

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.019

# 耐热 ABS 树脂的结构与性能分析

史春亮<sup>1</sup>, 陆书来<sup>2,3</sup>, 谢洪涛<sup>3</sup>, 胡慧林<sup>2,3</sup>, 王立伟<sup>2,3</sup>, 赵世成<sup>1</sup>

(1. 上海市多相结构材料化学工程重点实验室, 华东理工大学化工学院, 上海 200237 ;

2. 中国石油 ABS 技术中心, 吉林吉林 132021 ; 3. 中国石油吉林石化公司合成树脂厂, 吉林吉林 132021)

**摘要:** 测试了三种商业级耐热丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 的耐热性能、力学性能和流变学行为, 表征了 ABS 树脂的化学组成和微观结构, 在此基础上分析了耐热 ABS 树脂微观结构与宏观性能的关系。结果表明, 添加的耐热改性剂为 *N*-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂, 其主要分散在苯乙烯-丙烯腈共聚物 (SAN) 中, 限制了 SAN 树脂分子链段的活动性, 提高了其玻璃化转变温度, 进而提高了 ABS 树脂的耐热性能, 且添加量越高, 耐热性能提升越显著。耐热改性剂的添加, 在提高 ABS 树脂刚性的同时, 降低了其韧性。韧性的降低可以通过提高体系中橡胶相的含量来改善。ABS 树脂中耐热改性剂的含量越高, 其类固行为越明显, 分子链的活动性越差, 熔体流动速率越低。

**关键词:** 耐热性能; 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料; 维卡软化温度; 冲击强度; 熔体流动速率; 流变行为

**中图分类号:** TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)04-0106-06

## Analysis of Structure and Properties of Heat-Resistant ABS Resin

Shi Chunliang<sup>1</sup>, Lu Shulai<sup>2,3</sup>, Xie Hongtao<sup>3</sup>, Hu Huilin<sup>2,3</sup>, Wang Liwei<sup>2,3</sup>, Zhao Shicheng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Materials Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China ; 2. PetroChina ABS Resin Technology Center, Jilin 132021, China ;

3. Synthetic Resin Factory of Jilin Petrochemical Company, PetroChina, Jilin 132021, China)

**Abstract :** The heat resistance, mechanical properties and rheological behavior of three commercial heat-resistant acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS) were tested. The chemical composition and microstructure of heat-resistant ABS resin were characterized. Subsequently, the relationship between the microstructure and macroscopic properties of heat-resistant ABS resin was analyzed. The experimental results indicate that the added heat-resistant modifier is *N*-phenylmaleimide heat-resistant modifier, which is mainly dispersed in styrene-acrylonitrile copolymer (SAN), which limits the activity of the molecular chain segment of SAN resin, improves its glass transition temperature, and then improves the heat-resistant performance of ABS resin. The higher the amount of heat-resistant modifier is added, the more significant the heat-resistant performance is improved. The addition of heat-resistant modifier increases the rigidity of ABS, but reduces its toughness, which can be improved by increasing the content of rubbery phase in the system. The higher the content of heat-resistant modifier in ABS resin, the more obvious its solid-like behavior, the worse the activity of molecular chain and the lower the melt flow rate.

**Keywords :** heat-resistant ; acrylonitrile-butadiene-styrene plastic ; Vicat softening temperature ; impact strength ; melt flow rate ; rheological behavior

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 是一种以聚丁二烯 (PB) 为分散相、丙烯腈-苯乙烯共聚物 (SAN) 为连续相的两相三元共聚物。ABS 树脂具有较好的韧性、刚性和表面光泽性, 在各领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。近年来, 随着 ABS 树脂在汽车高温

部件、吹风机和微波炉等小型加热家用电器领域的应用增加, 耐热 ABS 树脂的市场需求日益增大<sup>[2-4]</sup>。但是通用 ABS 树脂的耐热性能不足, 国内外很多企业都相继开发了耐热 ABS 树脂。目前 ABS 树脂耐热改性的方法主要通过引入耐热性较好的单体、与

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (21878089)

**通信作者:** 赵世成, 教授, 从事聚烯烃高性能化研究

**收稿日期:** 2022-01-16

**引用格式:** 史春亮, 陆书来, 谢洪涛, 等. 耐热 ABS 树脂的结构与性能分析 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(4):106-111, 123.

Shi Chunliang, Lu Shulai, Xie Hongtao, et al. Analysis of structure and properties of heat-resistant ABS resin[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):106-111, 123.

