应用理论

不同品种炭黑混炼胶的加工流变性能研究

王茂英[1,2],刘 震[1,2],吉欣宇[1,2],马 晓[3]

(1. 怡维怡橡胶研究院有限公司,山东 青岛 266045;2. 青岛市轮胎新材料重点实验室,山东 青岛 266045;3. 北京橡胶工业研究设计院有限公司,北京 100143)

摘要:研究不同品种炭黑混炼胶在不同测试条件下的加工流变性能。结果表明:炭黑N550的混炼加工性能好,炭黑N134混炼时更易聚集,分散差;混炼胶的门尼粘度和结合橡胶含量随着炭黑结构的增高和比表面积的增大而增大,与炭黑CDBP吸油值的相关性好,相关因数均为0.95;混炼胶的Payne效应与炭黑比表面积和应力松弛面积的相关性好,相关因数均为0.98;混炼胶的挤出胀大比受混炼胶中结合橡胶和包容胶含量的双重影响。

关键词:炭黑;混炼胶;加工性能;流变性能;门尼粘度;应力松弛;结合橡胶;Payne效应

中图分类号:TQ330.1^{+}1;TQ330.38^{+}1 **文章编号**:1000-890X(2021)11-0809-07

文献标志码:A **DOI**:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.11.0809

OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶为聚合物高分子材料,是典型的粘弹性体[1],其弹性行为遵循胡克定律,粘性行为符合牛顿定律。橡胶的弹性是胶料在加工时产生问题的根源。目前用来评价胶料加工行为的仪器很多,常用的有门尼粘度计、橡胶加工分析仪、毛细管流变仪、转矩流变仪等。这些仪器各有特点:门尼粘度计能够在低剪切速率下测试混炼胶的门尼粘度峰值、门尼粘度及门尼松弛,通过门尼松弛可进一步分析不同混炼胶的加工性能;RPA2000橡胶加工分析仪可以在不同的温度、应变、剪切速率下测量混炼胶和硫化胶的动态力学性能,预测混炼胶的加工性能,但不能真实反映混炼胶的实际加工过程;毛细管流变仪操作简单、测量准确、测量范围宽,得到了广泛应用,且毛细管中胶料的流动形式与某些加工成型过程中胶料的流动形式相仿,因而具有实用价值。

本工作主要研究不同品种炭黑(用量均为72份)混炼胶的门尼粘度、RPA2000橡胶加工分析仪应变扫描曲线、毛细管流变挤出性能,希望通过试验确定胶料流变性能与加工性能的相关性规律,以更好地指导混炼胶的生产和加工。

1 实验

1.1 原材料

溶聚丁苯橡胶(SSBR),牌号2564T,意大利埃尼公司产品;顺丁橡胶,牌号BR9000,中国石化齐鲁石化公司产品;炭黑N660,N550,N326,N339,N220,N234和N134,美国卡博特公司产品;其他均为橡胶工业通用原材料。

1.2 试验设备和仪器

XSM-1/10～120型橡塑试验密炼机,上海科创橡塑机械设备有限公司产品;XK-160型开炼机,上海双翼橡塑机械有限公司产品;MV2000型门尼粘度计、RPA2000橡胶加工分析仪和

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0307100)

作者简介:王茂英(1978—),女,山东临沂人,怡维怡橡胶研究院有限公司高级工程师,双学士,主要从事半钢子午线轮胎配方的设计及开发工作。

E-mail:wangmy@everi.com.cn

引用本文:王茂英,刘震,吉欣宇,等.不同品种炭黑混炼胶的加工流变性能研究[J].橡胶工业,2021,68(11):809-815.

Citation: WANG Maoying, LIU Zhen, JI Xinyu, et al. Processing rheological properties of compounds filled with different types of carbon black[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(11): 809-815.

