

# 硫化体系对农业轮胎用乳聚丁苯橡胶/轮胎再生胶共混物性能的影响

徐云慧,徐亚婷,臧亚南,王再学,李培培,丛后罗,王艳秋

(徐州工业职业技术学院,江苏 徐州 221140)

**摘要:**研究普通硫化(CV)体系、半有效硫化(SEV)体系、有效硫化(EV)体系对农业轮胎用乳聚丁苯橡胶(ESBR)/轮胎再生胶(TRR)共混物性能的影响。研究表明:采用CV体系的胶料的门尼粘度低,流动性好;采用EV和SEV体系的胶料的门尼粘度稍高;采用CV体系的硫化胶的定伸应力和拉伸强度最高,耐磨性能和耐屈挠疲劳性能最好,但耐老化性能差,压缩永久变形大;采用EV体系的硫化胶的耐老化性能最好,压缩生热低,压缩永久变形小,耐屈挠疲劳性能较差;采用SEV体系的硫化胶的综合性能较好;采用促进剂TBSI的硫化胶的撕裂强度高,耐老化性能较好,压缩生热低,压缩永久变形小;对于农业轮胎,采用含促进剂TBSI的SEV体系的ESBR/TRR共混物较为合适。

**关键词:**农业轮胎;乳聚丁苯橡胶;轮胎再生胶;共混物;硫化体系;耐磨性能;耐屈挠疲劳性能

**中图分类号:**TQ333.1;TQ330.38<sup>+5</sup>

**文章编号:**2095-5448(2022)11-0530-06

**文献标志码:**A

**DOI:**10.12137/j.issn.2095-5448.2022.11.0530



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

随着农业机械的发展,联合收割机用农业轮胎需求量越来越大。农业轮胎相对于载重轮胎具有行驶速度慢、工作环境较恶劣的特点,因此农业轮胎对力学性能和耐磨性能要求较低,但对抗刺扎性能和抗撕裂性能等要求较高。为此,农业轮胎胎面胶中通常采用较高用量(20~50份)的低温乳聚丁苯橡胶(ESBR)。由于低温ESBR分子主链上引入了庞大的苯基侧基,并在丁二烯-1,2-结构形成乙烯侧基,空间位阻大,分子链柔性差,相对分子质量分布窄,缺少低分子级别的增塑作用,因此加工性能差、硫化速度慢、耐老化性能差。但将ESBR与轮胎再生胶(TRR)共混则可大大改善其性能,同时降低生产成本。

硫化体系和促进剂对橡胶共混物的门尼粘度、硫化特性、力学性能、耐老化性能、耐磨性能

和抗压缩性能等影响较大<sup>[1-2]</sup>。随着材料科学与表征手段的不断发展,人们依据交联键结构及其数量比例的不同<sup>[3-5]</sup>,将橡胶硫化体系分为普通硫化(CV)体系、半有效硫化(SEV)体系、有效硫化(EV)体系、平衡硫化(EC)体系以及过氧化物硫化体系等<sup>[6-7]</sup>。不同交联结构对橡胶制品的动静态性能影响很大,尤其是生热和耐磨性能等<sup>[8-10]</sup>。

本工作研究CV,SEV和EV体系对农业轮胎用ESBR/TRR共混物性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

ESBR,牌号1502,荣顺商贸化工有限公司提供;TRR和天然橡胶(NR,1#标准胶),衡水市金都橡胶化工有限公司提供;顺丁橡胶(BR),牌号9000,苏州宝禧化工有限公司提供;氧化锌,上海智孚化工科技有限公司产品;硬脂酸,中国石化南京化学工业有限公司产品;炭黑N220,济南德蓝化工有限公司产品;防老4010NA,4020和RD,上海

**作者简介:**徐云慧(1973—),女,山东曹县人,徐州工业职业技术学院教授,博士,主要从事橡胶制品、高分子材料应用和环境友好技术研究工作。

**E-mail:**xyh0516@163.com

成锦化工有限公司产品;芳烃油,兰州市化学工业公司产品;硫黄,浙江黄岩浙东橡胶助剂有限公司产品。

## 1.2 配方

通过改变硫化体系,即改变硫化剂和促进剂的品种和用量设计9组配方,如表1所示,1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>配方采用CV体系,4<sup>#</sup>—6<sup>#</sup>配方采用SEV体系,7<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>配方采用EV体系。

