

分子结构和炭黑对丁苯橡胶挤出流变特性的影响

丁兴伟, 宋新星, 孙 翀, 张 萍*

(青岛科技大学 橡塑材料与工程教育部重点实验室, 山东 青岛 266042)

摘要:通过毛细管流变仪并结合多种表征测试手段,研究丁苯橡胶(SBR)分子结构和炭黑用量对胶料挤出流变特性的影响。结果表明:乳聚丁苯橡胶(ESBR)和炭黑补强ESBR胶料的表现剪切粘度分别大于溶聚丁苯橡胶(SSBR)和炭黑补强SSBR胶料;ESBR与SSBR的挤出稳定性相当,但炭黑补强SSBR胶料的挤出稳定性更优,挤出物外观质量较好;与SSBR相比,ESBR的分子链柔顺性和炭黑在其基体中的分散性更好,炭黑补强ESBR胶料中结合胶含量更高。

关键词:丁苯橡胶;分子结构;炭黑;挤出流变特性

中图分类号:TQ333.1;TQ330.38[†]1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2018)00-0000-09

丁苯橡胶(SBR)具有耐磨耗、耐低温等优点,特别是高乙烯基溶聚丁苯橡胶(SSBR)还具有相对较低的生热和滚动阻力,正逐渐成为高性能轮胎胎面胶的重要胶种。近年来,有关SBR的功能化应用及物理性能方面的研究较为广泛^[1-6],对填充SBR挤出流变特性的研究较少,而挤出流变行为直接影响复合材料的加工性能,决定橡胶制品的使用性能。

众多学者从多个角度研究了纳米复合材料的流变特性及其影响因素^[7-11],但从橡胶分子结构角度的研究较少。由于SBR分子链中含有乙烯基,顺式、反式-1,4-聚丁二烯等多种结构单元,因此形成了具有不同分子结构的SBR,对橡胶各阶段的加工性能产生较大影响。此外,填料可赋予橡胶许多优异的性能,同时降低成本,对橡胶制品,尤其是对非自补强型SBR胶料的加工性能以及SBR制品的综合性能具有决定性影响。炭黑作为橡胶工业中重要的补强填料,具有其他填料无法代替的优势。

本工作利用毛细管流变仪,并辅以其他测试手段,研究SBR分子结构、挤出速率、炭黑用量对胶料挤出流变特性的影响,以期为高性能轮胎用SBR

的结构选择和挤出工艺条件的确定提供参考。

1 实验

1.1 主要原材料

SSBR,牌号2564A,中国石油独山子石化公司产品;乳聚丁苯橡胶(ESBR),牌号1712,中国石化齐鲁股份有限公司产品;炭黑N375,平均粒径为26~30 nm,美国卡博特公司产品。SSBR和ESBR的分子结构参数见表1。

表1 SSBR和ESBR的分子结构参数

项 目	SSBR	ESBR
结合苯乙烯质量分数 $\times 10^2$	23.5	23.5
顺式-1,4-结构单元质量分数 $\times 10^2$	19.1	19.4
反式-1,4-结构单元质量分数 $\times 10^2$	22.2	61.8
1,2-结构单元质量分数 $\times 10^2$	58.7	18.7
数均相对分子质量 $\times 10^5$	32	16
重均相对分子质量 $\times 10^5$	67	50
多分散系数	2.06	3.13
玻璃化温度/ $^{\circ}\text{C}$	-24.9	-49.8

1.2 试验配方

基本试验配方:SSBR/ESBR 100,炭黑N375变量,防老剂RD 1。

1.3 试样制备

为保证SSBR和ESBR的相对分子质量相近,首先将两种生胶在SK-160型两辊塑炼机上进行塑炼,利用EKJ-2000M型门尼黏度仪测定塑炼胶的门尼粘度,通过塑炼至相同门尼粘度来粗控相对分子质量。将塑炼胶与填料在RM-200A型

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2015CB654706)

作者简介:丁兴伟(1989—),男,山东聊城人,青岛科技大学硕士研究生,主要从事二烯类橡胶挤出流变的研究。

*通信联系人

HAPRO转矩流变仪(哈尔滨哈普电器技术有限责任公司产品)中进行密炼(温度为50℃,转速为60 r·min⁻¹),制备不同炭黑用量的混炼胶。混炼胶在X(K)-160型开炼机(上海橡胶机械一厂产品)上下片,冷却待用。采用门尼粘度仪测量混炼胶的门尼粘度,结果如表2所示。

表2 不同炭黑用量混炼胶的门尼粘度[ML(1+4)100℃]

胶种	炭黑用量/份			
	0	20	40	60
ESBR	32	39	51	74
SSBR	32	41	55	80

1.4 测试分析

(1)挤出流变特性。利用RH-2000恒速型双筒毛细管流变仪(英国马尔文仪器有限公司产品)对胶料流变特性进行测试,毛细管直径为2 mm,长径比为16:2,零口模长径比为0.4:2,挤出温度为80,90,100,110和120℃,挤出速率为7.82,15,26,45,77,132,227和391 s⁻¹。