ARC2020型毛细管流变仪，美国阿尔法科技有限公司产品。

1.3 试样制备

胶料分为3段在密炼机中混炼，具体工艺如下。

一段混炼工艺：生胶→压压砣保持40 s→加2/3炭黑→压压砣保持50 s→加剩余炭黑→压压砣保持50 s→提压砣→清扫→压压砣保持30 s→提压砣→清扫→压压砣保持20 s→排料→开炼机下片（辊速为70 r·min^{-1}）。

二段混炼工艺：一段混炼胶→压压砣保持40 s→提压砣→加小料→压压砣保持50 s→提压砣→清扫→压压砣保持40 s→提压砣→清扫→压压砣保持30 s→排料→开炼机下片（辊速为70 r·min^{-1}）。

终炼工艺：二段混炼胶→压压砣保持30 s→提压砣→加硫黄和促进剂→压压砣保持60 s→提压砣→清扫→压压砣保持→排胶（105 ℃）→开炼机薄通3次后下片（辊速为45 r·min^{-1}）。

1.4 测试分析

1.4.1 门尼粘度和门尼松弛

按照GB/T 1232.1—2016进行测试。

1.4.2 结合橡胶质量分数

将混炼胶剪成约1 mm^{3}小碎块，称取质量（记为W_1）约0.5 g（精确至0.000 1 g）的混炼胶封包于线性橡胶大分子能透过而凝胶不能透过的已知质量（记为W_2）的清洁不锈钢网中，浸入150 mL甲苯中浸泡72 h，然后重新换溶剂再浸泡48 h，取出滤网真空干燥至恒质量（记为W_3），按照式（1）计算结合橡胶的质量分数（记为R）。

$$R=\frac{(W_3-W_2)-W_1\times W_f/W_h}{W_1\times W_p/W_h}\times 100\% \quad (1)$$

式中 W_f——配方中不溶于甲苯的填料用量；

W_p——配方中橡胶用量；

W_h——配方总用量。

1.4.3 RPA2000橡胶加工分析仪分析

测试条件：温度 100 ℃；频率 1/3 Hz；应变 2.8%，7%，14%，28%，70%，140%，280%和700%。

1.4.4 毛细管流变仪分析

测试条件：口模 Y400-30RC，长径比（L/D）为30/1，直径（D）为1.016 mm；测试温度 100 ℃；剪切速率 7，169，337，506和675 s^{-1}。

2 结果与讨论

2.1 门尼粘度和应力松弛

门尼粘度是门尼粘度计通过测定转子在转动过程中转动力矩的大小来表征胶料的流动性。应力松弛是在门尼粘度测试结束后，门尼粘度计的电动机在0.1 s内刹车，模腔内被扭转的胶料逐渐松弛，连续测出的扭力变化情况。应力松弛与时间的指数呈正比关系，如式（2）[2]所示。

$$M=kt^a \quad (2)$$

式中 M——应力松弛的门尼值；

t——松弛时间，s；

k——常数，转子停转1 s对应的门尼值。

式（2）两边取对数得到式（3）：

$$\lg M=a\lg t+\lg k \quad (3)$$

方程（3）线性回归，lg$k$和a分别为线性回归直线的截距（b）和斜率；应力松弛面积（A）是应力松弛开始至松弛结束对应的应力松弛曲线的面积，与k和a有关。通常应力松弛参数与混炼胶挤出等加工性能相关。a越大，表示胶料松弛越快，胶料的加工性能越好；A越小，胶料的加工性能也越好。

不同炭黑品种混炼胶的门尼粘度和应力松弛参数如图1所示。混炼胶的门尼粘度峰值是混炼胶在停放过程中填料发生聚集而达到的最大门尼粘度，门尼粘度峰值大对混炼胶的加工不利。混炼胶的门尼粘度峰值、应力松弛参数（a，b，A）、炭黑结构（吸油值）和比表面积与门尼粘度的相关性如图2—4所示（r为相关因数）。

分析图1—3可以得出，随着炭黑品种的变化，混炼胶的门尼粘度和应力松弛参数不同。炭黑N660和N326混炼胶的门尼粘度接近且较小；炭黑N550，N339，N220，N234和N134混炼胶的门尼粘度峰值、门尼粘度、b和A依次呈增大趋势；门尼粘度与门尼粘度峰值和b的相关性较好，r分别为0.99

