

## 有机化高岭土/聚异丁烯热熔压敏胶的制备及性能

彭星<sup>1</sup>, 王瑜<sup>1</sup>, 陈慧<sup>2</sup>, 应杰<sup>1</sup>, 汪济奎<sup>1</sup>

(1. 华东理工大学材料科学与工程学院, 超细材料制备和应用重点实验室, 上海 200237; 2. 浙江固特热熔胶有限公司, 浙江 桐乡 314512)

**摘要:** 将聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 接枝到高岭土 (Kaolin) 表面, 然后利用二甲基亚砷 (DMSO) 插入接枝高岭土片层间, 制备了聚二甲基硅氧烷接枝插层型高岭土 (PDMS-Kaolin)。通过红外光谱、X射线衍射分析、表面水接触角测试及热重分析表征了高岭土的有机化改性效果。以PDMS-Kaolin为填料与聚异丁烯 (PIB) 经转矩流变仪制得PDMS-Kaolin/PIB热熔压敏胶, 并探究了PDMS-Kaolin质量分数对PIB热熔压敏胶结构稳定性、黏接性能和热性能的影响。结果表明: 与纯PIB热熔压敏胶相比, PDMS-Kaolin/PIB热熔压敏胶中PDMS-Kaolin质量分数大于0.5 %时, 其结构稳定性、180°剥离强度和热性能都会随质量分数的增大而提升, 其中剥离强度在质量分数为1 %时达到最大值0.659 N/mm, 较纯的PIB热熔压敏胶提高了11 %, 继续增大质量分数剥离强度会出现急剧下降, 当增至2 %时, 剥离强度降至最低而体系的热性能达到最佳。

**关键词:** 高岭土; 聚异丁烯; 热熔压敏胶; 黏接性能; 稳定性

**中图分类号:** TQ436.3

**文献标志码:** A

## Preparation and Properties of Organic Kaolin/Polyisobutene Hot Melt Pressure-Sensitive Adhesive

PENG Xing<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, YING Jie<sup>1</sup>, WANG Ji-kui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Preparation and Application of Ultrafine Materials of Ministry of Education, School of Material Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Zhejiang Good Adhesive Co., LTD, Tongxiang 314512, Zhejiang, China)

**Abstract:** As a kind of base polymer, polyisobutene (PIB) has many merits such as excellent oxidation resistance, good chemical stability and very low moisture permeability. However, the system of PIB is easy to creep, which limits its application in hot melt pressure-sensitive adhesives (HMPSAs). In this study, the structure stability, adhesion property and thermal performance of PIB HMPSA were successfully improved by introducing organic

收稿日期: 2018-03-28

作者简介: 彭星 (1993-), 男, 湖南双峰人, 硕士生, 主要研究方向为热熔压敏胶黏剂。E-mail: pengxing93@163.com

通信联系人: 汪济奎, E-mail: wang326@ecust.edu.cn

modified kaolin. Polydimethylsiloxane (PDMS)-Kaolin was obtained by grafting PDMS onto the surface of kaolin and using dimethyl sulfoxide (DMSO) for intercalating into the layers of grafted kaolin. The effect of organic modification process was characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), water contact angle measurement and Thermogravimetry (TG). The results of FTIR and TG manifested that PDMS molecular chains were grafted onto the surface of kaolin, besides, the XRD result showed that the interlayer spacing of kaolin was expanded from 0.7 nm to 1.1 nm which indicated DMSO molecular chains were intercalated into the galleries of kaolin and hydrogen bonds between the layers of kaolin were broken. After the modification process, the water contact angle of kaolin was increased from  $10^{\circ}$  to  $114^{\circ}$ , which demonstrated that the hydrophobicity of kaolin was increased significantly. PDMS-Kaolin/PIB HMPSAs were prepared by incorporating PDMS-Kaolin into PIB matrix using torque rheometer. The influences of PDMS-Kaolin mass fraction on properties of PIB HMPSA were investigated. Results showed that the structure stability, adhesion performance and thermal property of PIB HMPSA could be enhanced when the mass fraction of PDMS-Kaolin was above 0.5 %, adhesion performance reached maximum when the mass fraction was 1 % (The peak value of  $180^{\circ}$  peel strength was 0.659 N/mm) which was 11 % higher than that of pure PIB HMPSA. Continue adding PDMS-Kaolin, the peel strength of PDMS-Kaolin/PIB HMPSAs would decline sharply, when the mass fraction was 2 %, the peel strength declined to the minimum and the thermal stability achieved maximum.