(2)挤出物外观。为尽量避免松弛对挤出物的影响,经毛细管挤出的胶料需及时进行表面外观观测。采用SMA1500型电视显微镜(日本Nikon公司产品)对挤出物表面进行观测,放大倍数为10。

(3)动态性能测试。采用ARES-G2型先进流变扩展系统(美国TA公司产品)对胶料进行动态性能测试。通过动态性能测试,进一步分析不同分子结构橡胶基体与炭黑之间的相互作用。

(4)网络结构和结合胶含量。将胶料(质量记为 m_1)放入烘干的200目铁丝网(质量记为 m_2)中,在100 mL甲苯中浸泡48 h,更换一次甲苯,浸泡24 h,在真空干燥箱中烘干至恒质量(质量记为 m_3)。利用如下公式计算结合胶含量:

$$\text{结合胶含量} = (m_3 - m_2 - m_1 \times \text{填料质量分数}) / (m_1 \times \text{填料质量分数})$$

2 结果与讨论

2.1 生胶挤出流变特性

从分子结构着手分析其对生胶挤出流变特性的影响,为后期填充橡胶挤出流变特性的分析提供依据。

SSBR的相对分子质量大于ESBR,虽然试验前对两种生胶进行了塑炼降门尼粘度处理,但是

无法保证相对分子质量达到精确一致(如表2所示),只能粗控。为排除相对分子质量对试验分析的影响,首先将未降门尼粘度的SSBR与降门尼粘度的SSBR进行对比,如图1所示, η_a 为表观剪切粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。从图1可以看出,在相同剪切速率范围内,两条曲线基本重合,即表观剪切粘度相当,因此可排除相对分子质量些许差异对试验结果的影响。

SSBR和ESBR的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线如图2所示。从图2可以看出,两种生胶的表观剪切粘度均随着剪切速率增大而下降,表现出典型的“剪切变稀”行为。在相同剪切速率下,ESBR的表观剪切粘度大于SSBR。分别选取

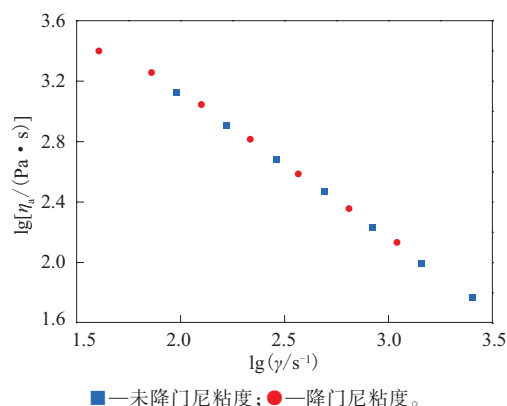


图1 降门尼粘度前后SSBR的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线(100℃)

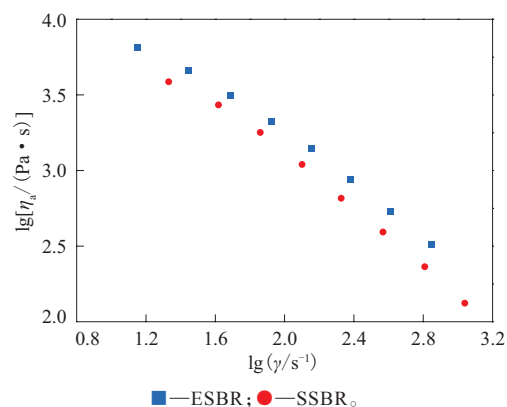


图2 ESBR和SSBR的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线(100℃)

ESBR拟合曲线: $y = -0.17x^2 - 0.12x + 4.17$ $R^2 = 0.99853$ (前4个点); $y = -0.89x + 5.02$ $R^2 = 0.99855$ (后4个点); SSBR拟合曲线: $y = -0.33x^2 + 0.41x + 3.62$ $R^2 = 0.99982$ (前4个点); $y = -0.97x + 5.07$ $R^2 = 0.99999$ (后4个点)。

图中前、后4个点进行线性拟合,可以得出:剪切速率小于 $10^{1.8}$ 时,两种生胶的表观剪切粘度随着剪切速率增大呈非线性下降趋势;剪切速率大于 10^2 后,表观剪切粘度随着剪切速率增大呈线性下降趋势,且SSBR拟合曲线斜率大于ESBR,即SSBR的表观剪切粘度对剪切速率敏感性高于ESBR。

分析认为,ESBR分子链中乙烯基含量和主链饱和度低,分子链柔顺性更好。SSBR乙烯基含量高,位阻效应大,分子链段运动困难,分子链柔顺性差。由于两种生胶相对分子质量均超过临界缠结相对分子质量^[12],故分子链柔顺性越好,分子链缠结程度越高,粘度越大;同理,SSBR分子链缠结程度较低,其受到剪切时分子链更易运动,因此表观剪切粘度对剪切速率敏感性高于ESBR。