和0. 96。

分析图4可以得出：混炼胶的门尼粘度随着炭黑结构的升高和比表面积的增大而增大；混炼胶的门尼粘度与CDBP吸油值的相关性（r=0. 95）比与DBP吸油值的相关性（r=0. 79）好，这是因为CDBP吸油值是将一定量干燥过的炭黑在165 MPa的压力下压缩4次后测得的DBP吸油值，该值能够反应炭黑的真实结构，预压破坏了某些聚结体的结构，而这种破坏程度更接近于胶料混炼时的真实情况[3]。高结构炭黑在混炼过程中聚结体较易被打破，炭黑结构打破能够产生更多新鲜表面，减小炭黑聚结体尺寸，增大单位体积橡胶-炭黑界面面积[4]。混炼胶的门尼粘度与炭黑比表面积的相关性（r=0. 89）比与CDBP吸油值差。高比表面积的炭黑表面活性高，橡胶-填料的作用增强，混炼胶的门尼粘度增大，而炭黑N134混炼胶的门尼粘度比炭黑N234混炼胶略小，可能是炭黑N134比表面积大，混炼时填料易聚集而分散差导致的；炭黑N660和N326混炼胶的门尼粘度小与其结构低有关。

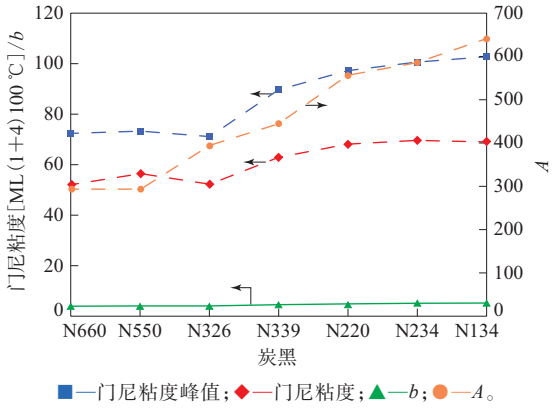


图1　不同炭黑品种混炼胶的门尼粘度和应力松弛参数

Fig. 1　Mooney viscosities and stress relaxation parameters of compounds with different carbon black varieties

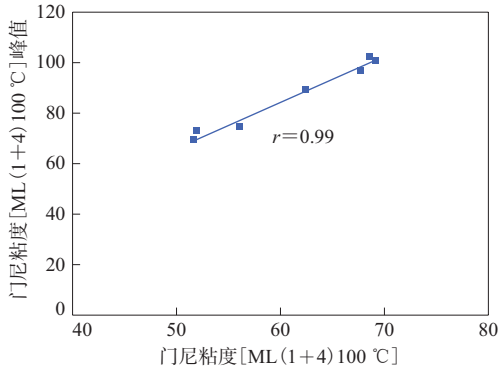


图2　混炼胶的门尼粘度峰值与门尼粘度的相关性

Fig. 2　Correlation between Mooney viscosity peaks and Mooney viscosities of compounds

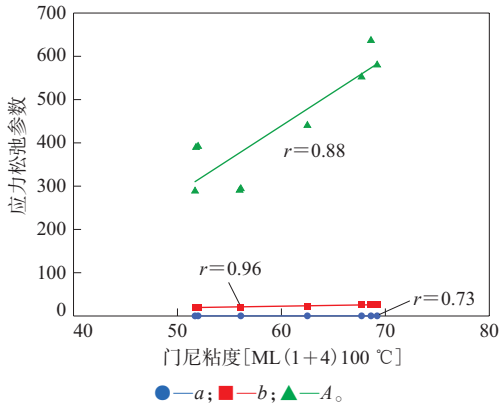


图3　混炼胶的应力松弛参数与门尼粘度的相关性

Fig. 3　Correlations between stress relaxation parameters and Mooney viscosities of compounds

