

工艺·设备

# 混炼工艺及白炭黑/炭黑并用比对NR胶料性能的影响

于博全<sup>1,2</sup>, 林广义<sup>1,2\*</sup>, 王宏<sup>1,2</sup>, 屈思远<sup>1,2</sup>, 王佳<sup>1,2</sup>

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 山东省高分子材料先进制造重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 采用液相叠层法混炼工艺制备NR胶料, 研究白炭黑/炭黑并用比对NR胶料性能的影响, 并与采用干法混炼工艺制备的NR胶料对比。结果表明: 随着白炭黑/炭黑并用比的增大, 采用两种混炼工艺的NR混炼胶的 $F_L$ 和 $F_{max}$ 均呈增大趋势,  $t_{10}$ 和 $t_{90}$ 基本呈延长趋势, 采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的 $t_{90}$ 比采用干法混炼工艺的NR混炼胶略有缩短; 采用两种混炼工艺的NR硫化胶的Payne效应呈增强趋势, 填料分散效果变差; 采用两种混炼工艺的NR混炼胶的导热性能呈下降趋势, 采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的导热性能优于采用干法混炼工艺的NR混炼胶; 采用两种混炼工艺的NR硫化胶的硬度、拉伸强度和拉伸伸长率总体呈下降趋势, 采用液相叠层法混炼工艺的NR硫化胶的撕裂强度逐渐下降, 采用干法混炼工艺的NR硫化胶的撕裂强度先降低再提高再降低; 采用干法混炼工艺的NR混炼胶易出现气孔现象, 采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的气泡减少, 炭黑团聚程度更小, 分散更为均匀。

**关键词:** 混炼工艺; 液相叠层法; 白炭黑; 炭黑; 并用比; NR; 硫化特性; 物理性能; 分散性

**中图分类号:** TQ330.6<sup>+</sup>3; TQ330.38<sup>+</sup>1<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X(2021)11-0847-07

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.11.0847



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

混炼是橡胶加工中一道关键工序, 直接影响橡胶制品的性能。传统的胶料混炼工艺大多采用密炼机干法混炼, 其能耗占橡胶制品生产能耗的40%左右, 特别是白炭黑胶料混炼, 因白炭黑不易混合, 往往需要多段混炼, 会对环境造成更严重的污染<sup>[1-2]</sup>。对混炼工艺进行创新、开发新节能混炼工艺是目前橡胶行业发展的重点之一。

橡胶湿法混炼工艺是以胶乳和粉状填料为原料, 先将粉状填料分散在水中制成分散液, 然后将粉状填料分散液与胶乳混合, 经过凝聚共沉、脱水干燥等过程制成混炼胶, 以达到填料分散均匀、改善硫化胶物理性能的目的, 同时生产过程中降低了能耗, 减少了粉尘污染, 更易实现生产的连续化

和自动化<sup>[3-9]</sup>。

本工作在湿法混炼工艺的基础上进一步创新, 采用液相叠层法混炼工艺制备NR胶料, 探究白炭黑/炭黑并用比对NR胶料性能的影响, 并与采用干法混炼工艺制备的NR胶料进行对比, 以期解决干法混炼工艺能耗大、环保性差等问题。

## 1 实验

### 1.1 原材料

天然胶乳(总固形物质量分数为0.6, pH值约为10.0), 青岛华夏橡胶有限公司产品; 炭黑N115, 上海卡博特化工有限公司产品; 白炭黑, 牌号1165MP, 罗地亚白炭黑(青岛)有限公司产品; 甲

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目(U1606401); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程项目)(2020CXGC010312)

**作者简介:** 于博全(1996—), 男, 山东烟台人, 青岛科技大学硕士研究生, 现为软控股份有限公司机械设计工程师, 主要从事高分子材料成型的研究工作。

\*通信联系人(59401939@qq.com)

**引用本文:** 于博全, 林广义, 王宏, 等. 混炼工艺及白炭黑/炭黑并用比对NR胶料性能的影响[J]. 橡胶工业, 2021, 68(11): 847-853.

**Citation:** YU Boquan, LIN Guangyi, WANG Hong, et al. Effects of mixing process and silica/carbon black blending ratio on properties of NR compound[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(11): 847-853.