**Key words:** kaolin; polyisobutene; hot melt pressure-sensitive adhesives; adhesion property; stability

热熔压敏胶是不含水或溶剂的一类环保型胶黏剂, 在室温下具有明显且持久的初黏力, 同时只需施加轻微的压力 ( $1\sim 10\text{ Pa}$ ), 几秒内即可牢固黏接到各种表面<sup>[1-2]</sup>。聚异丁烯 (PIB) 用作热熔压敏胶的基体聚合物具有耐老化性好、水汽渗透率低、化学稳定性优良等诸多优点<sup>[2-3]</sup>, 然而 PIB 体系压敏胶和其他非交联型压敏胶一样<sup>[4]</sup>, 内聚强度低、易蠕变的特性大大限制了其应用。

Antonov 等<sup>[5-6]</sup>将埃洛石引入 PIB 中, 并使用热熔混合技术制备得到了埃洛石/PIB 热熔压敏胶, 他们证实 PIB 基体中形成了三维立体的埃洛石网络, 埃洛石的加入能够明显增加压敏胶的持黏时间。Brantseva 等<sup>[7]</sup>证实 PIB 分子吸附在黏土表面形成弹性网络贯穿由黏土颗粒形成的三维刚性网络具有很多优点, 他们使用未改性蒙脱土和有机改性蒙脱土, 结果表明 PIB 分子有一部分插入到了有机改性蒙脱土片层间, PIB 体系的储能模量明显增大, 持黏时间大幅延长 (3到4个数量级), 而未改性蒙脱土在 PIB 基体中形成刚性团聚体, 并且 PIB 分子不会插入其片层间, 无法体现黏土对 PIB 体系的改善效果。

目前关于黏土在压敏胶中的应用研究主要集中于埃洛石、蒙脱土等<sup>[8]</sup>, 而对于高岭土在非交联体系热熔压敏胶中的应用研究还很少见。本文通过在高岭土片层表面接枝聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 并且

利用二甲基亚砷(DMSO)插入高岭土片层间, 制备得到了有机化改性高岭土(PDMS-Kaolin)。然后以PDMS-Kaolin为填料, 与PIB经转矩流变仪制得PDMS-Kaolin/PIB热熔压敏胶, 并从流变性能、黏接性能及热性能等方面考察了PDMS-Kaolin质量分数对PIB热熔压敏胶性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和试剂

高岭土(Kaolin): 6.5  $\mu\text{m}$ , 广州宏图矿业科技有限公司; 环氧基封端聚二甲基硅氧烷(PDMS): 数均分子量为  $2.0 \times 10^3$ , 安徽艾约塔硅油有限公司; 甲苯、二甲基亚砷(DMSO)、无水乙醇: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; PIB( $M_n=1.2 \times 10^5$ ): 牌号 Oppanol B50, 巴斯夫(中国)有限公司; PIB( $M_n=1.3 \times 10^3$ ): 牌号 PB1300, 韩国大林有限公司; C5 石油树脂: 牌号 SH1304, 中石油兰州石化公司树脂厂。

### 1.2 测试与表征

傅里叶变换红外光谱仪: 美国热电公司 Nicolet 6700 型, 扫描范围为  $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ , KBr 粉末压片制样; X 射线衍射分析仪: 日本 Rigaku 公司 D/MAX2550V 型, Cu-Ka 辐射源, 铜靶 18 kW、40 kV, 扫描速率为  $3^\circ/\text{min}$ , 扫描范围为  $2^\circ \sim 80^\circ$ ; 接触角测量仪: 上海中晨数字技术设备有限公司 JC2000D2 型, 将高岭土和 PDMS-Kaolin 粉末压片后, 以去离子水作为表面接触角测试介质, 进行样品表面接触角测试; 热重分析仪: 德国 NETZSCH 仪器制造有限公司 STA409PC 型, 氮气氛围, 升温速率为  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , 在  $20 \sim 800^\circ\text{C}$  对高岭土和 PDMS-Kaolin 粉末样品进行测试, 在  $80 \sim 600^\circ\text{C}$  对热熔压敏胶样品进行测试; 倒置生物显微镜: 上海光学仪器一厂 37XF 型, 将热熔压敏胶样品涂覆于载玻片上, 胶膜厚度约 0.2 mm, 将载玻片置于载物台上观察; 转矩流变仪: 美国 Thermo Hakke 公司 RS600 型, 使用平行板夹具(平行板直径为 20 mm), 测试模式选择动态频率扫描模式, 应变  $\gamma=0.1\%$ , 测试温度为  $25^\circ\text{C}$ , 频率变化范围为 0.01-100 Hz; 万能拉力试验机: 深圳市新三思材料测试有限公司 2kW/CMT 2203 型, 参照 GB/T 2790—1995 标准测试热熔压敏胶样品的  $180^\circ$  剥离强度。

### 1.3 样品的制备

**1.3.1 PDMS-Kaolin 的制备** 第一步: 将 45 g 高岭土和 150 mL 的 PDMS 倒入 250 mL 的圆底烧瓶中, 加入 0.045 g 氯化亚锡作为催化剂。将圆底烧瓶置于  $110^\circ\text{C}$  油浴锅中, 利用电动搅拌器机械搅拌反应物 4 h 后停止反应。然后往圆底烧瓶中加入适量甲苯溶剂(加入的甲苯液面高于反应物), 震荡摇匀, 在通风橱内静置 6 h 使反应残留的 PDMS 充分溶解于甲苯中。之后再真空抽滤圆底烧瓶内的溶液, 并用无水乙醇洗涤 5 次, 在  $80^\circ\text{C}$  烘箱中烘 24 h, 最后研磨得到白色粉末。