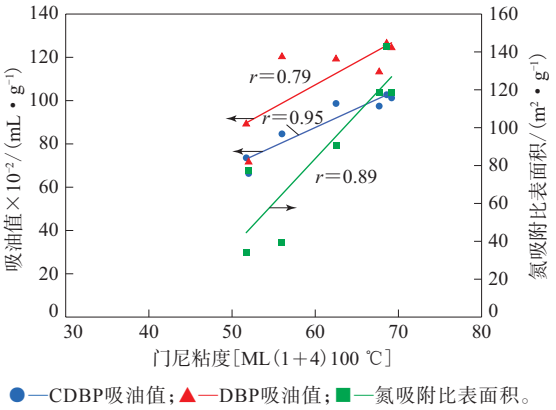


图4　混炼胶的炭黑结构和比表面积与门尼粘度的相关性

Fig.4　Correlations between structures and specific surface areas of carbon black and Mooney viscosities of compounds

2. 2　结合橡胶质量分数

结合橡胶是指混炼胶在橡胶的良好溶剂中经过规定时间的抽取后不再从填料中分离出来的那部分橡胶[5]，是填料表面上吸附的橡胶，是填料与橡胶间界面层中的橡胶，具有类似玻璃态的特点。结合橡胶质量分数增大，硫化胶的模量、耐磨性能和滞后性能等均有改善，因此结合橡胶质量

分数常被作为补强性的量度。不同炭黑品种混炼胶的结合橡胶质量分数如图5所示，炭黑结构和比表面积与混炼胶结合橡胶质量分数的相关性如图6所示。

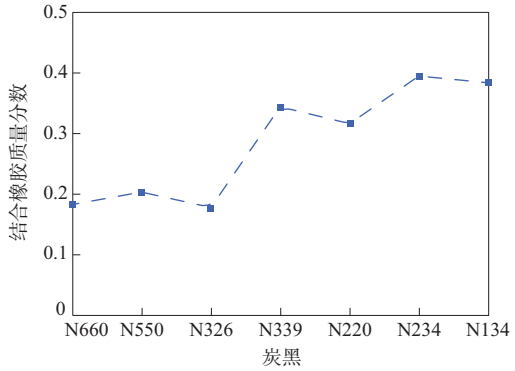
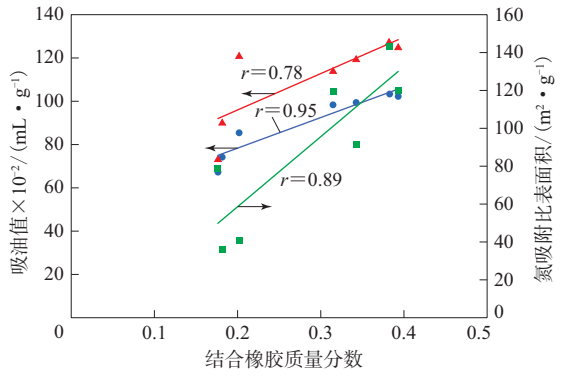


图5 不同炭黑品种混炼胶的结合橡胶质量分数

Fig. 5 Bound rubber mass fractions of compounds with different carbon black varieties



注同图4。

图6 炭黑结构和比表面积与混炼胶的结合橡胶质量分数的相关性

Fig. 6 Correlations between structures and specific surface areas of carbon black and bound rubber mass fractions of compounds

从图5可以看出：混炼胶的结合橡胶质量分数受炭黑品种影响显著，结合橡胶质量分数从小到大依次为炭黑N326，N660，N550，N220，N339，N134和N234混炼胶；炭黑N326混炼胶的结合橡胶质量分数最小，这可能与其结构低有关；炭黑N234混炼胶的结合橡胶质量分数最大，略大于炭黑N134混炼胶，炭黑N234与炭黑N134的CDBP吸油值接近，但炭黑N134的比表面积更大，混炼时更易聚集，影响橡胶-填料的相互作用。

分析认为，高结构炭黑混炼胶的结合橡胶质量分数较大主要是由于混炼过程中聚结体较易被打破的缘故[6]，聚结体打破产生新鲜表面，有利于增大炭黑比表面积，而炭黑比表面积增大能够增强橡胶-填料的相互作用。从图6可以看出，混炼胶结合橡胶质量分数与CDBP吸油值相关性好（r=0.95）。另外，混炼胶的门尼粘度与结合橡胶质量分数的相关性也较好（r=0.95）。