聚碳酸酯(PC)等高耐热树脂共混以及添加无机填料等手段<sup>[5-10]</sup>。但是,ABS树脂的体系较为复杂,对微观结构与耐热性能的关系还缺乏深刻的认识,因此探究耐热ABS树脂的结构与性能的关系,对于设计制备高耐热ABS树脂具有重要的指导意义。

笔者以商业级耐热ABS树脂为研究目标,通过不同分析等表征手段,对比分析了耐热ABS树脂的化学组成与微观结构对其宏观性能的影响,探究了耐热ABS树脂的耐热机理。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

耐热级ABS树脂:PA-777B, PA-777D, PA-777E,台湾奇美实业股份有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9140A型,上海一恒科学仪器有限公司;

台式高速离心机:H1850型,湖南湘仪离心机仪器有限公司;

旋转蒸发仪:RE-2000B型,上海亚荣生化仪器厂;

注塑机:CJ80E型,广东震德塑料机械厂有限公司;

微型注塑机:HAAKE MiniJet II型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

缺口制样机:JJANM-21型,承德市金建检测仪器有限公司;

热变形/维卡软化温度测定仪:RR/HDV2型,英国Ray-Ran测试设备有限公司;

电子万能试验机:CMT4204型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

电子简支梁冲击试验机:XJJD-5型,承德市金建检测仪器有限公司;

熔体流动速率(MFR)测定仪:MI-4型,德国高特福公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS10型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

元素分析仪:VARIO EL III型,德国ELEMENTAR公司;

场发射透射电子显微镜(TEM):Tallos F200X型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 3+型,瑞士梅特勒-托利多公司;

动态热机械分析(DMA)仪:DMA1型,瑞士梅

特勒-托利多公司;

高级旋转流变仪:MCR 302型,奥地利Anton Paar公司。

### 1.3 试样制备

将三种耐热ABS树脂放置在85℃的鼓风干燥箱中干燥2 h,然后在注塑机上注塑成拉伸、弯曲标准样条。注塑机的注塑条件如下:一段220℃、二段210℃、三段200℃,注射压力50 MPa,注射时间5 s,保压时间8 s,冷却时间35 s。在微型注塑机上注塑成简支梁冲击、热变形温度和维卡软化温度等标准样条,注塑温度为210℃,注射压力60 MPa,注射时间10 s,保压时间40 s,冷却时间35 s。简支梁冲击标准样条在缺口制样机上铣出缺口,缺口类型为A型)。

### 1.4 性能测试与表征

维卡软化温度按照GB/T 1633-2000测试,测试方法为B<sub>50</sub>法。

热变形温度按照GB/T 1634.2-2004测试,测试方法为A<sub>120</sub>法。

拉伸强度按照GB/T 1040.2-2006测试,测试速率为50 mm/min。

弯曲性能按照GB/T 9341-2008测试,测试速率为2 mm/min。

简支梁缺口冲击强度按照GB/T 1043.2-2018测试。

MFR按照GB/T 3682.1-2018测试,测试温度为220℃,压力为98 N。

橡胶相(PB相)含量测定:准确称取0.8 g左右上述三种耐热ABS树脂置于试管中,并加入100 mL丙酮,在常温下超声溶解4 h左右至耐热ABS树脂完全溶解。将溶解后的悬浊液转移至离心管中,使用10 000 r/min的高速离心机离心分离10 min,倒出上层清液至茄型瓶中。继续往离心管中加入一定量的丙酮,重复离心分离2次<sup>[11]</sup>。将分离出的不溶物(橡胶相)放置于80℃的真空干燥箱中干燥12 h。将分离后的溶液用旋转蒸发仪干燥后,得到SAN相,置于80℃的真空干燥箱中干燥12 h,进行DSC测试。

DSC测试:取SAN相样品3~5 mg,以50℃/min的升温速率从25℃加热至200℃(一次加热)并恒温5 min以消除热历史;随后,以10℃/min的速率降温至30℃,再以10℃/min的升温速率加热至200℃。DSC测试气氛为高纯氮气,高纯氮气流