第二步: 取得到的白色粉末 35 g 倒入 250 mL 圆底烧瓶中, 同时添加 350 mL 的 DMSO 和 35 mL 的去离子水, 将烧瓶置于  $60^\circ\text{C}$  超声恒温水浴槽内, 在超声的同时机械搅拌反应物 4 h 后停止反应。随后将烧瓶

内溶液进行真空抽滤，并用去离子水洗涤 5 次，在 80 °C 烘箱中烘 24 h，烘干后研磨，最终制备得到 PDMS-Kaolin 粉末。

**1.3.2 PDMS-Kaolin/PIB 热熔压敏胶的制备** 哈克转矩流变仪密炼腔温度稳定在 140 °C 后，启动转子（选用 Roller 转子），转速为 60 r/min。随后将作为基体聚合物的 Oppanol B50、作为增塑剂和增黏剂的 PB1300、增黏树脂 C5 及 PDMS-Kaolin 一同加入到密炼腔中，原料总重量为 50 g，其中  $m(\text{Oppanol B50}):m(\text{PB1300}):m(\text{C5})=1:4:5$ ，PDMS-Kaolin 的质量分数分别为 0、0.5、1、1.5 和 2 %。密炼 50 min 后分别制得 5 组热熔压敏胶样品，依据 PDMS-Kaolin 质量分数的不同将样品分别命名为 K0、K0.5、K1、K1.5 和 K2。

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机化改性对高岭土的影响

图 1 所示为高岭土有机化改性机理。首先通过 PDMS 的端基环氧基团与高岭土片层表面的羟基反应，使 PDMS 接枝到片层表面以降低高岭土的亲水性；然后利用小分子 DMSO 插入层间，破坏层间氢键以减弱片层之间的相互作用，增大层间距。

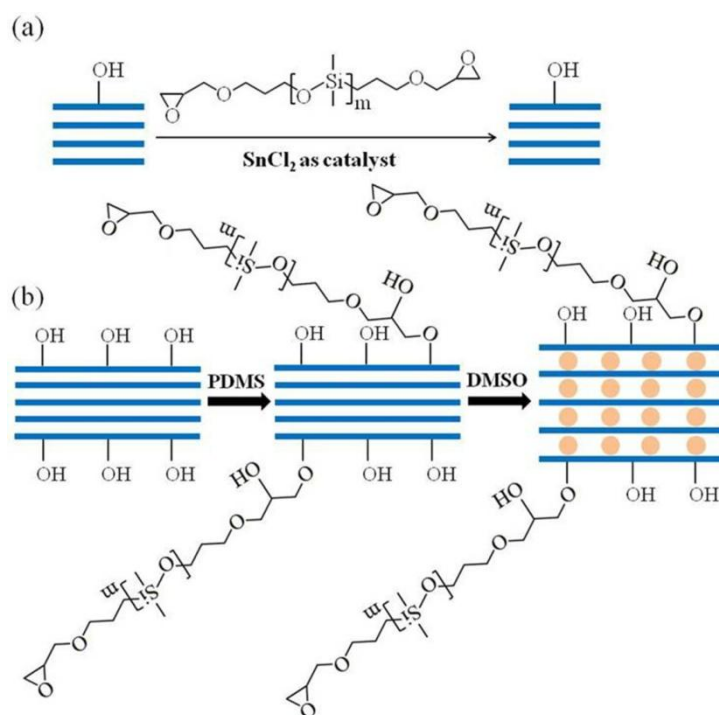


图 1 高岭土有机化改性机理图：（a）表面接枝改性过程；（b）有机化改性过程

Fig. 1 Schematic diagram of organic modification of Kaolin: (a) Surface grafted modification process; (b)

Organic modification process

如图 2 所示为 Kaolin 和 PDMS-Kaolin 的 FT-IR 光谱。可以看到，PDMS-Kaolin 的红外吸收谱线分别在  $2963\text{ cm}^{-1}$  和  $1262\text{ cm}^{-1}$  两处出现了 2 个新的吸收峰。 $2963\text{ cm}^{-1}$  处是  $-\text{CH}_3$  中 C—H 键的不对称伸缩振动吸

收峰<sup>[9]</sup>,  $1\,262\text{ cm}^{-1}$  处是  $\text{Si}-\text{CH}_3$  的特征吸收峰<sup>[10-12]</sup>, 说明 PDMS 成功接枝到了高岭土片层表面。