2.3 RPA2000橡胶加工分析仪分析

测量胶料的弹性和粘性有助于表征胶料的特性以及最终的成品性能。RPA2000橡胶加工分析仪可以同时测定胶料的弹性模量（G'）和粘性模量[7]。

经研究[8-11]发现，炭黑填充橡胶形成的聚集态结构或三维网络结构会显著改变混炼胶的动态模量与应变的相关性，模量随应变的增大而减小，这种现象被称为Payne效应。炭黑品种对混炼胶的G'-应变曲线的影响如图7所示，炭黑结构和比表面积与混炼胶的$\Delta G'$（应变为7.0%时的G'与应变为700%时的G'之差）的相关性如图8所示，混炼胶的门尼粘度和应力松弛参数与$\Delta G'$的相关性如图9所示。

从图7可以看出，随着应变的增大，混炼胶的G'非线性下降，这是因为随着应变的增大填料聚集体中的包容胶释放增多，填料的有效体积分数减小，G'减小。Payne效应可作为填料-填料、橡胶-填料相互作用的量度[12]，随着炭黑比表面积的

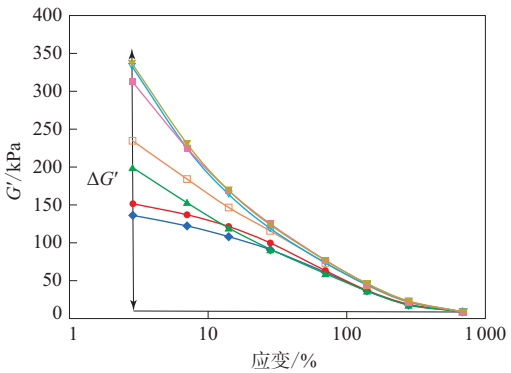
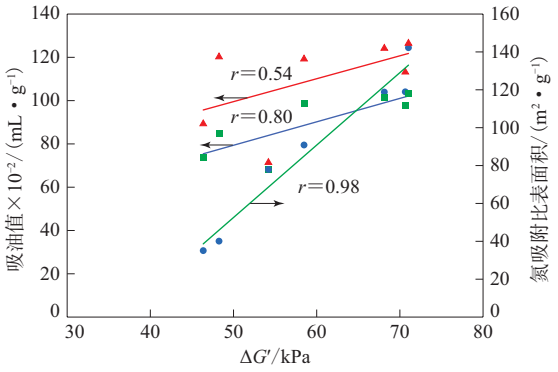


图7 炭黑品种对混炼胶的G'-应变曲线的影响

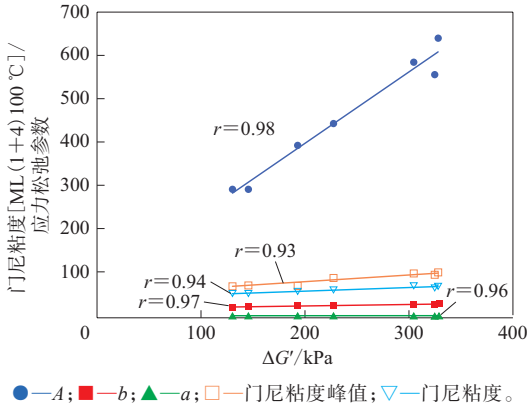
Fig. 7 Effect of carbon black varieties on G'-strain curves of compounds



注同图4。

图8　炭黑结构和比表面积与混炼胶的ΔG'的相关性

Fig. 8　Correlations between structures and specific surface areas of carbon black and ΔG' of compounds



●—A；■—b；▲—a；□—门尼粘度峰值；▽—门尼粘度。

图9　混炼胶的门尼粘度和应力松弛参数与ΔG'的相关性

Fig. 9　Correlations between Mooney viscosities and stress relaxation parameters and ΔG' of compounds