ESBR和SSBR的剪切应力随剪切速率变化曲线如图3所示, σ 为剪切应力。从图3可以看出:ESBR的剪切应力整体大于SSBR;两种生胶的剪切应力均随着剪切速率增大而增大,在本试验剪切速率范围内,ESBR的剪切应力随着剪切速率增大呈抛物线形增大(拟合曲线: $y=-0.131\ 19x^2+0.759\ 42x+1.259\ 51\ R^2=0.998\ 72$);对于SSBR,当剪切速率小于 10^2 时,剪切应力随着剪切速率的变化关系类似ESBR(拟合曲线: $y=-0.328\ 1x^2+1.409\ 01x+0.623\ 4\ R^2=0.998\ 93$),当剪切速率大于 10^2 时,剪切应力随着剪切速率增大呈线性增大(拟合曲线: $y=0.032\ 28x+2.069\ 22\ R^2=0.990\ 57$),这说明SSBR的剪切应力随着挤出速率变化

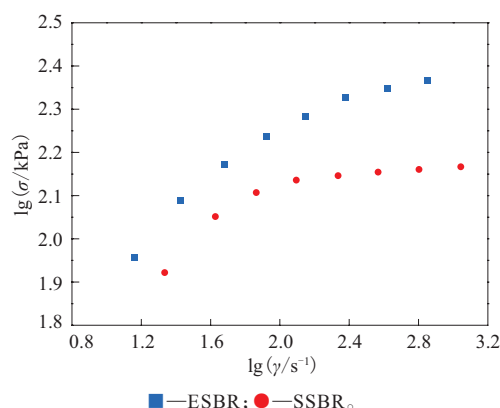


图3 ESBR和SSBR的剪切应力随剪切速率变化曲线(100 °C)

较稳定。

分析认为,ESBR的柔性分子链在流道中被拉伸程度更大,分子链间摩擦更强烈,胶料的粘度大,因此在通过毛细管时的剪切应力也更大;SSBR分子链在流道中被拉伸程度小,随着剪切速率增大,剪切应力变化较稳定。

为直接观察两种生胶在不同剪切速率下的挤出状态,采用体视显微镜观察挤出物的外观形貌,结果如图4所示。从图4可以看出:在低剪切速率下,两种生胶挤出物表面十分粗糙,出现许多毛”;在高剪切速率下,虽然整体形变量更大,但挤出物表面变得光泽。分析认为,这是由于熔体与管壁的接触状态变化所致。在低剪切速率下,熔体与管壁处于“浸润性”接触,在高剪切速率下,熔体在毛细管中是全滑式运动,中间速率区域出现“粘-

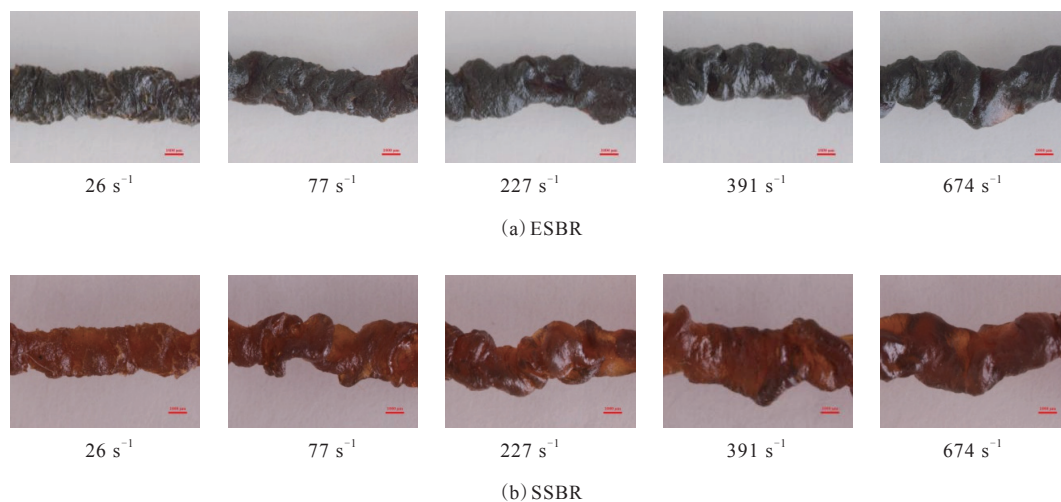
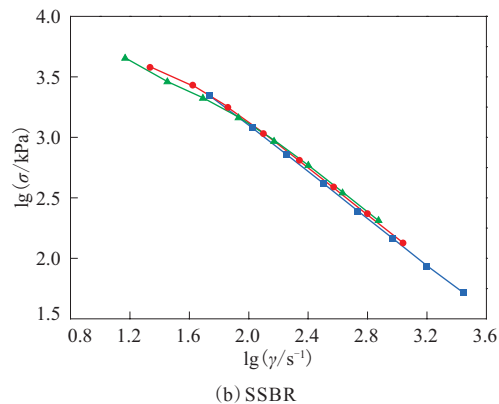
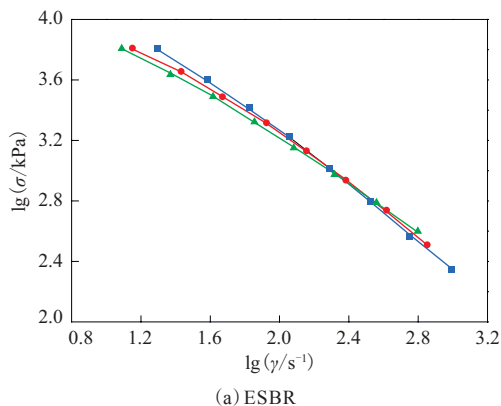