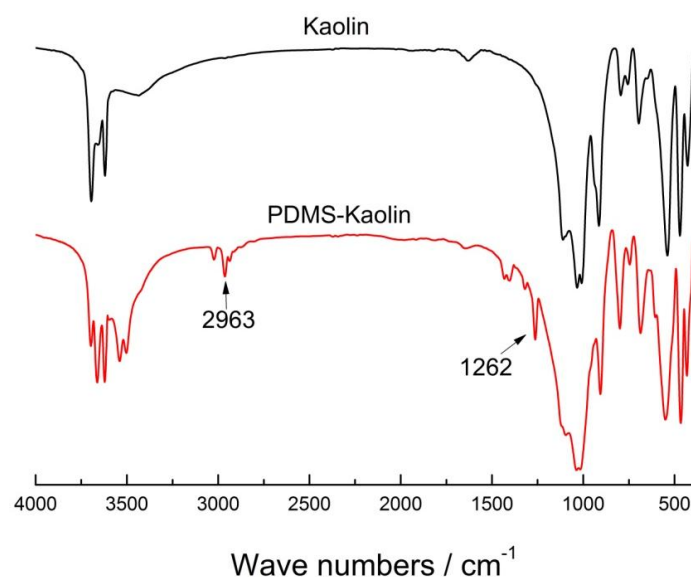


图 2 改性前后高岭土的 FT-IR 谱图

Fig. 2 FT-IR spectra of natural and modified kaolin

图 3 为 Kaolin 和 PDMS-Kaolin 的 XRD 图谱。可以看到高岭土经 DMSO 插层后, (001) 晶面衍射峰明显左移。插层改性后高岭土的 (001) 晶面  $2\theta$  衍射角由  $12.3^\circ$  变成了  $8.0^\circ$ ; 依据布拉格方程式  $2d\sin\theta=n\lambda$  (其中  $d$  代表层间距,  $\theta$  代表入射角,  $\lambda$  代表入射 X 射线波长,  $n$  是衍射级数) 计算出层间距从  $0.7\text{ nm}$  增大到了  $1.1\text{ nm}$ , 由于插层剂 DMSO 是小分子, 高岭土层间距扩大得不多, 但也充分说明了 DMSO 分子进入到了高岭土片层间, 破坏了高岭土层间的氢键连接。

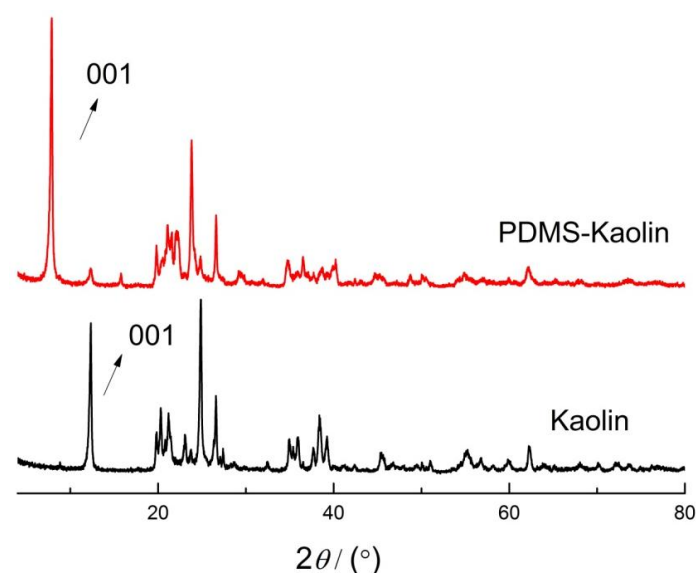


图 3 改性前后高岭土的 XRD 谱图

Fig. 3 XRD curves of natural and modified kaolin

图 4 为 Kaolin 和 PDMS-Kaolin 粉末压片后测得的水接触角测试图。PDMS-Kaolin 的接触角明显增大,

从原来的  $10^\circ$  增大到了  $114^\circ$ ；从宏观上说明 PDMS 成功接枝到了高岭土表面，表面接枝 PDMS 并经由 DMSO 插层的高岭土的有机化效果显著。

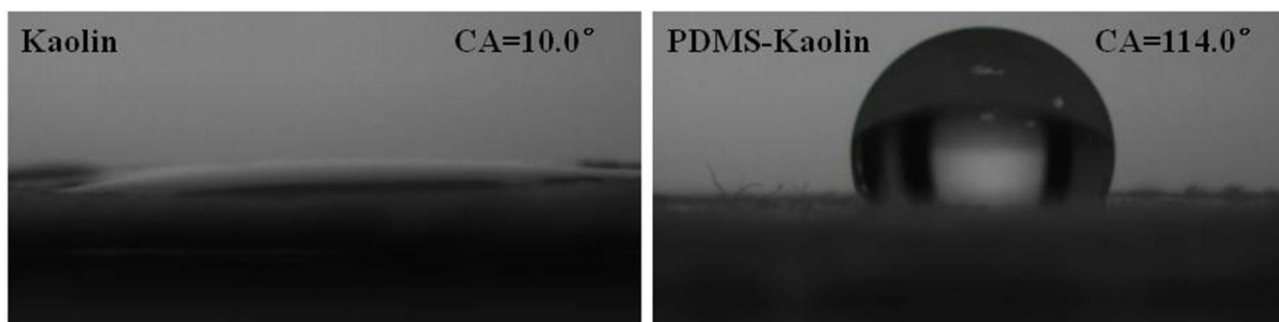


图 4 改性前后高岭土的表面水接触角

Fig. 4 Water contact angles on the surfaces of natural and modified clay

图 5 为高岭土有机化改性前后的热重分析曲线。Kaolin 只在  $450\sim 600^\circ\text{C}$  范围内出现 1 个热失重台阶，因为在这一阶段高岭土片层脱羟基，生成了偏高岭土结构。PDMS-Kaolin 的曲线出现了 3 个热失重台阶，第 1 台阶位于  $140\sim 220^\circ\text{C}$ ，在这一阶段高岭土片层间的 DMSO 脱嵌分解<sup>[13,14]</sup>；在  $260\sim 310^\circ\text{C}$  内出现了第 2 台阶，这是因为高岭土片层表面接枝的 PDMS 发生降解<sup>[15]</sup>；第 3 台阶在  $480\sim 600^\circ\text{C}$ ，这是由于高岭土片层表面脱掉了羟基。结果说明 PDMS 成功接枝到了 Kaolin 片层表面，另外，PDMS-Kaolin/PIB 热熔压敏胶样品的加工制备温度为  $140^\circ\text{C}$ ，因此 PDMS-Kaolin 能在热熔压敏胶加工过程中稳定存在。