酸(絮凝剂),国药集团化学试剂有限公司产品;氧化锌、硬脂酸、防老剂4010、促进剂MBTS和硫黄,市售品。

## 1.2 基本配方

天然胶乳 100(以总固形物计),白炭黑/炭黑 50,硅烷偶联剂Si69 1.5,氧化锌 4,硬脂酸 2,防老剂4010 2,硫黄 2,促进剂MBTS 1.3。

## 1.3 主要设备和仪器

X300型哈克密炼机和XKJ-150型开炼机(辊速比为1:1.25),青岛科技大学产品;CH-01BM型超声波清洗机,苏州创辉电子有限公司产品;QLB-400×400×2型平板硫化机,上海第一橡胶机械厂有限公司产品;M-2000-AN型无转子硫化仪,中国台湾高铁检测仪器有限公司产品;RPA2000橡胶加工分析仪,美国阿尔法科技有限公司产品;LFA447型激光闪光导热分析仪,德国耐驰公司产品;LX-A型硬度计,上海六菱仪器厂产品;AI-70000M型万能拉力试验机,高铁检测仪器(东莞)有限公司产品;UD-3500型炭黑分散度测试仪,中国台湾优肯科技股份有限公司产品。

## 1.4 试样制备

### 1.4.1 液相叠层法混炼

为保证液相叠层法混炼过程中粉状填料分散液的稳定,避免分散液中物质产生分层状态,需降低分散液中物质的沉降速度<sup>[10]</sup>,因此使用球磨机将分散相磨得尽可能细。液相叠层法混炼工艺过

程如图1所示。

(1)将小料和白炭黑在球磨机中研磨后倒入烧杯,加入适量去离子水,超声振荡30 min。

(2)将炭黑加入烧杯中,再次超声振荡30 min。

(3)将超声振荡混合液转移至机械搅拌机内并搅拌,转子转速为 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,在搅拌过程中缓慢加入天然胶乳,混合10 min后制得胶乳混合液。

(4)将胶乳混合液加入特调喷枪中并再次搅拌。

(5)使用特调喷枪将胶乳混合液在平台上喷洒一层,同时将配置好的稀甲酸用喷壶均匀喷洒在胶乳混合液上以絮凝,取下该层絮凝胶乳,重复该过程并将絮凝胶层层堆叠。

(6)将堆叠的絮凝胶放置于干燥箱中烘烤12 h。

(7)将烘干的絮凝胶在开炼机上过辊后剪成条状,再在干燥箱中干燥12 h。

(8)开炼机辊温设定为 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,将干燥的絮凝胶加入开炼机混炼,包辊1 min后加入硫黄和促进剂,混炼2 min后左右割刀各5次,打三角包和卷片10次,下片。混炼胶停放12 h备用。

### 1.4.2 干法混炼

(1)将白炭黑在球磨机中研磨后倒入烧杯,加入适量去离子水,超声振荡30 min。

(2)将超声振荡液转移至机械搅拌机内并搅拌,转子转速为 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,边搅拌边缓慢加入天

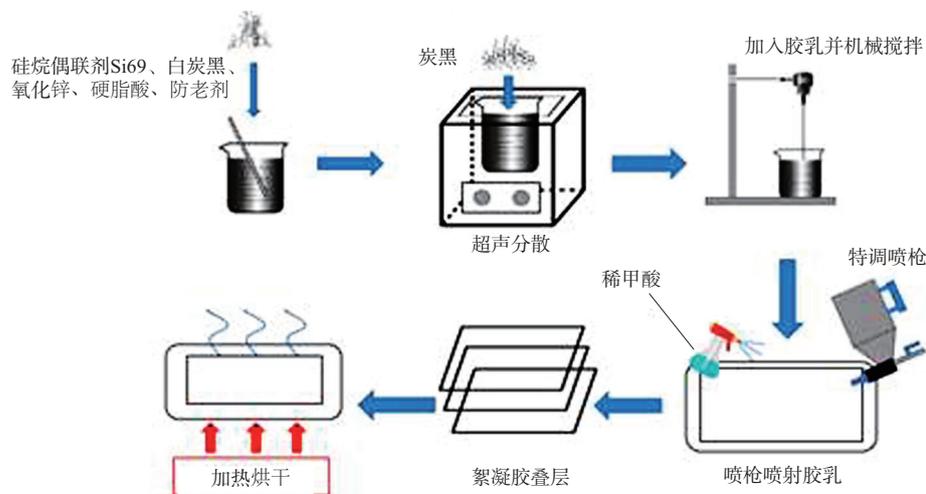


图1 液相叠层法混炼工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of liquid phase lamination mixing process