增大混炼胶的Payne效应呈增强趋势。

从图8可以看出，混炼胶的ΔG'与炭黑比表面积的相关性好（r=0.98），与CDBP吸油值的相关性略差（r=0.80），表明高比表面积炭黑混炼时更难分散，更容易产生聚集；炭黑N220与炭黑N234的氮吸附比表面积接近（约为119 $m^2 \cdot g^{-1}$），而炭黑N220混炼胶的Payne效应略高于炭黑N234混炼胶，是因为炭黑N234的结构高，能够提高混炼胶中炭黑分散，降低填料的网络化。

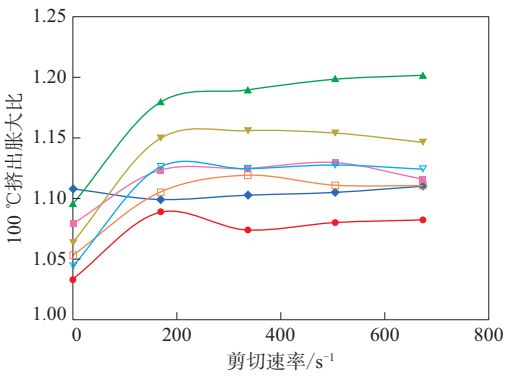
从图9可以看出，混炼胶的ΔG'与各应力松弛参数的相关性好，特别是与应力松弛面积A的相关性最好（r=0.98）。从原理上分析，橡胶是粘弹性材料，既有弹性也有粘性，ΔG'和应力松弛都表征混炼胶的弹性。Payne效应是混炼胶在一定温度和频率下，G'随应变的变化；应力松弛是门尼粘度计的转子停止运转后，模腔内被扭转的混炼胶发生一定的弹性形变而恢复弹性形变要产生一定的作用力。混炼胶测试时可用应力松弛面积A来快速、粗略地表征填料的聚集情况。

2.4　毛细管流变仪分析

毛细管流变仪是目前发展成熟、应用广泛的流变性能测量仪器之一[13]。在毛细管出口区，粘弹性流体表现出特殊的流动行为，主要表现为挤出胀大及出口压力降不为零。毛细管流变仪胶料挤出胀大归因于两方面：首先是胶料在入口区受剧烈拉伸而产生的形变在毛细管内得到部分松弛，但在出口处没有完全松弛，表现为挤出胀大；其次是胶料在毛细管内受到剪切力的作用，发生拉伸和取向，这部分弹性力在挤出后也会松弛[14-16]。

混炼胶挤出过程是一个复杂的过程，除受外在因素如混炼温度、时间、加料顺序、转子转速和挤出温度、螺杆转速等的影响外，还受内在因素如配方所用生胶、填料、助剂等品种和用量的影响[17-19]。就挤出外观而言，炭黑N326和炭黑N134混炼胶的挤出表面粗糙，其余炭黑混炼胶挤出表面光滑，其中炭黑N550混炼胶挤出表面最好。不同炭黑品种混炼胶的挤出胀大比如图10所示。

从图10可以看出，挤出胀大比最小的是炭黑



注同图7。

图10　不同炭黑品种混炼胶的挤出胀大比

Fig. 10　Extrusion swell ratios of compounds with different carbon black varieties

N550混炼胶，最大的是炭黑N326混炼胶，而高结构、高比表面积的炭黑N134混炼胶的挤出胀大比小于炭黑N326混炼胶。混炼胶的门尼粘度、应力松弛面积*A*、结合橡胶质量分数、Payne效应都影响加工性能，传统意义上前三者越小加工性能越好，Payne效应越强加工性能越好，这却不能对图10进行合理解释。