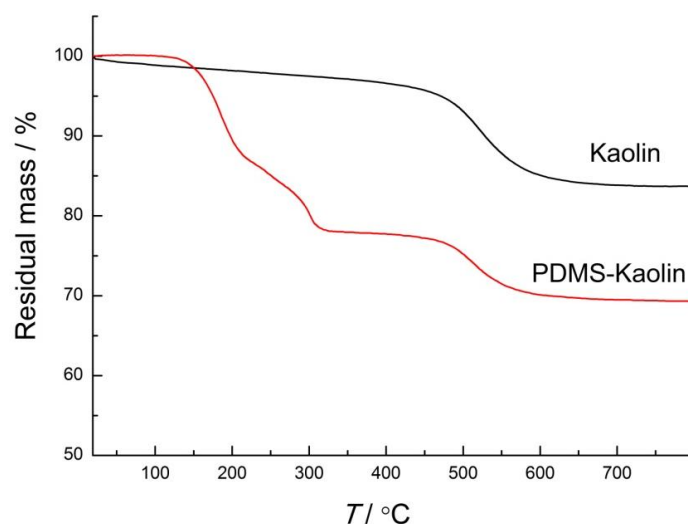


图 5 改性前后高岭土的热重分析曲线

Fig. 5 TG curves of natural and modified kaolin

## 2.2 PDMS-Kaolin在PIB基体中的分散状况

图 6 为热熔压敏胶样品的光学显微镜照片。如图所示，K0.5 和 K1 中的高岭土颗粒小、分散均匀，而 K1.5 和 K2 中的高岭土颗粒则明显出现严重的团聚现象，存在大块的团聚体。这是因为分散在基体中的