然胶乳,混合10 min后制得胶乳混合液。

(3) 向胶乳混合液中加入甲酸以使胶乳絮凝,将絮凝胶剪成条状。

(4) 密炼机密炼初始温度为90 ℃,转子转速为80 r·min<sup>-1</sup>,放入絮凝胶混炼1 min,然后加入小料混炼1 min,加入炭黑(分2次加入,每次混炼1 min),混炼均匀后排胶。

(5) 开炼机辊温设定为30 ℃,将一段混炼胶加入开炼机混炼,包辊1 min后加入硫黄和促进剂,混炼2 min后左右割刀各5次,打三角包和卷片10次,下片。混炼胶停放12 h备用<sup>[11]</sup>。

### 1.4.3 硫化工艺

混炼胶放入压片模具中,在平板硫化机上硫化,硫化条件为150 ℃/10 MPa×*t*<sub>90</sub>。硫化胶停放12 h后进行性能测试。

### 1.5 测试分析

(1) 硫化特性。硫化特性按照GB/T 16584—1996《橡胶用无转子硫化仪测定硫化特性》测试,温度 150 ℃,时间 30 min,频率 100 Hz。

(2) Payne效应。采用RPA2000橡胶加工分析仪进行应变扫描和频率扫描。应变扫描条件为:应变范围 0.7%~70%,频率 0.1 Hz,温度 120 ℃。频率扫描条件为:频率范围 0.10~15 Hz,温度 120 ℃,应变 7%。

(3) 导热性能。混炼胶(12.7 mm×12.7 mm)放置在导热分析仪的自动进样器中,采用温度传感器测试温度。

(4) 物理性能。硬度按照GB/T 2411—2008《塑料和硬橡胶 使用硬度计测定压痕硬度(邵氏硬度)》进行测试;拉伸性能按照GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》进行测试(哑铃状试样),撕裂强度按照GB/T 529—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶 撕裂强度的测定(裤形、直角形和新月形试样)》进行测试(直角形试样),拉伸速率均为500 mm·min<sup>-1</sup>。

(5) 炭黑分散性。采用炭黑分散度测试仪观测混炼胶的炭黑分散状态。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硫化特性

白炭黑/炭黑并用比和混炼工艺对NR混炼胶

硫化特性的影响见表1。

表1 白炭黑/炭黑并用比和混炼工艺对NR混炼胶硫化特性的影响  
Tab.1 Effect of silica/carbon black blending ratios and mixing processes on vulcanization characteristics of NR compounds

项 目	白炭黑/炭黑并用比			
	10/40	20/30	30/20	40/10
<i>F</i> <sub>L</sub> /(dN·m)				
液相叠层法混炼	1.03	1.11	1.26	1.34
干法混炼	1.20	1.56	1.68	1.86
<i>F</i> <sub>max</sub> /(dN·m)				
液相叠层法混炼	10.15	11.22	11.35	12.37
干法混炼	11.38	11.64	12.71	13.90
<i>t</i> <sub>10</sub> /min				
液相叠层法混炼	1.05	1.59	1.54	1.68
干法混炼	1.17	1.26	1.37	1.54
<i>t</i> <sub>90</sub> /min				
液相叠层法混炼	5.32	5.35	4.49 <sup>1)</sup>	5.56
干法混炼	4.94	5.99	6.49	6.56

注:1) 该数据可能存在试验误差。

从表1可以看出:随着白炭黑/炭黑并用比的增大,采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的*F*<sub>L</sub>和*F*<sub>max</sub>均呈增大趋势,这是由于填料网络结构的生成使胶料的流动性降低的缘故;*t*<sub>10</sub>和*t*<sub>90</sub>基本呈延长趋势,表明胶料的加工安全性提高,硫化速率降低,这是由于白炭黑为无机纳米填料,与NR的相容性较差的缘故。