本研究配方的差异是炭黑品种，即各配方中炭黑结构和比表面积不同，这两者的直接表现形式是混炼胶中结合橡胶和包容胶的含量，原则上结合橡胶质量分数大，混炼胶的挤出胀大比大；包容胶含量大，混炼胶的挤出胀大比小，但混炼胶实际挤出时主要看这两者中谁占主导。结构高的炭黑混炼时聚结体断裂，产生更多新鲜表面，生成结合橡胶多，挤出胀大比增大；同时结构高的炭黑在混炼时聚集的空隙大易形成包容胶。炭黑胶料混炼时一方面炭黑聚集形成包容胶，含胶率相对下降，填料的有效体积变大，挤出胀大比减小；另一方面炭黑表面活性点高，橡胶-填料作用强，有利于结合橡胶的生成。如炭黑N550和炭黑N326，其一方面比表面积小，粒径大，聚集形成的包容胶少；另一方面炭黑N550是快压出炉黑，结构高，聚集形成包容胶多，致使相应混炼胶的挤出胀大比小，而炭黑N326是低结构炭黑，聚集形成的包容胶仍较少，混炼胶的相对含胶率高，挤出胀大比大。炭黑N234混炼胶的结合橡胶质量分数大于炭黑N134混炼胶，但挤出胀大比小于炭黑N134混炼胶，这是因为炭黑N134比表面积大，填料网络化程度高，影响聚集时包容胶的形成。

3 结论

（1）炭黑N550的混炼加工性能好，炭黑N134在混炼时更易聚集，分散差。

（2）混炼胶的门尼粘度和结合橡胶质量分数随着炭黑结构的增高和比表面积的增大呈增大趋势，与表征炭黑结构的CDBP吸油值的相关性好（$r=0.95$）。

（3）混炼胶的Payne效应与炭黑比表面积和应力松弛面积*A*的相关性（$r=0.98$）好。

（4）混炼胶的挤出胀大比受混炼胶中结合橡胶、包容胶含量的双重影响。

致谢：诚恳感谢对本工作测试与试验过程给予帮助的怡维怡橡胶研究院有限公司分析测试中心及部门同事。

参考文献：

[1] 刘文武，翁雪清，朱石坚，等.确定橡胶粘弹性模型参数的优化反推法研究[J].振动与冲击，2010，29(4)：185-188.
LIU W W，WENG X Q，ZHU S J，et al. Study on anti-optimization method to identify the paremeters of viscoelastic model of rubber[J]. Journal of Vibration and Shock，2010，29(4)：185-188.

[2] The American Society for Testing and Materials. Standard test methods for rubber—viscosity，stress relaxation，and pre-vulcanization characteristics (Mooney viscometer)：ASTM D 1646-07[S].West Conshohocken，PA，USA：ASTM International，2007.

[3] WANG M J，郭隽奎，张秀英. 炭黑的性质、生产方法及其应用(续1)——美国2004年版《化工百科全书》“炭黑”词条的译文[J]. 炭黑工业，2006(5)：9-14.
WANG M J，GUO J K，ZHANG X Y. Properties，production methods and applications of carbon black (Continued 1)—Translation of “carbon black” entry in *Encyclopedia of Chemical Engineering* (2004 Edition) of the USA[J]. Carbon Black Industry，2006(5)：9-14.

[4] 王梦蛟. 聚合物-填料和填料-填料相互作用对填充硫化胶动态力学性能的影响(续2)[J]. 轮胎工业，2000，20(12)：737-744.
WANG M J. The effect of polymer-filler and filler-filler interaction on dynamic mechanical properties of filled vulcanizates (Continued 2)[J]. Tire Industry，2000，20(12)：737-744.

[5] 朱文靖. 天然橡胶补强的研究进展[J]. 热带农业工程，2006(1)：11-15.
ZHU W J. Study developments on NR reinforcement[J]. Tropical Agricultural Engineering，2006(1)：11-15.

[6] 王茂英，刘震，吉欣宇.偶联剂Si69用量对白炭黑胶料性能的影响[J].轮胎工业，2019，39(11)：678-682.
WANG M Y，LIU Z，JI X Y. Effect of addition level of coupling agent Si69 on property of silica filled compound[J]. Tire Industry，2019，39(11)：678-682.

[7] 王贵一. RPA2000橡胶加工分析仪在橡胶研究中的应用[J]. 特种橡胶制品，2001，22(1)：56-62.
WANG G Y. Application of rubber processability tester RPA2000 to rubber study[J]. Special Purpose Rubber Products，2001，22(1)：56-62.

[8] PAYNE A R. Reinforcement of elastomers[M]. New York，USA：Interscience Publishers Inc，1965.