量为 50 mL/min。

**FTIR 测试:** 将样品和 KBr 粉末混合研磨后用油压机压制成圆片,用于 FTIR 测试,扫描范围  $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数 32 次。

**元素含量分析:** 直接从 ABS 树脂样品上取样进行测试。

**TEM 测试:** 将 ABS 树脂冷冻后经冷冻超薄切片切成 100 nm 厚的薄片,然后将样品薄片放置在铜网上观察形貌。

**DMA 分析:** 采用 DMA 仪进行测试,以双悬臂模式进行温度扫描,扫描范围为  $30 \sim 220^\circ\text{C}$ ,升温速

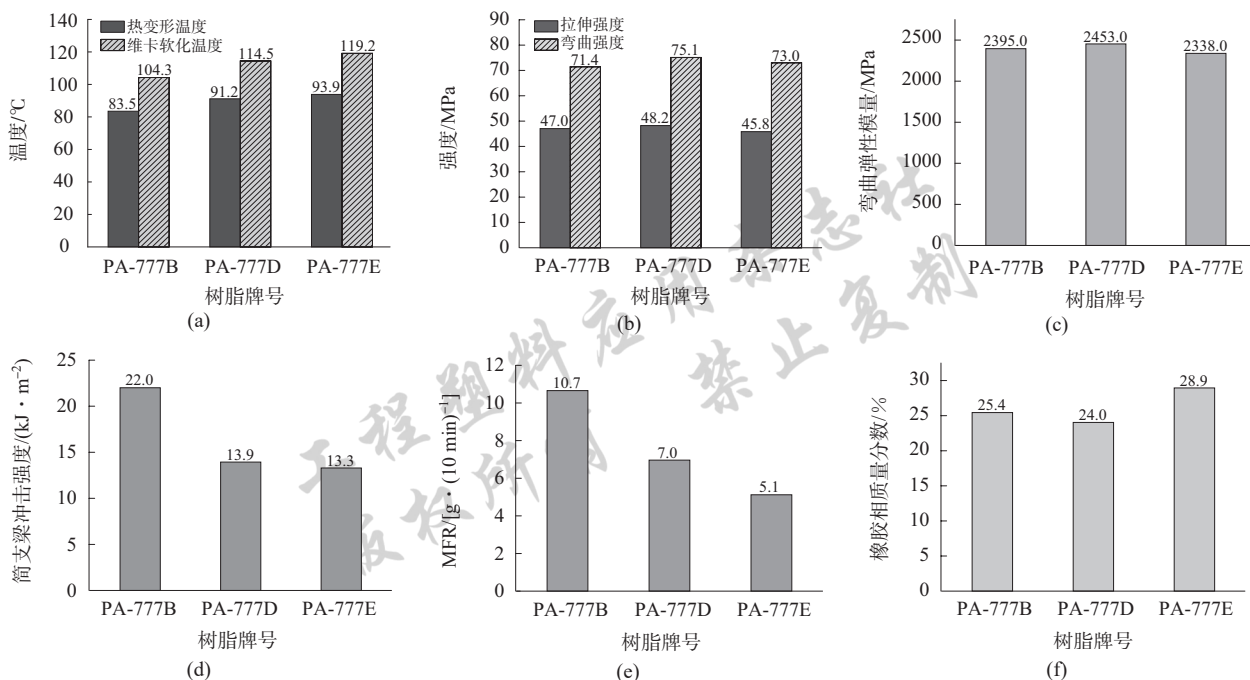
率为  $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

**流变性能分析:** 在  $200^\circ\text{C}$  的氮气氛围下,使用配备有平行板夹具(直径为 25 mm)的旋转流变仪进行测试。两板之间的间隙设置为 1 mm。在固定应变为 0.5% 的条件下,用频率扫描法测量储能模量、损耗模量、损耗角正切值和复数黏度与角频率的关系,角频率的范围为  $0.01 \sim 100 \text{ rad/s}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 耐热 ABS 树脂的宏观性能分析