表1 配方

组 分	配方编号								
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
硫黄	2.5	2.5	2.5	1	1	1	0.4	0.4	0.4
促进剂TBzTD	0.5	0	0	1.5	0	0	3	0	0
促进剂MBT	0	1.5	0	0	2.5	0	0	5	0
促进剂TBSI	0	0	1.5	0	0	2.5	0	0	5

注:配方其余组分及用量为ESBR 50,TRR 30,NR 30,BR 20,炭黑N220 60,氧化锌 4,硬脂酸 3,防老4010NA 3,防老剂4020 1,防老剂RD 1.5,石蜡 1.5,芳烃油 11,热抗氧剂RF 1.5,均匀分散剂 1.5,防焦剂CTP 0.1。

冲击弹性仪,中国台湾高铁检测仪器有限公司产品;LX-A型邵氏硬度计、屈挠龟裂试验机,江都新真威试验机械有限公司产品;RLH-225型热空气老化箱,南京五和实验设备有限公司产品。

## 1.4 试样制备

胶料采用3段混炼工艺混炼,均采用开炼机。一段混炼工艺为:ESBR塑炼包辊→TRR→氧化锌、硬脂酸、防老剂→部分炭黑N220→薄通8次→下片冷却,停放24 h,制得ESBR/TRR共混胶<sup>[2]</sup>。二段混炼工艺为:NR塑炼→BR→ESBR/TRR共混胶→石蜡、均匀分散剂、热抗氧剂RF→剩余炭黑N220、芳烃油→薄通8次→下片冷却,停放24 h,制得母炼胶<sup>[3-4]</sup>。三段混炼工艺为:将停放后的母炼胶分成9份,分别包辊热炼→按配方比例添加硫黄、防焦剂CTP和促进剂→薄通8次→下片冷却,停放24~96 h,制得终炼胶。

胶料硫化条件为160 °C/15 MPa× $t_{90}$ 。

## 1.5 性能测试

门尼粘度按照GB/T 1232.1—2016进行测定;硫化特性按照GB/T 16584—1996进行测定;密度按照GB/T 1033.1—2008进行测定;邵尔A型硬度按照GB/T 531.1—2008进行测定;回弹值按照GB/T 1681—2009进行测定;拉伸性能按照GB/T 528—2009进行测定,I型哑铃形试样,拉伸速率为(500±50) mm·min<sup>-1</sup>,测试温度为23 °C;撕裂强

## 1.3 主要设备和仪器

660-1型单刀切胶机,无锡市第一橡塑机械有限公司产品;XK-160型开炼机,上海双翼橡塑机械有限公司产品;YxE-25D型平板硫化机,上海西玛伟力橡塑机械有限公司产品;NW-97型门尼粘度仪、GT-M2000-A型无转子硫化仪、XS365M型密度测试仪、GT-AI-7000-GD型高低温拉力试验机、RH-2000N型压缩生热测定仪和WTB-0.5型

度按照GB/T 529—2008进行测定,直角形试样,拉伸速率为(500±50) mm·min<sup>-1</sup>,测试温度为23 °C;耐老化性能按照GB/T 3512—2014进行测定;耐磨性能按照GB/T 1689—2014进行测定;耐屈挠龟裂性能按照GB/T 13934—2006进行测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TRR物理性能

TRR物理性能如表2所示。

表2 TRR物理性能

项 目	硫化时间/s		
	600	900	1 200
100%定伸应力/MPa	2.53	2.67	2.91
300%定伸应力/MPa	7.82	8.21	8.86
拉伸强度/MPa	9.87	10.47	9.79
拉断伸长率/%	394	411	352
撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> )	40	48	43

注:配方为TRR 100,氧化锌 7.5,硬脂酸 1,硫黄 3.5,促进剂NOBS 2.4。胶料按照GB/T 13460—2016进行硫化<sup>[5]</sup>。