图4 不同剪切速率下ESBR和SSBR挤出物的外观形貌照片

滑交替”。从图4还可以看出,虽然两种生胶挤出物在低剪切速率下表面很粗糙,但整体还算平直,随着剪切速率增大,挤出物发生整体扭曲,这是由于胶料在毛细管中的松弛时间变短。总体而言,在相同剪切速率下,两种生胶挤出物畸变均较严重,两者差异不大。

作为橡胶加工过程中重要的工艺参数,温度对胶料加工流动行为有显著影响,不同挤出温度ESBR和SSBR的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线如图5所示。从图5可以看出:不同温度下,两种生胶的表观剪切粘度均随着剪切速率增大而减小,即粘-切依赖性曲线基本重合,这是由于两种生胶均为切敏性材料,对温度不敏感;对于ESBR,当剪切速率达到 $10^{2.4}$ 时,表观剪切粘度对剪切速率依赖性开始变得与温度无关,而对于SSBR,当剪切速率达到 10^2 前,表观剪切粘度对剪切速率依赖性已变得与温度无关;两种生胶的拟合曲线斜率



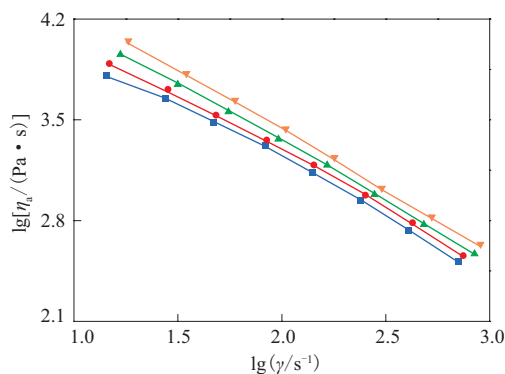
挤出温度/℃: ■—80; ●—100; ▲—120。

图5 不同挤出温度下ESBR和SSBR的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线

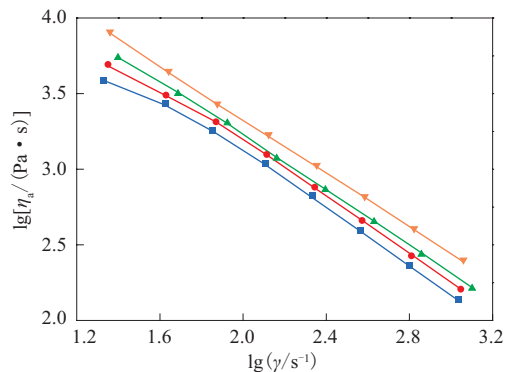
均随着温度升高而下降,即温度升高,表观剪切粘度对剪切速率敏感性降低;在相同温度下,SSBR的拟合曲线斜率大于ESBR,这表明SSBR的表观剪切粘度对剪切速率更敏感。

2.2 炭黑补强胶料挤出流变特性

炭黑补强ESBR和SSBR胶料的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线如图6所示。从图6可以看出,随着炭黑用量增大,两种胶料的表观剪切粘度增大,且保持非牛顿流体特性,ESBR胶料的表观剪切粘度大于SSBR胶料。从拟合曲线可以看



拟合曲线: $y = -0.77x + 4.75$ $R^2 = 0.99166$ (未添加炭黑); $y = -0.78x + 4.83$ $R^2 = 0.99605$ (炭黑用量为20份); $y = -0.82x + 4.98$ $R^2 = 0.99856$ (炭黑用量为40份); $y = -0.84x + 5.10$ $R^2 = 0.99945$ (炭黑用量为60份)。



拟合曲线: $y = -0.88x + 4.83$ $R^2 = 0.99206$ (未添加炭黑); $y = -0.88x + 4.92$ $R^2 = 0.99593$ (炭黑用量为20份); $y = -0.90x + 5.02$ $R^2 = 0.99948$ (炭黑用量为40份); $y = -0.88x + 5.10$ $R^2 = 0.99989$ (炭黑用量为60份)。

炭黑用量/份: ■—0; ●—20; ▲—40; ▼—60。

图6 炭黑补强ESBR和SSBR胶料的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线(100℃)

出;两种胶料的表观剪切粘度与剪切速率呈线性关系;随着炭黑用量增大,两种胶料的粘-切敏感性增强,SSBR胶料的拟合曲线斜率变化程度小于ESBR胶料。分析认为,这是由于ESBR分子链段与炭黑相互作用较强,表观剪切粘度大,在相同外界剪切作用下,对炭黑补强胶料的表观剪切粘度影响更大,因此体现为粘-切敏感性较大;SSBR自身的表观剪切粘度对剪切速率敏感性高,因此SSBR胶料的拟合曲线斜率涨幅不大。