耐热 ABS 树脂 PA-777B, PA-777D, PA-777E 的宏观性能如图 1 所示。



a—热变形温度和维卡软化温度; b—拉伸强度和弯曲强度; c—弯曲弹性模量; d—简支梁缺口冲击强度; e—MFR; f—橡胶相质量分数

图1 三种耐热 ABS 树脂的宏观性能

从图 1a 可知, PA-777B, PA-777D, PA-777E 的维卡软化温度和热变形温度均依次升高。通用级 ABS 树脂的热变形温度一般为  $77^\circ\text{C}$  左右<sup>[12]</sup>, 维卡软化温度一般为  $95^\circ\text{C}$  左右<sup>[13]</sup>, PA-777B, PA-777D, PA-777E 的热变形温度较通用级 ABS 树脂分别高出  $6.5, 14.2, 16.9^\circ\text{C}$  左右, 维卡软化温度分别高出  $9.3, 19.5, 24.2^\circ\text{C}$  左右。从图 1b, 图 1c 可以看出, PA-777B, PA-777D, PA-777E 的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量的变化趋势一致, PA-777D 的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量均高于 PA-777B 和 PA-777E。从图 1d 可以看出, PA-777B 的简支梁缺口冲击强度高于 PA-777D 和 PA-777E, 而 PA-777D 与 PA-777E 的简支梁缺口冲击强度相差不大。从图 1e 可以看出, PA-777B, PA-777D 和 PA-777E 的

MFR 依次降低。

一般来说, ABS 树脂的耐热性能越好, 材料的刚性就越高<sup>[14]</sup>, 韧性也就越低。高分子材料弯曲弹性模量的高低体现了其刚性的强弱, PA-777B, PA-777D 和 PA-777E 的耐热性能依次升高, 但是 PA-777E 的弯曲弹性模量却弱于 PA-777D, 且两者的简支梁冲击强度差异不大。这可能与 SAN 相的成分、相对分子质量以及橡胶相的含量、粒子大小、形态、微观结构和接枝结构等因素相关<sup>[14-15]</sup>。

通过丙酮溶解可以将 ABS 树脂分离出橡胶相(PB 相)和 SAN 相, 并确定橡胶相的含量, 结果如图 1e 所示。通过对比分析可知, PA-777E 的橡胶相含量明显高于 PA-777B 和 PA-777D, 而 PA-777B 和 PA-777D 的橡胶相含量差异不大, 这与 PA-777E 的

弯曲弹性模量较低的现象是相符合的。

## 2.2 耐热 ABS 树脂的组成分析

耐热级 ABS 树脂一般都含有耐热改性剂,耐热改性剂结构的差异对其耐热性能具有显著影响,其结构可以用 FTIR 进行表征,三种耐热 ABS 树脂的 FTIR 谱图如图 2 所示。

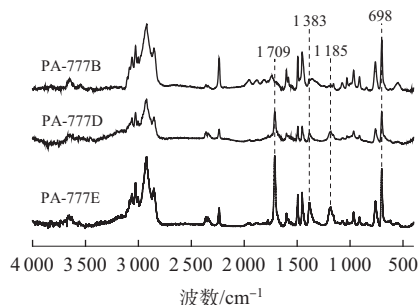


图 2 三种耐热 ABS 树脂的 FTIR 谱图

ABS 树脂的耐热改性剂主要是  $\alpha$ -甲基苯乙烯、马来酸酐类以及马来酰亚胺类等共聚物<sup>[6-7]</sup>。从图 2 可以看出,1709  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可以归属为 *N*-苯基马来酰亚胺的  $\text{C}=\text{O}$  吸收峰;1383  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可以归属为马来酰亚胺上的五元环结构;1185  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可以归属为 *N*-苯基马来酰亚胺中  $\text{C}-\text{N}$  键的特征吸收峰;698  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可以归属为 *N*-苯基马来酰亚胺单元中苯环上的  $\text{C}-\text{H}$  面外完全振动吸收峰。通过分析,可以推测 PA-777D 和 PA-777E 中均存在一定量的 *N*-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂,而 PA-777B 中不存在 *N*-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂。

*N*-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂的相对含量可通过元素含量分析进行测定,因为 ABS 树脂本身的氧元素较低,而马来酰亚胺类共聚物中含有较高的氧元素。三种耐热 ABS 树脂的元素含量测定结果如图 3 所示。

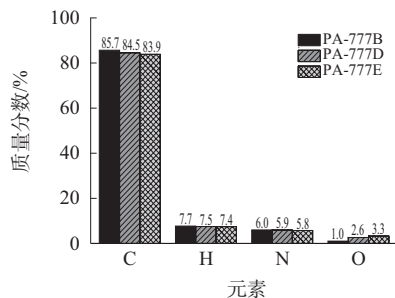


图 3 三种耐热 ABS 树脂的元素含量测定结果

从图 3 可以看出,PA-777B, PA-777D, PA-777E 中的氧元素含量依次升高,结合 FTIR 分析结果,可以确定 PA-777E 中耐热改性剂的含量高于 PA-777D。一般来说,ABS 树脂所含耐热改性剂的含量