[9] PAYNE A R，WHITTAKER R E，SMITH J F. Effect of vulcanization on low-strain dynamic properties of filled rubbers[J]. Journal of

Applied Polymer Science，1972，16(5)：1191-1212.

[10] HARWOOD J A C，MULLINS L，PAYNE A R. Stress softening in natural rubber vulcanizes (Part Ⅱ)：Stress softening effects in pure gum and filler loaded rubbers[J]. Journal of Applied Polymer Science，1965，9(9)：3011-3021.

[11] PAYNE A R. Effect of dispersion on dynamic properties of filler-loaded rubbers[J]. Journal of Applied Polymer Science，l965，9(6)：2273-2284.

[12] 王梦蛟.填料-弹性体相互作用对填充硫化胶滞后损失、湿摩擦性能和磨耗性能的影响[J].轮胎工业，2007，27(10)：579-584.
WANG M J. Effect of filler-elastomer interaction on hysteresis，wet friction and abrasion of filled vulcanizates[J].Tire Industry，2007，27(10)：579-584.

[13] 周持兴.聚合物流变试验与应用[M].上海：上海交通大学出版社，2003.

[14] 王克俭.聚合物挤出胀大的一个定量模型及应用[J].高分子材料科学与工程，2011，27(1)：161-165.
WANG K J. A quantitative model of extrudate swell for polymers and its applications[J]. Polymer Materials Science & Engineering，2011，27(1)：161-165.

[15] 柳和生，熊洪槐，涂志刚，等.聚合物挤出胀大研究进展[J].塑性工程学报，2001，8(1)：13-18.
LIU H S，XIONG H H，TU Z G. The advances in study on extrudate swell of polymer[J]. Journal of Plasticity Engineering，2001，8(1)：13-18.

[16] 黄益宾，柳和生，黄兴元.聚合物双组分复合共挤成型的挤出胀大研究[J].应用基础与工程科学学报，2010，18(4)：657-665.
HUANG Y B，LIU H S，HUANG X Y. Study on extrudate swell in polymer bicomponent coextrusion process[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2010，18(4)：657-665.

[17] 刘彦昌，于芳，马冲，等. 冷喂料橡胶挤出机的喂料行为[J]. 高分子材料科学与工程，2020，36(10)：103-108.
LIU Y C，YU F，MA C，et al. Feeding behaviour of cold-feed rubber extruders[J]. Polymer Materials Science & Engineering，2020，36(10)：103-108.

[18] 赵婧. 橡胶挤出机总体布局和传动系统的设计[J]. 橡塑技术与装备，2020，46(9)：51-57.
ZHAO J. Overall layout of the rubber extruder and the design of the transmission system[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment，2020，46(9)：51-57.

[19] 李建.天然橡胶混炼工艺及其流变和挤出行为的相关性[D].青岛：青岛科技大学，2018.

收稿日期：2021-05-22

Processing Rheological Properties of Compounds Filled with Different Types of Carbon Black

WANG Maoying[1,2]，*LIU Zhen*[1,2]，*JI Xinyu*[1,2]，*MA Xiao*[3]

（1. EVE Rubber Institute Co.，Ltd，Qingdao　266045，China；2. Key Laboratory for Advanced Tire Materials Qingdao，Qingdao　266045，China；3. Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry Co.，Ltd，Beijing　100143，China）

Abstract：The processing rheological properties of the compounds filled with different types of carbon black under various testing conditions were studied. The results showed that carbon black N550 had good mixing performance，while carbon black N134 was more likely to aggregate and had poor dispersion in the mixing process. The Mooney viscosity and bound rubber content of the compound increased with the increase of carbon black structure and specific surface area，and they had good correlations with the CDBP oil absorption value of the carbon black with a correlation coefficient of 0. 95. In addition，the Payne effect of the compound had a good correlation with the specific surface area and stress relaxation area of the carbon black，and the correlation factor was 0. 98. The extrusion swelling ratio of the compound was affected by the content of both bound rubber and trapped rubber.

Key words：carbon black；compound；processing property；rheological property；Mooney viscosity；stress relaxation；bound rubber；Payne effect

欢迎在《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》杂志上刊登广告