炭黑补强ESBR和SSBR胶料的表观剪切粘度对温度依赖性曲线如图7所示,剪切速率为 $10^{1.5} \text{ s}^{-1}$ 。从图7可以看出,两种胶料的表观剪切粘度随着温度升高呈下降趋势。由拟合曲线斜率可知,随着炭黑用量增大,两种胶料表观剪切粘度对温度的敏感性降低,这是由于炭黑使胶料中结合胶含量减小,而炭黑自身对温度并不敏感,因此胶料的温敏性降低。

粘流活化能(E_η)可以反映材料流动难易程度以及粘度随温度变化的敏感性,其大小与分子链结构有关,而与分子数量关系不大。将Arrhenius方程两边取对数可得:

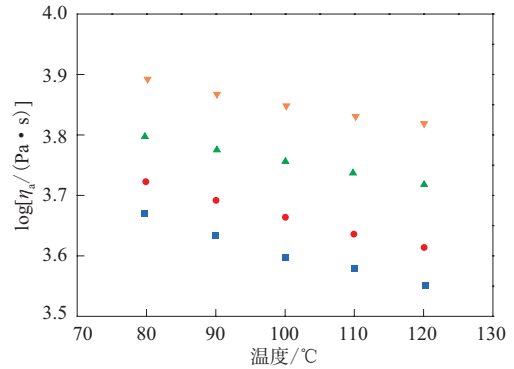
$$\lg \eta_a(T) = \lg K + \frac{E_\eta}{2.303RT}$$

式中, T 为温度; K 为斜率; R 为常数。

以 $\lg \eta_a$ 与 $1/T$ 作图,根据所得斜率进一步计算不同炭黑用量胶料的 E_η ^[13],结果如图8所示。从图8可以看出:随着炭黑用量增大,两种胶料的 E_η 均下降;炭黑用量为0和20份时,SSBR胶料的 E_η 大于ESBR胶料;炭黑用量为40和60份时,SSBR胶料的 E_η 小于ESBR胶料。

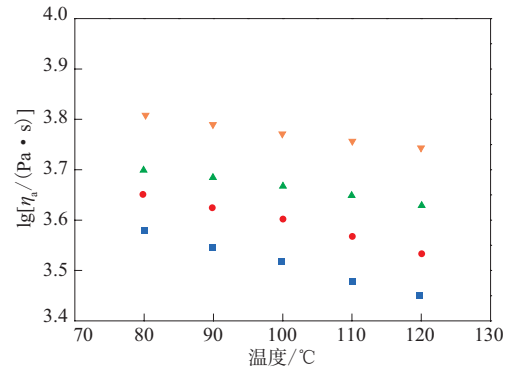
分析认为,ESBR分子链柔顺性好,链段由原位运动到附近“空穴”所需能量小,因此 E_η 低。炭黑用量为20份时,体系中炭黑含量较少,无法抵消橡胶分子链自身结构优势,因此SSBR胶料的 E_η 较大。炭黑用量为40份时,炭黑与橡胶分子链的相互作用体现出来,尽管在较高温度下相互作用会减弱,但在高炭黑添加量下ESBR的柔性分子链优势还是得到体现,其与炭黑有更强的相互作用,对分子链段运动限制也更大,因此ESBR胶料的 E_η 较大。

不同挤出温度下炭黑补强ESBR和SSBR胶料



拟合曲线: $y = -2.91 \times 10^{-3}x + 3.90$ $R^2 = 0.98732$ (未添加炭黑); $y = -2.71 \times 10^{-3}x + 3.94$ $R^2 = 0.98933$ (炭黑用量为20份); $y = -2.01 \times 10^{-3}x + 3.96$ $R^2 = 0.99914$ (炭黑用量为40份); $y = -1.81 \times 10^{-3}x + 4.03$ $R^2 = 0.97508$ (炭黑用量为60份)。

(a) ESBR



拟合曲线: $y = -3.20 \times 10^{-3}x + 3.83$ $R^2 = 0.9954$ (未添加炭黑); $y = -3.01 \times 10^{-3}x + 3.90$ $R^2 = 0.98888$ (炭黑用量为20份); $y = -1.72 \times 10^{-3}x + 3.84$ $R^2 = 0.99415$ (炭黑用量为40份); $y = -1.56 \times 10^{-3}x + .93$ $R^2 = 0.99094$ (炭黑用量为60份)。

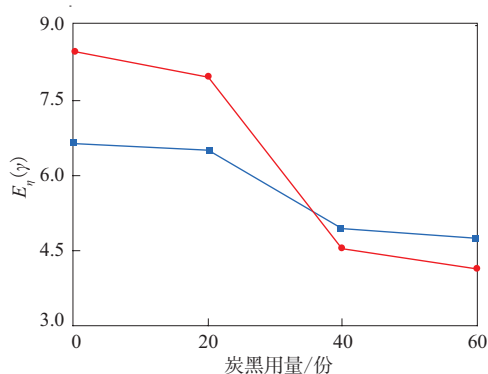
(b) SSBR

炭黑用量/份: ■—0; ●—20; ▲—40; ▼—60。

图7 炭黑补强ESBR和SSBR胶料的表观剪切粘度对温度依赖性曲线

的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线如图9所示,炭黑用量为60份。从图9中拟合曲线斜率可以看出,不同温度下两种胶料的表观剪切粘度对剪切速率依赖性不大,这与生胶有所不同,是由于温度对炭黑影响不大,炭黑的加入使整个体系更稳定,外界环境对胶料的影响被削弱。