越高,其冲击强度就越低。由图 1d、图 1f 可以看出,PA-777E 与 PA-777D 的简支梁缺口冲击强度差异不大,而 PA-777E 的橡胶相含量明显高于 PA-777D,说明更高的橡胶相含量在一定程度上提高了 PA-777E 的简支梁缺口冲击强度,但是降低了其刚性。

ABS 树脂的  $T_g$  和分子链段的活动性可用 DMA 来表征。三种耐热 ABS 树脂的扫描损耗角正切值随着温度变化的曲线如图 4 所示。

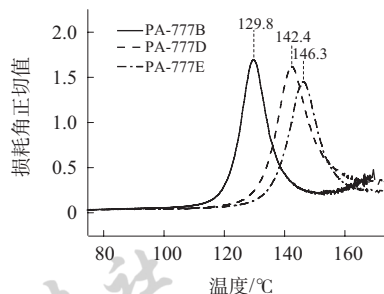


图 4 三种耐热 ABS 树脂的损耗角正切值随温度变化的曲线

从图 4 可以看出,PA-777B, PA-777D, PA-777E 对应的  $T_g$  分别为 129.8, 142.4, 146.3  $^{\circ}\text{C}$ , 三种耐热 ABS 树脂的  $T_g$  差异较大,且耐热 ABS 树脂的性能越好,其  $T_g$  越高。由于 PA-777D 和 PA-777E 中均含有 *N*-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂,耐热改性剂的加入可以使 ABS 树脂的分子活动性受到限制,且添加量越高,分子链链段的活动性受限越明显,材料表现出的耐热性能就越好。

## 2.3 耐热 ABS 树脂的 SAN 相分析

SAN 相对制备 ABS 树脂的性能具有很大的影响<sup>[11]</sup>。三种耐热 ABS 树脂 SAN 相的 DSC 曲线如图 5 所示,得到三种 SAN 相的  $T_g$  见表 1。

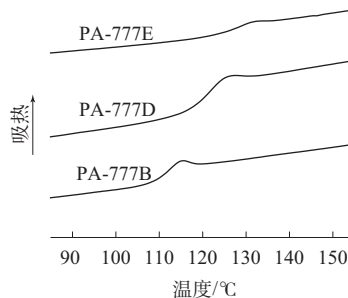


图 5 三种耐热 ABS 树脂 SAN 相的 DSC 曲线

表 1 三种耐热 ABS 树脂 SAN 相的  $T_g$   $^{\circ}\text{C}$

| 项目    | PA-777B | PA-777D | PA-777E |
|-------|---------|---------|---------|
| $T_g$ | 108.8   | 117.0   | 123.9   |

从表 1 可以看出,三种 ABS 树脂 SAN 相的  $T_g$  差异比较大,分别是 PA-777E 为 123.9  $^{\circ}\text{C}$ , PA-777D 为 117.0  $^{\circ}\text{C}$ , PA-777B 为 108.8  $^{\circ}\text{C}$ 。SAN 相的  $T_g$  与 ABS 树脂的耐热性能相对应, SAN 相的  $T_g$  越高,对

应的ABS树脂的 $T_g$ 、热变形温度和维卡软化温度就越高。SAN相的 $T_g$ 高低与其分子链的活动性有直接关系, SAN相的 $T_g$ 越高,表示分子链的活动性越低,从而导致由其制备的ABS树脂的分子链活动性受限制越明显,其耐热性能就越好。

分离出的SAN相的化学结构可用FTIR谱图表征,结果如图6所示。

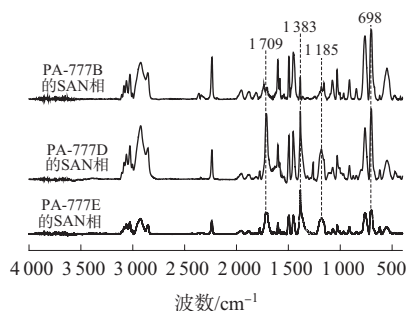
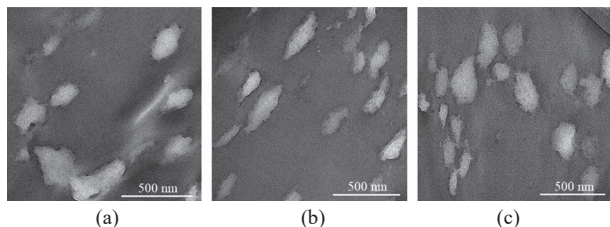