PDMS-Kaolin 片层具有较高的表面能, 分散密度过大会致使片层之间相互吸引形成大颗粒团聚体以降低表面能, 达到稳定状态。

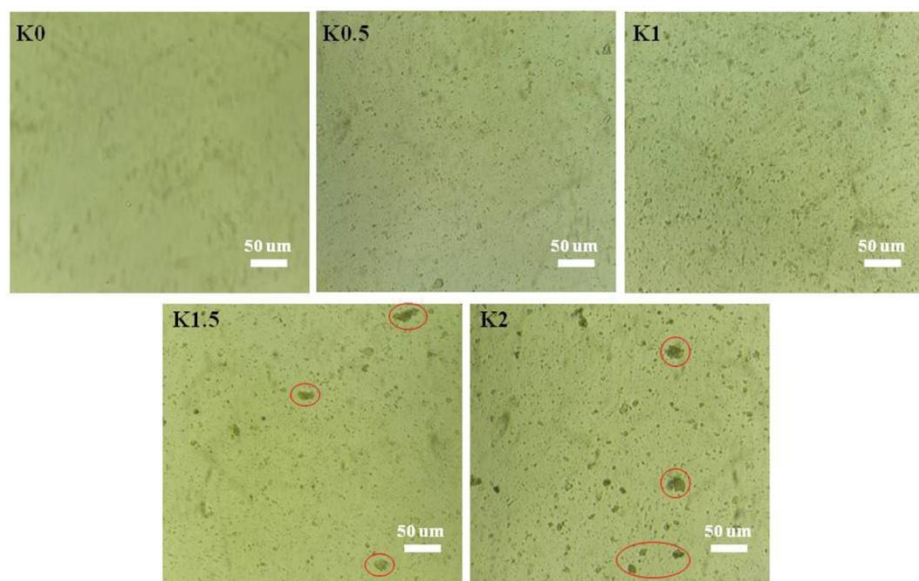


图 6 热熔压敏胶样品的光学显微镜照片

Fig. 6 Optical microscope images of hot melt pressure-sensitive adhesives

### 2.3 PDMS-Kaolin/PIB 热熔压敏胶的流变性能

图 7 为热熔压敏胶储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ ) 的动态频率扫描曲线。在低角频率区域, 5 组样品的  $G'$  和  $G''$  均随着角频率的增大而升高。 $G'$  的升高是因为样品受到的剪切力作用时间越来越短且方向变化越来越快, 基体 PIB 分子来不及变形而变得僵硬;  $G''$  的升高则是由于基体 PIB 在单位时间内随着角频率的增大, 往复应变次数增多, PIB 分子链段回缩和伸展的频率更快, 同时链段之间摩擦的次数也增加, 进而导致单位时间消耗的功增大。另外, K1、K1.5、K2 样品在低角频率区的  $G'$  与 K0 相比稍有降低, 这是因为接枝了 PDMS 的高岭土片层表面与基体 PIB 分子之间存在相互作用, 片层表面吸附有 PIB 分子链, 高岭土片层在剪切力作用下容易取向, 从而 PIB 中会形成局部有序结构, 分子链运动阻力相对 K0 更小, 使得  $G'$  下降, 这预示着样品能更好地润湿表面, 有利于改善 PIB 热熔压敏胶的初黏性。但是样品 K0.5 的  $G'$  与 K0 几乎一致, 说明 PDMS-Kaolin 添加量太少对 PIB 体系的影响很弱。对比图 7 (a) 和 7 (b) 还可以看到, 低角频率区内 5 组样品的  $G''$  值都要高于  $G'$ , 这说明热熔压敏胶基体的黏性响应要大于弹性响应, 即样品在低角频率区, 黏性行为占据主导。



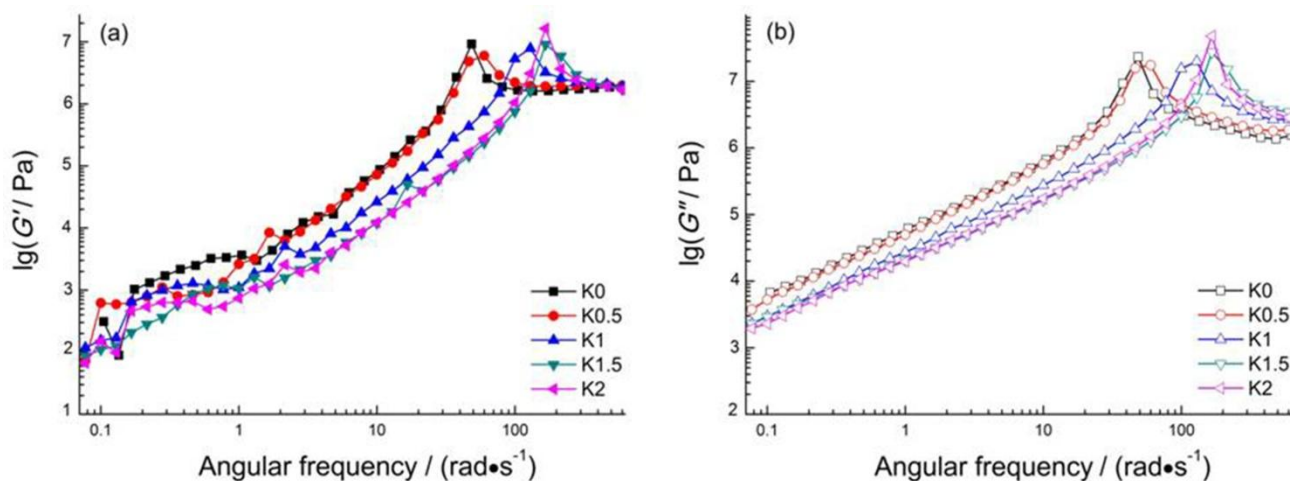


图 7 热熔压敏胶样品的储能模量 ( $G'$ ) (a) 和损耗模量 ( $G''$ ) (b) 的动态频率扫描曲线

Fig. 7 Dynamic frequency curves of storage modulus ( $G'$ ) (a) and loss modulus ( $G''$ ) (b) of hot melt pressure-sensitive adhesives

图 8 为室温下动态频率扫描模式测得的热熔压敏胶样品复数黏度 ( $\eta^*$ ) 随角频率变化的曲线。 $\eta^*$  是聚合物对动态剪切过程总阻抗的量度, 其实数部分称为动态黏度, 反映物质的黏性行为, 虚数部分反映物质的弹性行为。引入 PDMS-Kaolin 之后, 热熔压敏胶的  $\eta^*$  有所下降。这是由于接枝了 PDMS 的插层高岭土片层疏水性提高, 与 PIB 分子链间相互作用良好, 由于高岭土片层在剪切力作用下的取向, PIB 内形成了局部有序结构, PIB 分子链运动的阻力相对样品 K0 有所降低, 样品  $\eta^*$  下降。在低角频率区域随着角频率的增大,  $\eta^*$  基本保持稳定,  $\eta^*$  对于角频率的变化表现出不敏感性。而在高角频率区域, 5 组样品的  $\eta^*$  均开始下降, 表现出明显的剪切变稀行为, 但是最先出现剪切变稀现象的是 K0, 而 K1、K1.5、K2 样品在更高的角频率下才开始剪切变稀, 这主要是因为: 虽然经 DMSO 插层后的高岭土片层间距只扩大到 1.1 nm, 仍然不利于 PIB 分子插入层间, 但是层间氢键被破坏, 黏土颗粒片层之间的相互作用减弱; 此外接枝了 PDMS 的插层高岭土片层表面与 PIB 分子间有良好的相容性, 有利于改性后的高岭土片层更均匀地分散在 PIB 中作为物理交联点, 与 PIB 分子相互作用形成物理交联网络, 从而提高了 PIB 体系的结构稳定性。另外, PDMS-Kaolin 的质量分数大于 0.5 % 时, 对 PIB 体系的增强效果才明显。