从表1还可以看出,白炭黑/炭黑并用比相同时,采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的*t*<sub>90</sub>比采用干法混炼工艺的NR混炼胶略有缩短(白炭黑/炭黑并用比为10/40除外),这可能是因为采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的填料分散均匀性比采用干法混炼工艺的NR混炼胶好,因此其导热性能更好,热传导更快,从而*t*<sub>90</sub>缩短。

### 2.2 Payne效应

白炭黑/炭黑并用比对采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的储能模量(*G'*)-应变( $\epsilon$ )曲线的影响分别如图2和3所示。Payne效应用来表征无机填料在胶料中的分散效果,随着应变的增大,储能模量降幅( $\Delta G'$ )越小,Payne效应越弱,表明填料的分散性越好。

从图2可知,随着白炭黑/炭黑并用比的增大,采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的 $\Delta G'$ 增大,Payne效应呈增强趋势,填料分散效果变差。

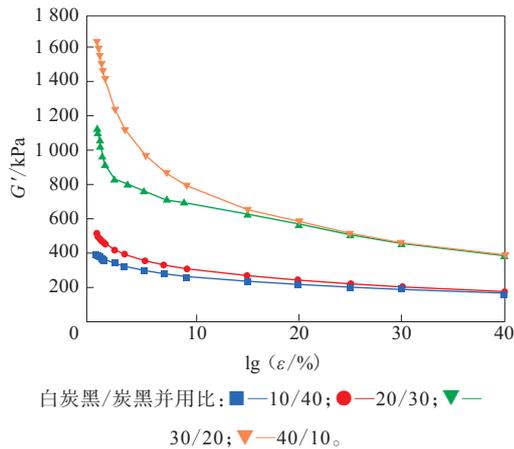


图2 白炭黑/炭黑并用比对采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶 $G'$ - $\varepsilon$ 曲线的影响  
Fig. 2 Effect of silica/carbon black blending ratios on  $G'$ - $\varepsilon$  curves of NR compounds with liquid phase lamination mixing process

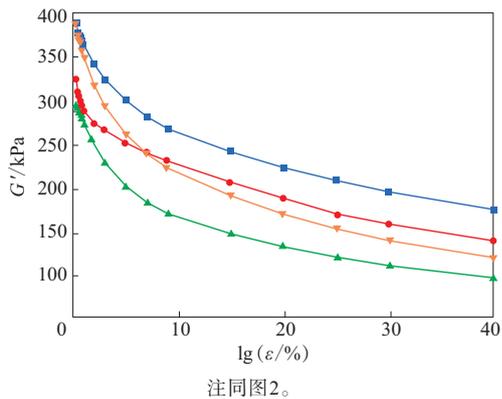


图3 白炭黑/炭黑并用比对采用干法混炼工艺的NR混炼胶 $G'$ - $\varepsilon$ 曲线的影响  
Fig. 3 Effect of silica/carbon black blending ratios on  $G'$ - $\varepsilon$  curves of NR compounds with dry mixing process

这是由于炭黑与白炭黑并用时,白炭黑占比增大,混炼胶内部形成的结合点减少,交联化网络结构较差,即使是在液态更易混合的情况下,混炼过程中白炭黑相比于炭黑仍更容易团聚,导致胶料的混炼不均匀性增强。

从图3可以看出:采用干法混炼工艺时,以炭黑为主导的补强体系,混炼胶的混炼效果好;随着白炭黑/炭黑并用比的增大,混炼胶的 $\Delta G'$ 呈增大趋势,Payne效应呈增强趋势,填料分散效果变差。

