝, 曹盛, 崔傲, 等. 丙烯酸酯压敏胶的制备及性能研究[J]. *中国胶粘剂*, 2023, 32(10): 48–52.
- [19] 罗衍慧. 可移除耐高温丙烯酸酯压敏胶的制备及性能研究[J]. *中国胶粘剂*, 2022, 31(7): 52–55.
- [20] XUY C, HUANG X X, ZHANG Y, et al. A High Bonding Performance and Antibacterial Soybean Meal Adhesive with Maillard Reaction Based Cross-Linked Structure[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 227: 109403.
- [21] 王浩南. 公斤级生物基聚对苯二甲酸丙二醇酯及其共聚酯的性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [22] YANG B W, LI X Y, LU P, et al. Design and Synthesis of Low Surface Energy Anhydride-Based Polyacrylic Resin[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 175: 107353.
- [23] 刘永明, 施建宇, 鹿芹芹, 等. 基于杨氏方程的固体表面能计算研究进展[J]. *材料导报*, 2013, 27(11): 123–129.

(责任编辑: 李玉华)

Preparation of High Performance Acrylic Pressure Sensitive Adhesive for Cloth Line Tape

LI Ruichao^{1,2}, TONG Yun^{1,2}, WANG Yaquan¹, NI Huagang²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Cloth line tape is widely used in automobile and electronics industries, but there are common problems in the application of domestic cloth line tape, such as adhesive failure, wire exposure, and residual glue stripping. Polyacrylate was prepared by solution free radical polymerization with acrylonitrile(AN) as the hard monomer, butyl acrylate(BA) and isooctyl acrylate (2-EHA) as the soft monomers, acrylic acid(AA) and dodecyl acrylate(LA) as functional monomers, ethyl acetate as the solvent, and benzoyl peroxide (BPO) as the initiator. Then the adhesive resin (hydrogenated rosin glyceride) and crosslinking agent (aluminum acetyl acetone) were added to form a high-performance acrylic pressure-sensitive adhesive. The adhesive strength and surface energy of the pressure sensitive adhesive were regulated by designing the molecular chain of polyacrylate and changing the composition of the formula. The relationship between the molecular structure of polymer and the adhesive properties, surface energy and application properties of pressure sensitive adhesives were researched by rheology and contact angle test. The results showed that when the mass fraction of hard monomer AN was 10%, the mass fraction of soft monomer (mass ratio of BA and 2-EHA was 1:4) was 80%, the mass fraction of functional monomer AA and LA was 9.4% and 0.6%, and the amount of hydrogenated rosin and aluminum acetylacetone was 6% and 0.8% of the total monomer mass, respectively, the acrylic pressure sensitive adhesive had an initial adhesion of 10# steel ball, a 180° peeling strength of 30 N/25 mm, and a holding adhesion of more than 100 hours. The pressure sensitive adhesive can effectively solve the problems of untaping and peeling residual glue from the baseline tape.

Keywords: cloth line tape; polyacrylate; pressure-sensitive adhesives; molecular chain structure; surface energy