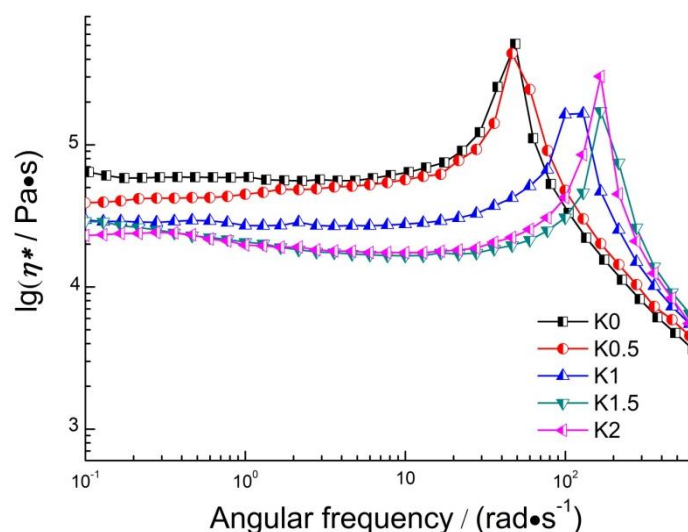

 图 8 热熔压敏胶样品的复数黏度 ( $\eta^*$ ) 的动态频率扫描曲线

Fig. 8 Dynamic frequency curves of complex viscosity ( $\eta^*$ ) of hot melt pressure-sensitive adhesives

## 2.4 PDMS-Kaolin/PIB 热熔压敏胶的力学性能

图 9 为热熔压敏胶 180° 剥离强度随 PDMS-Kaolin 质量分数的变化趋势。K0 的剥离强度为 0.593 N/mm, 而 K0.5 的剥离强度值仅增大至 0.601 N/mm, 增长幅度很小, 说明质量分数小于 0.5 % 时, PDMS-Kaolin 提升 PIB 热熔压敏胶抗剥离能力的效果微弱。K1 的剥离强度最大, 达到了 0.659 N/mm。这是由于有机化高岭土片层表面的 PDMS 与 PIB 分子链之间有良好的相互作用, 分散在 PIB 体系内的有机化高岭土片层能够吸附 PIB 分子充当物理交联点, 提高了 PIB 体系的剥离强度。K2 的剥离强度降至 0.579 N/mm, 主要是因为 PDMS-Kaolin/PIB 体系内的 PDMS-Kaolin 片层表面能较高, 容易聚集成大块的团聚体 (如图 6), 这些大块团聚体作为刚性的应力集中体出现在黏接界面会严重影响胶层的黏接效果, 导致剥离强度降低。压敏胶的应用可依据其剥离强度的大小进行分类<sup>[16]</sup>, PDMS-Kaolin/PIB 热熔压敏胶适合用作永久黏接型压敏胶。

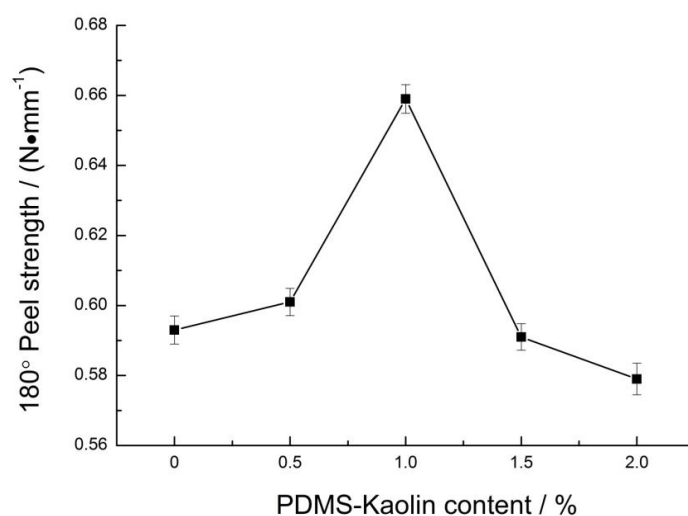


图 9 热熔压敏胶样品的 180° 剥离强度曲线

Fig. 9 180° peel strength values of hot melt pressure-sensitive adhesives

## 2.5 PDMS-Kaolin/PIB 热熔压敏胶的热稳定性

图 10 为热熔压敏胶的热重分析曲线。从图中可以看到, K0.5、K1、K1.5、K2 样品的热稳定性较 K0 均有不同程度的提高, 其中样品 K2 热稳定性最好。温度低于 218 °C 时, 5 组样品都较为稳定, 重量损失都在 1.5 % 以下。样品重量损失为 10 % 的温度, K0 为 306 °C, 而 K2 为 340 °C。各个阶段, 样品 K0 都损失得最快, 样品 K2 都损失得最慢, 主要原因在于高岭土片层具有良好的阻隔性, 能抑制氧气的渗入和热量的传导, 同时能抑制基体聚合物分子链的热运动。