### 2.3 导热性能

白炭黑/炭黑并用比和混炼工艺对NR混炼胶导热性能的影响见图4。

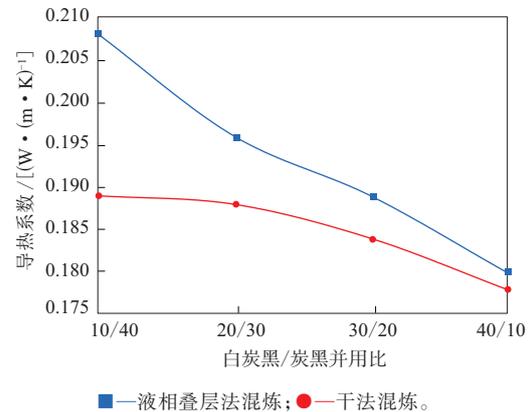


图4 炭黑/白炭黑并用比和混炼工艺对NR混炼胶导热性能的影响

Fig. 4 Effect of silica/carbon black blending ratios and mixing processes on thermal conductivity of NR compounds

从图4可以看出:随着白炭黑/炭黑并用比的增大, NR混炼胶的导热性能呈降低趋势;采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的导热性能优于采用干法混炼工艺的NR混炼胶。分析认为:白炭黑/炭黑并用比增大,白炭黑团聚现象加重,胶料的混炼均匀性下降,不能形成良好的导热网络,其导热性能下降;采用液相叠层法工艺时胶料混炼过程中填料分散更均匀,混炼胶的导热性能更高。

### 2.4 物理性能

炭黑用量小于一定值时,其在胶料中的分散程度大体相同;炭黑用量达到一定值时,其会大幅提升硫化胶的物理性能;炭黑用量过大时,其会影响硫化胶的微观网络结构,造成炭黑团聚,甚者降低硫化胶的物理性能。因此,对于硫化胶的物理性能,炭黑用量是个很重要的因素<sup>[12-15]</sup>。

白炭黑/炭黑并用比和混炼工艺对NR硫化胶邵尔A型硬度、拉伸强度、拉断伸长率和撕裂强度的影响分别见图5—8。

从图5可以看出:随着白炭黑/炭黑并用比的增大, NR硫化胶的邵尔A型硬度逐渐下降,原因可能是白炭黑相比炭黑更易在胶料内部团聚,从而使硫化胶的硬度下降;在试验范围内,白炭黑/炭黑并用比为10/40时NR硫化胶的邵尔A型硬度最大,采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR硫化胶的邵尔A型硬度分别为59和58度,相差不大。

从图6可以看出:随着白炭黑/炭黑并用比的

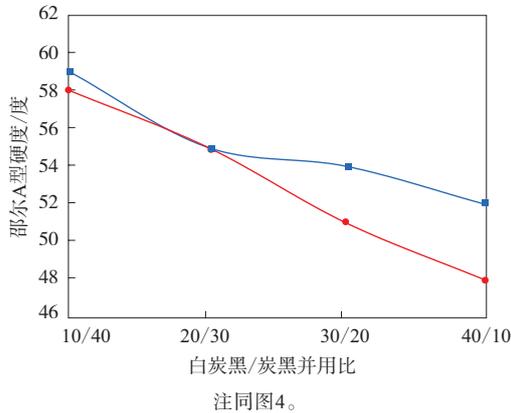


图5 炭黑/白炭黑并用比和混炼工艺对NR硫化胶邵尔A型硬度的影响

Fig. 5 Effect of silica/carbon black blending ratios and mixing processes on Shore A hardnesses of NR vulcanizates

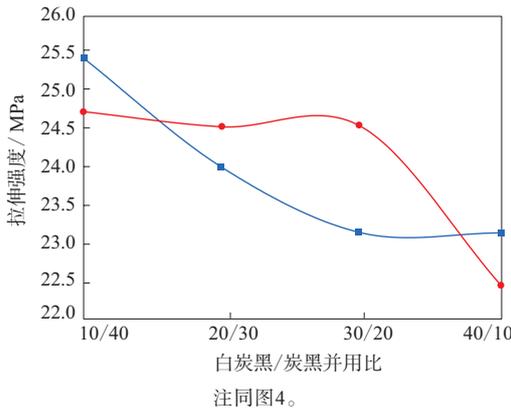


图6 炭黑/白炭黑并用比和混炼工艺对NR硫化胶拉伸强度的影响

Fig. 6 Effect of silica/carbon black blending ratios and mixing processes on tensile strengths of NR vulcanizates