图6 三种耐热ABS树脂的SAN相的FTIR谱图

在PA-777D和PA-777E的SAN相FTIR谱图中,1709,1383,1185,698  $\text{cm}^{-1}$ 处均存在吸收峰,推测在PA-777D和PA-777E的SAN相中存在N-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂。N-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂进入ABS树脂的SAN相中,马来酰亚胺的五元环结构限制了SAN相的分子链段的活动性,从而提高ABS树脂的耐热性能。

#### 2.4 耐热ABS树脂形貌表征

三种耐热ABS树脂的TEM照片如图7所示。从图7可以看出,三种ABS树脂在TEM下均呈现出明显的“海-岛”结构,其中浅色部分为分散的橡胶相,深色部分为连续的SAN相。三种ABS树脂的橡胶粒子分布均比较均匀,其橡胶粒子粒径均在150~200 nm之间,橡胶粒子的粒径差异不大。三种ABS树脂中的橡胶粒子有明显的变形,粒子呈椭圆形,且具有相同的取向,可能是由于挤出过程中的拉伸力作用导致的。



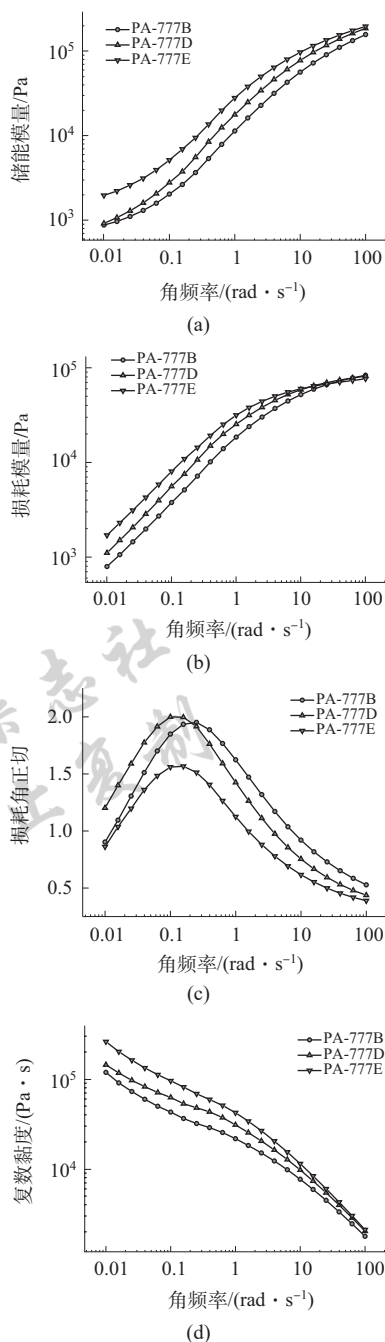
a—PA-777B; b—PA-777D; c—PA-777E

图7 三种耐热ABS树脂的TEM照片

#### 2.5 耐热ABS树脂流变学分析

三种耐热ABS树脂的流变性能如图8所示。

从图8a、图8b可以看出,在整个测试范围内,



a—储能模量; b—损耗模量; c—损耗角正切值; d—复数黏度

图8 三种耐热ABS树脂的流变性能

三种耐热ABS树脂的储能模量和损耗模量均随着角频率的增加而增大,耐热ABS树脂的耐热性能越好,其储能模量越大,对角频率的依赖性越低,类固行为越明显<sup>[16]</sup>。低频区的损耗角正切值用来表征ABS树脂的黏弹性差异。对比图8c的PA-777B和PA-777D曲线可知,PA-777D在低频区的损耗角正切值较大,说明耐热改性剂的存在改变了ABS树脂的黏性,致使PA-777D的黏性增大。从图8c可以看出,PA-777E在低频区的损耗角正切值较低,这是