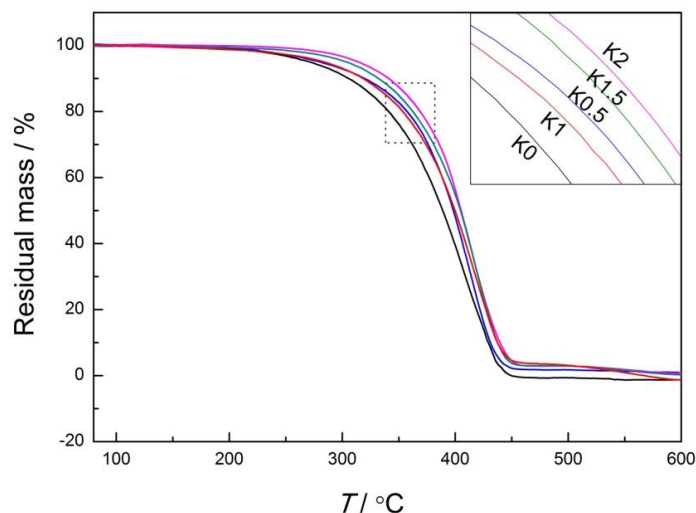


图 10 热熔压敏胶样品的热重曲线

Fig. 10 TG curves of hot melt pressure-sensitive adhesives

## 3 结论

(1) PDMS成功接枝到了高岭土表面, DMSO进入到了高岭土层间破坏了层间氢键, 高岭土经过改性后疏水性显著增强, 有机化效果明显。

(2) 当质量分数大于0.5 %时, PDMS-Kaolin的引入可以有效增强PIB体系的结构稳定性。

(3) PDMS-Kaolin/PIB热熔压敏胶适合用作永久黏接型压敏胶, 当PDMS-Kaolin质量分数达到1 %时, 其180°剥离强度值最大 (0.659 N/mm)。

(4) PDMS-Kaolin/PIB热熔压敏胶的热稳定性随着PDMS-Kaolin质量分数的增大而增强。

### 参考文献:

- [1] 王驰亮, 王立, 王苇, 等. 压敏胶粘剂组成、结构及性能的研究进展[J]. 功能高分子学报, 2004, 17(4): 675-683.

- [2] Benedek I, Feldstein M M. Technology of pressure-sensitive adhesives and products[M]. Boca Raton (FL): CRC, Taylor & Francis, 2009: 147-152.
- [3] NASROLLAHAZADEH M, GANJI F, TAGHIZADEH S M, et al. "D-optimal experimental design" analysis in preparing optimal polyisobutylene based pressure sensitive adhesives[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 78: 28-37.
- [4] GEISS P L, BROCKMANN W. Creep resistance of pressure sensitive mounting tapes[J]. The Journal of Adhesion, 1997, 63(4): 253-263.
- [5] KOSTYUK A, IGNATENKO V, SMIMOVA N, et al. Rheology and adhesive properties of filled PIB-based pressure-sensitive adhesives. I. Rheology and shear resistance[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015, 29(17): 1831-1848.
- [6] ANTONOV S, BRANTSEVA T, KOSTYUK A, et al. Rheology and adhesive properties of filled PIB-based pressure-sensitive adhesives. II. Probe tack and 90 ° peel testing[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015, 29(24): 2635-2647.
- [7] BRANTSEVA T, ANTONOV S, KOSTYUK A, et al. Rheology and adhesive properties of PIB-based pressure-sensitive adhesives with montmorillonite-type nanofillers[J]. European Polymer Journal, 2016, 76: 228-244.
- [8] BRANTSEVA T V, ANTONOV S V, GORBUNOVA I Y. Adhesion properties of the nanocomposites filled with aluminosilicates and factors affecting them: A review[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2018, 82: 263-281.
- [9] 仇国全, 陈培才, 黄孝华, 等. 含叔丁基可溶性芳香聚酰胺的制备及其性能研究[J]. 功能高分子学报, 2017, 30(1): 116-120.
- [10] 陈子栋, 张胜文, 郭盟, 等. 聚硅氧烷与纳米SiO<sub>2</sub>复合改性光固化水性聚氨酯的制备与性能[J]. 功能高分子学报, 2014, 27(2): 178-183.
- [11] 刘辉, 陈新, 肖雨, 等. 室温固化双组分硅凝胶的制备及其性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(1): 66-69.
- [12] 周英浩, 杨成, 张晨, 等. 巯基功能化聚倍半硅氧烷微球对银离子的吸附性能[J]. 功能高分子学报, 2017, 30(2): 202-207.
- [13] 张先如, 樊东辉, 徐政. 微波诱导快速制备高岭石/二甲亚砷插层复合物[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 1-6.

学版), 2005, 33(12): 1646-1650.

- [14] 秦芳芳, 何明中, 崔景伟, 等. 高岭土/二甲亚砷插层复合物脱嵌反应热动力学[J]. 高等学校化学学报, 2007, 28(12): 2343-2348.
- [15] 刑羽雄, 张海燕, 林锦, 等. 碳包钴纳米颗粒/聚二甲基硅氧烷复合热界面材料的制备和性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(6): 1590-1595.
- [16] Benedek I, Feldstein M M. Handbook of pressure-sensitive adhesives and products: fundamentals of pressure sensitivity[M]. Boca Raton (FL): CRC, Taylor & Francis, 2009: 170-171.