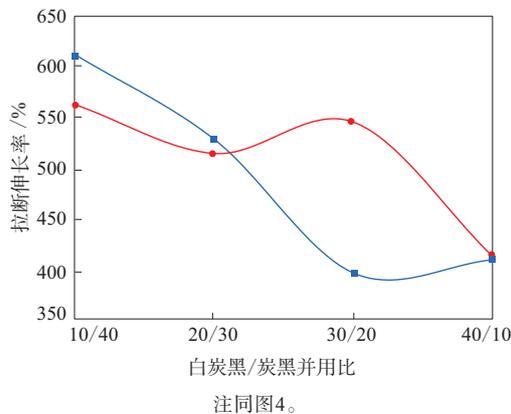


图7 炭黑/白炭黑并用比和混炼工艺对NR硫化胶拉断伸长率的影响

Fig. 7 Effect of silica/carbon black blending ratios and mixing processes on elongations at break of NR vulcanizates

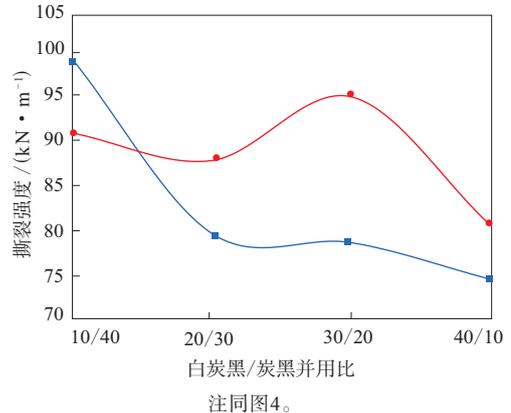


图8 炭黑/白炭黑并用比和混炼工艺对NR硫化胶撕裂强度的影响

Fig. 8 Effect of silica/carbon black blending ratios and mixing processes on tear strengths of NR vulcanizates

增大, NR硫化胶的拉伸强度基本呈降低趋势; 在试验范围内, 白炭黑/炭黑并用比为10/40时NR硫化胶的拉伸强度最大, 采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR硫化胶的拉伸强度分别为25.5和24.5 MPa, 相差不大。

从图7可以看出: 随着白炭黑/炭黑并用比的增大, NR硫化胶的拉断伸长率总体呈下降趋势; 在试验范围内, 白炭黑/炭黑并用比为10/40时NR硫化胶的拉断伸长率最大, 采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR硫化胶的拉断伸长率分别为612%和563%。

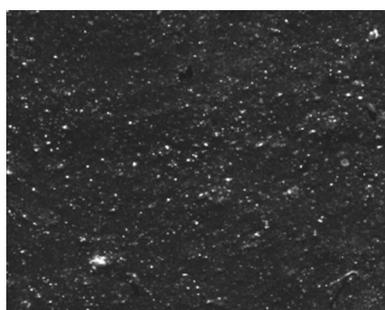
从图8可以看出: 随着白炭黑/炭黑并用比的增大, 采用液相叠层法混炼工艺的NR硫化胶撕裂强度逐渐下降; 在试验范围内, 白炭黑/炭黑并用比为10/40时NR硫化胶的撕裂强度最大, 为99  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ , 白炭黑/炭黑并用比为40/10时NR硫化胶的撕裂强度最小, 为75  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

从图8还可以看出: 采用干法混炼工艺的NR硫化胶的撕裂强度先降低后提高再降低; 在试验范围内, 白炭黑/炭黑并用比为30/20时NR硫化胶的撕裂强度最大, 为95  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ , 白炭黑/炭黑并用比为40/10时NR硫化胶的撕裂强度最小, 为81  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

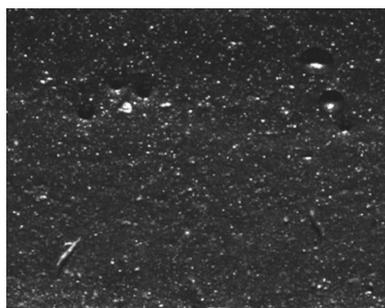
## 2.5 炭黑分散性

白炭黑/炭黑并用比为10/40时采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的炭黑分散状况见图9。