炭黑补强ESBR和SSBR胶料挤出物的外观形貌如图10所示,炭黑用量为40份,挤出温度为 100°C 。从图10可以看出:与生胶挤出物外观相比,炭黑补强胶料挤出物外观得到明显改善;低剪切速率

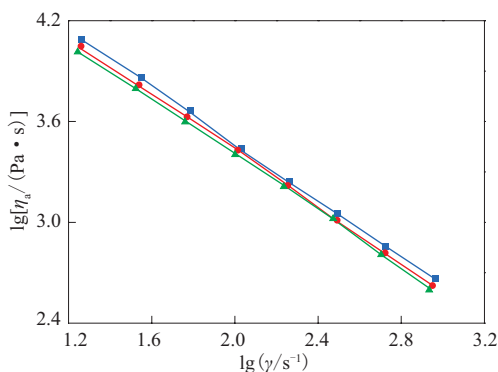


注同图3。

图8 不同炭黑用量ESBR和SSBR胶料的 E_η

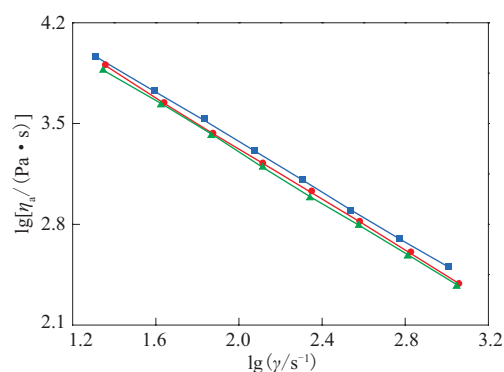
下胶料挤出物整体平直且表面光滑,随着剪切速率增大,表面粗糙程度增大,但仍整体平直,这是由于炭黑的加入使体系中结合胶含量减小,熔体弹性降低,炭黑与橡胶分子链之间的相互作用限制了分子链运动,挤出物表面畸变得得到抑制,胶料的挤出性能明显改善;ESBR胶料挤出物表面畸变更严重,挤出胀大现象明显,这是因为ESBR分子链柔顺性好且生胶弹性大,挤出时容易发生畸变。

挤出胀大比表征挤出口模后材料所储存剩余可恢复弹性的大小。根据分子构象理论,挤出胀大现象所体现的熔体弹性也是熵弹性的表现。



拟合曲线: $y = -0.84x + 5.15$ $R^2 = 0.99962$ (80 °C); $y = -0.84x + 5.10$ $R^2 = 0.99945$ (100 °C); $y = -0.83x + 5.06$ $R^2 = 0.99927$ (120 °C)。

(a) ESR



拟合曲线: $y = -0.87x + 5.10$ $R^2 = 0.99992$ (80 °C); $y = -0.88x + 5.10$ $R^2 = 0.99989$ (100 °C); $y = -0.88x + 5.06$ $R^2 = 0.99982$ (120 °C)。

(b) SSBR

挤出温度/°C: ■—80; ●—100; ▲—120。

图9 不同挤出温度下炭黑补强ESBR和SSBR胶料的表观剪切粘度对剪切速率依赖性曲线

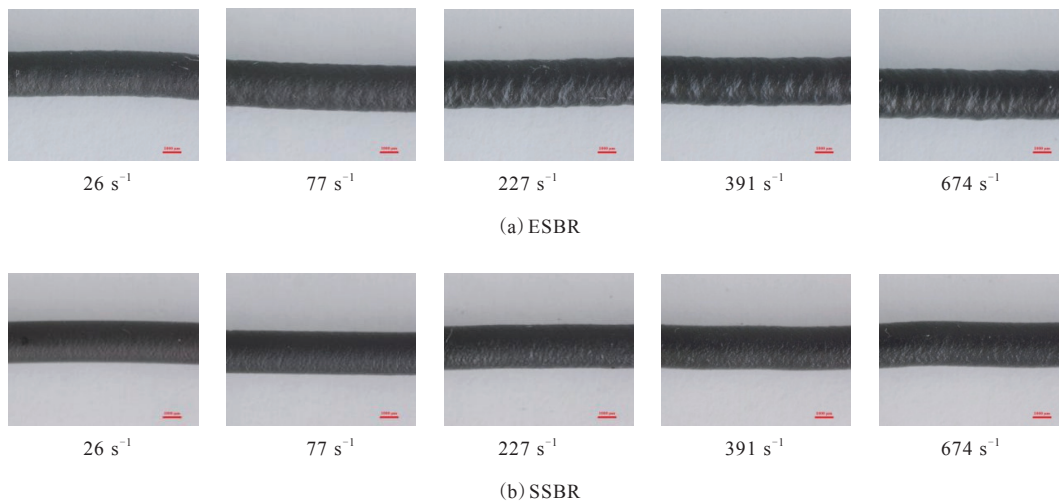
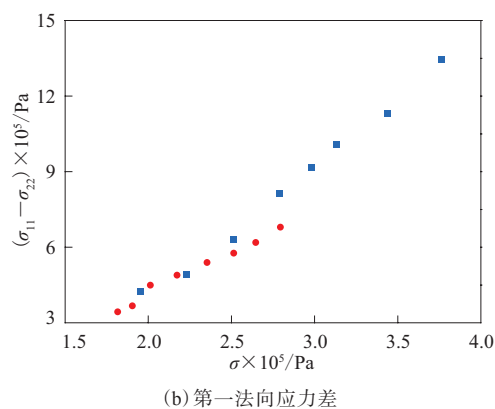
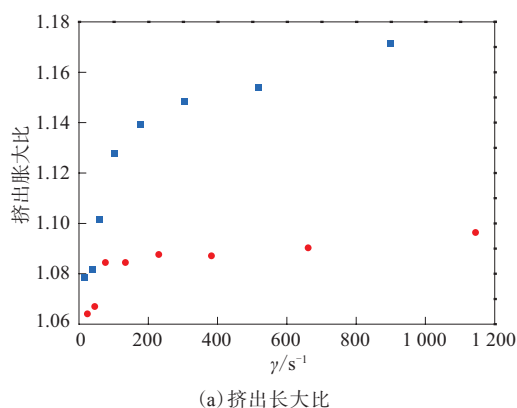