由于其橡胶相含量较高,致使其弹性增大所致。从图8d可以看出,在整个测试范围内,复数黏度随着角频率的增加而减小,耐热ABS树脂的耐热性能越好,其复数黏度越大,剪切变稀行为越明显。这与其MFR的结果相符合,复数黏度越大,其MFR越小,流动加工性能越差。

### 3 结论

(1) 三种耐热ABS树脂PA-777B, PA-777D和PA-777E中,耐热性能(热变形温度及维卡软化温度)的大小顺序依次为PA-777E > PA-777D > PA-777B;强度和刚性(拉伸强度、弯曲强度、弯曲弹性模量)的大小顺序依次为PA-777D > PA-777B > PA-777E;韧性和流动性能(简支梁缺口冲击强度和MFR)的大小顺序依次为PA-777B > PA-777D > PA-777E。

(2) PA-777D和PA-777E耐热性的提高可能是添加了N-苯基马来酰亚胺类耐热改性剂所致,且在PA-777E中耐热改性剂的含量高于PA-777D,添加的耐热改性剂分散在SAN树脂中,限制了分子链段的活动性,提高了SAN相的 $T_g$ ,从而提高了ABS树脂的耐热性能。

(3) PA-777E的耐热性能高于PA-777D,但其刚性却较低,这是由于PA-777E中的橡胶相含量较高所致,较高的橡胶相含量降低了ABS树脂的刚性,但改善了ABS树脂的韧性。

(4) 在三种耐热ABS树脂中,耐热改性剂的添加量越高,ABS树脂表现出越明显的类固行为。相比PA-777B, PA-777D的黏性增大;PA-777E的橡胶相含量较高,其弹性增大。

### 参考文献

- [1] 潘宏丽,崔英,刘虹昌. 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物生产工艺及产品牌号[J]. 石化技术与应用, 2020, 38(6):431-440.  
Pan Hongli, Cui Ying, Liu Hongchang. Production processes and product brands of acrylonitrile butadiene-styrene copolymer[J]. Petrochemical Technology & Application, 2020, 38(6):431-440.
- [2] 刘孟鹏,吕鹏,贾延星,等. ABS树脂现状与发展趋势[J]. 化工管理, 2021(25):71-72.  
Liu Mengpeng, Lyu Peng, Jia Yanxing, et al. Status and development trend of ABS resin[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(25):71-72.
- [3] 黄金霞,丁晓艳,谢好,等. 2019年ABS树脂生产及市场分析[J]. 化学工业, 2020, 38(3):41-48, 55.  
Huang Jinxia, Ding Xiaoyan, Xie Yu, et al. ABS resin production and market for 2019[J]. Chemical Industry, 2020, 38(3):41-48, 55.
- [4] 张彩凤,付辉,李丹苹. 浅谈ABS树脂生产工艺与发展方向[J]. 精细石油化工进展, 2019, 20(5):42-45.  
Zhang Caifeng, Fu Hui, Li Danping. Discussion of ABS resin production technologies and development trend[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2019, 20(5):42-45.
- [5] 赵振伦,于建玲,潘宇,等. ABS改性技术研究进展[J]. 广东化工, 2017, 44(3):97-98.  
Zhao Zhenlun, Yu Jianling, Pan Yu, et al. Advanced of the research on modification technology of ABS[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(3):97-98.
- [6] 唐来安. 耐热ABS树脂及其制备技术[J]. 上海化工, 2014, 39(8):35-38.  
Tang Laian. Heat-resistant ABS resin and its preparation technology [J]. Shanghai Chemical Industry, 2014, 39(8):35-38.
- [7] 李远,李文振,钱正华,等. N-苯基马来酰亚胺/苯乙烯/ $\alpha$ -甲基苯乙烯/马来酸酐四元共聚物的制备及对ABS的改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(6):1-6.  
Li Yuan, Li Wenzhen, Qian Zhenghua, et al. Synthesis of N-phenylmaleimide/styrene/ $\alpha$ -methylstyrene/maleic anhydride tetrapolymers and its modification to ABS resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(6):1-6.
- [8] Chinnadurai T, Vandan S A. Thermal and structural analysis of ultrasonic-welded PC/ABS blend for automobile applications[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 127(3):1 995-2 003.
- [9] Dong J, Zhao C, Tan Z, et al. Structure and properties of heat-resistant ABS resins innovated by NSM random copolymer[J]. Polymer Composites, 2013, 34(6):920-928.
- [10] Sohail M A, Mandal A, Mondal A, et al. Thermal analysis of ABS/PA6 polymer blend using differential scanning calorimetry[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129(3):1 689-1 695.
- [11] 屈松,宋振彪,王菊琳,等. 5种主流ABS树脂微观结构与产品性能比较研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(12):87-92.  
Qu Song, Song Zhenbiao, Wand Julin, et al. A comparative study on microstructure and product performance of five main resin ABS resins[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):87-92.
- [12] 王毅,宋振彪,杨毓,等. 影响ABS树脂热变形温度测试的因素[J]. 塑料工业, 2020, 48(2):118-122.  
Wang Yi, Song Zhenbiao, Yang Yu, et al. The factors affecting the thermal deformation temperature test of ABS resin[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(2):118-122.
- [13] 胡慧林,谢景伟,徐耀辉,等. 板材级ABS树脂结构和性能对比研究[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6):118-121.