从图9可以看出: 采用干法混炼工艺的NR混



(a) 液相叠层法混炼



(b) 干法混炼

图9 采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的炭黑分散情况

**Fig. 9 Carbon black dispersions of NR compounds with liquid phase lamination mixing process and dry mixing process**  
 炼胶表面光滑,但是含有较多气孔,这是由于在混炼过程中炭黑及小料加入絮凝胶时炭黑易团聚,炭黑分散不均匀;采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶表面光滑,气泡减少,炭黑聚团直径更小,团聚程度更小,分散更为均匀,表明液相叠层法混炼工艺更有利于炭黑分散。

### 3 结论

采用液相叠层法混炼工艺制备NR胶料,研究白炭黑/炭黑并用比对NR胶料性能的影响,并与采用干法混炼工艺制备的NR胶料进行对比,得出以下结论。

(1) 随着白炭黑/炭黑并用比的增大,采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的 $F_L$ 和 $F_{max}$ 均呈增大趋势, $t_{10}$ 和 $t_{90}$ 基本呈延长趋势,采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶 $t_{90}$ 比采用干法混炼工艺的NR混炼胶略有缩短。

(2) 随着白炭黑/炭黑并用比的增大,采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的Payne效应均呈增强趋势,填料分散效果变差。

(3) 随着白炭黑/炭黑并用比的增大,采用液

相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR硫化胶的硬度、拉伸强度和拉断伸长率总体呈下降趋势;采用液相叠层法混炼工艺的NR硫化胶撕裂强度逐渐下降,采用干法混炼工艺的NR硫化胶撕裂强度先降低后提高再降低。

(4) 随着白炭黑/炭黑并用比的增大,采用液相叠层法混炼工艺和干法混炼工艺的NR混炼胶的导热性能均呈下降趋势,采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶的导热性能优于采用干法混炼工艺的NR混炼胶。

(5) 采用干法混炼工艺的NR混炼胶易出现气孔现象,采用液相叠层法混炼工艺的NR混炼胶气泡减少,炭黑聚团直径更小,团聚程度更小,分散更为均匀。

### 参考文献:

- [1] 孙国华,李辉,李斌.湿法混炼橡胶新材料工艺技术优势与研究进程[J].橡塑技术与装备,2017,43(6):17-19.  
SUN G H, LI H, LI B. Technical advantages and research progress of new wet mixing rubber materials[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2017, 43(6): 17-19.
- [2] 李红江.湿法混炼橡胶新材料工艺技术优势与研究进程[J].当代化工研究,2020(1):119-120.  
LI H J. Technological advantages and research progress of new materials for wet mixing rubber[J]. Modern Chemical Research, 2020(1): 119-120.
- [3] 王洪振,沈梅,王胜强,等.天然橡胶湿法混炼的研究进展[J].橡胶工业,2016,63(12):759-763.  
WANG H Z, SHEN M, WANG S Q, et al. Research progress of wet mixing of natural rubber[J]. China Rubber Industry, 2016, 63(12): 759-763.
- [4] 陆铭,王永伟,李岩磊.天然橡胶/白炭黑湿法混炼技术的研究进展[J].橡胶科技,2019,17(5):245-249.  
LU M, WANG Y W, LI Y L. Research progress of wet mixing technology of natural rubber/silica compound[J]. Rubber Science and Technology, 2019, 17(5): 245-249.
- [5] 何凡,季欣,袁天元,等.液体天然橡胶对湿法混炼制备天然橡胶/白炭黑复合材料性能的影响[J].航空材料学报,2017,37(5):55-62.  
HE F, JI X, YUAN T Y, et al. Effect of liquid natural rubber on properties of natural rubber/silica composite prepared by wet compounding[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(5): 55-62.
- [6] 张春华,毛义梅,田庆丰,等.橡胶湿法混炼技术研究进展[J].现代化工,2017,37(8):32-35.  
ZHANG C H, MAO Y M, TIAN Q F, et al. Study progress on wet mixing technology of rubber[J]. Modern Chemical Industry, 2017,