图10 不同剪切速率下炭黑补强ESBR和SSBR胶料挤出物的外观形貌照片

法向应力差是粘弹性流体流动时弹性行为的主要表现,第一法向应力差($\sigma_{11} - \sigma_{22}$)^[12]是流动方向的法向应力与垂直方向的法向应力之差。

炭黑补强ESBR和SSBR胶料的挤出胀大比和第一法向应力差如图11所示,炭黑用量为60份,挤出温度为100 ℃。从图11可以看出:ESBR胶料的挤出胀大比和第一法向应力差均大于SSBR胶料,这说明在挤出过程中ESBR胶料储存较多弹性能量,即在拉伸与剪切流场的作用下,ESBR分子链形变量更大,分子链取向更严重,当脱离毛细管口模后,储存弹性能迅速释放,导致挤出胀大比增大;当剪切速率达到100 s⁻¹时,SSBR胶料挤出胀大比开始平稳增大,而对于ESBR,当剪切速率达到200 s⁻¹时,挤出胀大比才开始平稳增大,这说明SSBR胶料的挤出稳定性更优。

炭黑补强ESBR和SSBR胶料的储能模量(G')对应变(ε)依赖性曲线如图12所示。从图12可以



注同图3。

图11 炭黑补强ESBR和SSBR胶料的挤出胀大比和第一法向应力差

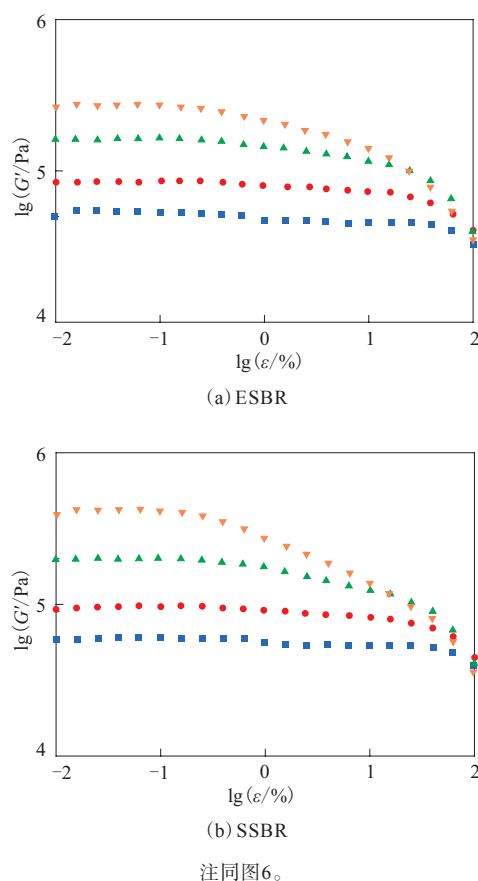


图12 炭黑补强ESBR和SSBR胶料的 G' 对 ε 依赖性曲线
看出:随着炭黑用量增大,两种胶料的储能模量增大;炭黑用量一定时,SSBR胶料的储能模量大于ESBR胶料;当应变达到临界应变值时,随着应变增大,两种填料的储能模量迅速下降,表现出Payne效应。

为比较炭黑在两种胶料中的分散情况,分别计算 $\Delta G'$,结果如表3所示。由表3可知,ESBR胶料的Payne效应更显著,说明ESBR胶料中炭黑网络化程度较高,相反,炭黑在ESBR胶料中的分散性较好。

表3 炭黑补强ESBR和SSBR胶料的 $\Delta G'$ kPa

胶种	炭黑用量/份		
	20	40	60
ESBR	44.5	125.8	231.2
SSBR	52.9	163.3	273.0

为研究在相对分子质量相当情况下ESBR和SSBR与炭黑的相互作用,分别对两种胶料中结合胶含量进行测定^[14],结果如表4所示。由表4可知:炭黑用量为20份时,两种胶料中结合胶含量较少,