Ji Minghui. Prospects for the application of aramid fiber reinforced thermoplastic pipe to oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(12):57-59.

- [14] 魏艳丽,王继红,丁炜. 气田用柔性复合高压输送管的施工方法[J]. 石油工程建设, 2010, 36(4):36-38.

Wei Yanli, Wang Jihong, Ding Wei. Construction methods of flexible composite high-pressure pipelines used in gas field[J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(4):36-38.

- [15] 黄雪驰,马贵阳. 非金属管道在煤层气输送中的应用分析[J].

当代化工, 2015, 44(1):159-161.

Huang Xuechi, Ma Guiyang. Application of non-metallic pipes in conveying of coal-bed methane[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(1):159-161.

- [16] 刘青山,肖雯雯,葛鹏莉,等. 聚乙烯复合管在油田苛刻环境的适用性[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10):122-128.

Liu Qingshan, Xiao Wenwen, Ge Pengli, et al. Applicability of polyethylene composite pipe in harsh environment of oil field[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10):122-128.

=====

(上接第 111 页)

Hu Huilin, Xie Jingwei, Xu Yaohui, et al. Comparative study on structure and properties of plate grade ABS resins[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):118-121.

- [14] 王永峰,邵卫,李波,等. 高耐热型 ABS 树脂的制备[J]. 塑料制造, 2012(6):55-57.

Wang Yongfeng, Shao Wei, Li Bo, et al. The method of a high heat resistance ABS resin[J]. Plastics Manufacture, 2012(6):55-57.

- [15] 李欣达. 橡胶组成对 ABS 性能的影响[J]. 上海塑料, 2019(2): 12-18.

Li Xinda. Influence of rubber phase composition on properties of ABS resin[J]. Shanghai Plastics, 2019(2):12-18.

- [16] Gao C, Zhang S, Wang F, et al. Graphene networks with low percolation threshold in ABS nanocomposites:selective localization and electrical and rheological properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(15):12 252-12 260.

=====

(上接第 118 页)

sity, 2017.

- [11] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings[J]. Tribology International, 2009, 42(4):542-547.

- [12] 尹红泽,陈文刚,李镛冰,等. 3D 打印 ABS 材料表面楔形织构的摩擦性能[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4):158-166.

Yin Hongze, Chen Wengang, Li Rongbing, et al. Friction performance of wedge-shaped texture on the surface of 3D printed ABS materials[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4):158-166.

- [13] 路慧彪,曹淑华,唐平. 入口压力对织构表面承载力的影响[J]. 机床与液压, 2018, 46(5):111-113, 154.

Lu Huibiao, Cao Shuhua, Tang Ping. Influence of supply pressure on carrying capacity of texture surface[J]. Machine Tool & Hy-

draulics, 2018, 46(5):111-113, 154.

- [14] 于海武,王晓雷,孙造,等. 圆柱形微凹坑表面织构对流体动压润滑性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2):209-213.

Yu Haiwu, Wang Xiaolei, Sun Zao, et al. Theoretical analysis on hydrodynamic lubrication of cylinder micro-dimple surface texture[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2):209-213.

- [15] 杨国来,金晶,王文宇,等. 浮杯泵织构化配流副表面的承载特性仿真分析[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(3):27-32.

Yang Guolai, Jin Jing, Wang Wenyu, et al. Simulation analysis on the bearing characteristics of textured valve plate surface of floating cup pump[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021, 47(3):27-32.