- 37(8):32-35.
- [7] 陈毅敏. 国内天然橡胶/白炭黑湿法混炼技术发展的现状[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(21):26-30.
- CHEN Y M. Present situation of wet mixing technology for natural rubber/silica in China[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(21):26-30.
- [8] 李再琴, 刘强, 姬贝贝, 等. 湿法白炭黑母胶混炼工艺探讨[J]. 轮胎工业, 2019, 39(9):562-565.
- LI Z Q, LIU Q, JI B B, et al. Discussion on the mixing process of wet silica Masterbatch[J]. Tire Industry, 2019, 39(9):562-565.
- [9] 许春华. 中国橡胶工业原材料和工艺技术的绿色化进展[J]. 橡塑技术与装备, 2013, 39(1):10-20.
- XU C H. The green progress of raw materials and process technology of China's rubber industry[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2013, 39(1):10-20.
- [10] 王丽丽. 石墨烯在天然胶乳中的应用研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- [11] RANE A V, KANNY K, MATHEW A. Microstructural features affecting mechanical properties: Effect of processing on dispersion of carbon black (N220) nanoparticles reinforcement in poly(lactic acid) [J]. Surfaces and Interfaces, 2020, 18(3). DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100451.
- [12] WEN X, WANG Y J, GONG J, et al. Thermal and flammability properties of polypropylene/carbon black nanocomposites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(5):793-801.
- [13] 蔺延喜, 韩冬礼, 罗建宇, 等. 湿法混炼用于白炭黑/天然橡胶复合材料的现状[J]. 云南化工, 2020, 47(6):6-8.
- LIN Y X, HAN D L, LUO J Y, et al. Present situation and existing problems of wet-mixing method applied to silica/NR composite materials[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(6):6-8.
- [14] 何燕, 马连湘, 黄素逸. 炭黑/橡胶体系的导热模型及应用研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(4):671-674.
- HE Y, MA L X, HUANG S Y. Thermal conductivity model of carbon/rubber composites and application research[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(4):671-674.
- [15] 赵盛钦, 李建兴, 赵树高, 等. 氢氧化铝/硼酸锌协同配合对炭黑填充氯丁橡胶性能的影响[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(4):67-72.
- ZHAO S Q, LI J X, ZHAO S G, et al. Effect of aluminum hydroxide/zinc borate synergistic flame-retardant combination on properties of carbon black-filled CR composites[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(4):67-72.

收稿日期:2021-05-13

## Effects of Mixing Process and Silica/Carbon Black Blending Ratio on Properties of NR Compound

YU Boquan<sup>1,2</sup>, LIN Guangyi<sup>1,2</sup>, WANG Hong<sup>1,2</sup>, QU Siyuan<sup>1,2</sup>, WANG Jia<sup>1,2</sup>

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Key Laboratory of Advanced Polymer Materials Manufacturing, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** The NR compound was prepared by liquid phase lamination mixing process. The effect of silica/carbon black blending ratio on the properties of the NR compound was studied, and compared with the NR compound prepared by dry mixing process. The results showed that, with the increase of silica/carbon black blending ratio,  $F_L$  and  $F_{max}$  of the NR compound with either mixing process increased,  $t_{10}$  and  $t_{90}$  were basically prolonged, and  $t_{90}$  of the NR compound with liquid phase lamination mixing process was slightly shorter. Moreover, the Payne effect of the NR compound increased with the increase of silica/carbon black blending ratio, and the filler dispersion became worse. The thermal conductivity of the NR compounds prepared by both mixing processes showed a downward trend, and the thermal conductivity of the NR compound with liquid phase lamination mixing process was higher. The hardness, tensile strength and elongation at break of the NR vulcanizate generally decreased with the increase of silica/carbon black blending ratio, the tear strength of the NR vulcanizate with liquid phase lamination mixing process gradually decreased, and the tear strength of the NR vulcanizate with dry mixing process first decreased, then increased and then decreased again. The NR compound with dry mixing process was more likely to trap air bubbles, and the NR compound with liquid phase laminated mixing process had less bubbles, lower degree of carbon black agglomeration and more uniform dispersion of the fillers.

**Key words:** mixing process; liquid phase lamination method; silica; carbon black; blending ratio; NR; vulcanization characteristic; physical property; dispersibility