表4 炭黑补强ESBR和SSBR胶料中
结合胶质量分数 $\times 10^2$

胶种	炭黑用量/份		
	20	40	60
ESBR	0	14.98	31.58
SSBR	0	10.92	22.07

并未测得数值;炭黑用量为40和60份时,ESBR胶料中结合胶含量明显大于SSBR胶料。分析认为,由于ESBR分子链柔顺性较好,其与炭黑接触更充分,相互作用更强,提高了炭黑在橡胶基体中的分散性,因此ESBR胶料中结合胶含量更高,这表明反式-1,4-聚丁二烯结构比1,2-聚丁二烯结构与炭黑的相互作用更强。

3 结论

(1) 相对分子质量对胶料的表观剪切粘度影响不大。与SSBR相比,ESBR分子链中乙烯基含量低,反式-1,4-聚丁二烯结构含量高,分子链柔顺性好,相同炭黑用量下结合胶含量更高,与炭黑相互作用更强,生胶及其补强胶料的表观剪切粘度和剪切应力更大。

(2) ESBR和SSBR生胶在挤出时均发生整体挤出畸变,随着剪切速率增大,两种生胶与管壁接触面出现粘-滑转变,在高剪切速率下,边界重新稳定;炭黑补强ESBR和SSBR胶料挤出物表面畸变得得到抑制,SSBR胶料挤出稳定性更好,ESBR弹性高,挤出胀大现象更明显。

参考文献:

[1] 万影,朱泉晓,闻获江. 丁苯橡胶/炭黑导电涂层复合材料的工艺稳

定性[J]. 表面技术,1999(1):24-26.

- [2] 马建华,吴友平. 炭黑与白炭黑补强溶聚丁苯橡胶和乳聚丁苯橡胶胎面胶性能的对比研究[J]. 橡胶工业,2012,59(2):84-90.
- [3] Asahiro Ahagon, Yoshiaki Kirino. Mechanochemical Reactions in Black-Filled SBR Vulcanizates Under Large Deformation[J]. Rubber Chemistry and Technology,2007,80(2):265-278.
- [4] Diaz, Rodrigo. Physical Interpretation of the Mullins Softening in a Carbon-Black Filled SBR[J]. Polymer,2014,55(19):4942-4947.
- [5] 黄舟,刘畅,董彬,等. 少量碳纳米管非等量替代炭黑对丁苯橡胶抗疲劳破坏性能的影响[J]. 合成橡胶工业,2014,37(1):52-56.
- [6] 王永军,陈春花,辛振祥. 连续法热解炭黑的性能及其在丁苯橡胶中的应用[J]. 橡胶工业,2017,64(11):660-664.
- [7] Stadler F J, Karimkhani V. Correlations between the Characteristic Rheological Quantities and Molecular Structure of Long-Chain Branched Metallocene Catalyzed Polyethylenes[J]. Macromolecules, 2011,44(13):5401-5413.
- [8] Chookeaw W. Flow Properties and Melt Distortion in Molten Rubber Compounds under Capillary Extrusion[J]. Advanced Materials Research,2013,747:627-630.
- [9] 殷先泽,谭业强,林雷. 核/壳纳米复合粒子填充聚苯乙烯的流变行为[J]. 高分子学报,2012(11):1335-1341.
- [10] 宋义虎,郑强. 气相生长碳纤维填充聚苯乙烯的熔体动态流变行为[J]. 高分子学报,2012(12):1383-1388.
- [11] Arndt K, Annette K, Edmund H. Analysis of the Production of Sponge Rubber Profiles[J]. Macromolecular Materials & Engineering,2000,285(1):70-75.
- [12] 吴其晔. 高分子物理[M]. 北京:高等教育出版社,2011:315.
- [13] 吴其晔,巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京:高等教育出版社,2014:46.
- [14] Bohm G A, Tomaszewski W. Furthering the Understanding of the Non Linear Response of Filler Reinforced Elastomers[J]. Polymer, 2010,51(9):2057-2068.

收稿日期:2017-12-16

Effect of Molecular Structure and Carbon Black on Extrusion Rheological Property of SBR

DING Xingwei, SONG Xinxing, SUN Chong, ZHANG Ping

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The effect of molecular structures of SBR and addition levels of carbon black on extrusion rheological property of compounds was investigated by capillary rheometer and several other measurement characterization methods. The results showed that, the apparent shear viscosity of ESBR was higher than that of SSBR for both of raw rubbers and carbon black reinforced compounds. The extrusion stability of ESBR and SSBR was quite. However, the extrusion stability of carbon black reinforced SSBR compound much

better than that of carbon black reinforced ESB compound, and its appearance quality was better. Compared with SBR, the molecular flexibility of ESB and dispersion of carbon black in ESB matrix were better, and the bound rubber content of carbon black reinforced ESB compound was higher.

Key words: SBR; molecular structure; carbon black; extrusion rheological property