### 2.2 门尼粘度

胶料门尼粘度采用门尼粘度仪进行测试,1<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>配方胶料的门尼粘度见表3。

从表3可以看出,采用CV体系的1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>配方胶料的门尼粘度比其他配方低,塑性好,流动性好。分析认为,在相同塑炼和混炼条件下,采用CV体系的胶料在薄通过程中分子链氧化裂解速

表3 胶料的门尼粘度

项 目	配方编号								
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
门尼粘度[ML(1+4)100℃]	57.2	55.7	58.2	62.5	63.0	63.7	62.0	62.0	62.3
门尼粘度最大值	102.0	85.6	89.7	98.1	98.3	97.8	98.5	95.3	87.5

度比采用SEV和EV体系的胶料更快一些,使SBR, TRR, NR和BR分子链进一步断裂,胶料相对分子质量减小,塑性增加,呈现出较低的门尼粘度。采用EV和SEV体系的胶料的门尼粘度稍高。

### 2.3 硫化特性

1<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>配方胶料的硫化特性(160℃)见表4。

从表4可知:采用促进剂TBzTD的1<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>和7<sup>#</sup>配方胶料的 $t_{10}$ , $t_{90}$ 和 $t_{100}$ 均比较短,说明采用促进剂TBzTD的胶料起硫很快,焦烧时间短,硫化速度快,硫化程度高;采用促进剂MBT的2<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>配方胶料的 $t_{10}$ , $t_{90}$ 和 $t_{100}$ 次之,说明采用促进剂MBT的胶料起硫稍慢,焦烧时间适中,硫化活性较高,硫化速度较快;采用促进剂TBSI的3<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方胶料的 $t_{10}$ , $t_{90}$ 和 $t_{100}$ 均很长,说明采用促进剂TBSI的胶料起硫缓慢,焦烧时间很长,硫化速度慢,硫化平坦期很长<sup>[5]</sup>。

### 2.4 物理性能

1<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>配方硫化胶的物理性能见表5。

分析表5可得出以下结论。

(1)采用不同硫化体系对硫化胶的密度影响不大。

(2)采用CV体系的1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>配方硫化胶的硬度较高,采用SEV体系的4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>配方硫化胶的硬度次之,采用EV体系的7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫化胶的硬度较低。原因是CV体系的硫黄用量大,胶料的硫化程度高,分子间作用力大,胶料结构度比较高,表现为硬度比较高。

(3)采用CV体系的1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>配方硫化胶的100%和300%定伸应力较高,采用SEV体系的4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>配方硫化胶的100%和300%定伸应力次之,采用EV体系的7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫化胶的100%和300%定伸应力最低。原因可能是采用CV体系的硫化胶

表4 胶料的硫化特性

项 目	配方编号								
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
$F_L/(dN \cdot m)$	7.18	6.94	7.13	7.55	7.96	8.20	7.20	7.82	7.01
$F_{max}/(dN \cdot m)$	46.36	42.16	45.51	38.04	29.04	33.61	34.75	19.16	25.19
$F_{max}-F_L/(dN \cdot m)$	39.18	35.22	38.38	30.49	21.08	25.41	27.55	11.34	18.18
$t_{10}/s$	44	68	95	48	80	114	47	66	421
$t_{90}/s$	123	350	433	150	485	328	183	494	310
$t_{100}/s$	270	814	641	823	1198	1043	774	951	771

表5 硫化胶的物理性能

项 目	配方编号								
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
密度/( $Mg \cdot m^{-3}$ )	1.145	1.148	1.146	1.148	1.150	1.152	1.146	1.152	1.149
邵尔A型硬度/度	71	70	70	68	68	68	65	64	65
100%定伸应力/MPa	2.64	2.56	2.57	1.85	1.67	1.78	2.04	2.23	2.15
300%定伸应力/MPa	8.36	7.15	7.37	4.61	3.99	4.62	5.89	5.33	5.15
拉伸强度/MPa	15.72	15.53	14.46	13.42	13.04	12.91	13.64	13.94	13.59
拉伸伸长率/%	460	572	522	685	734	655	784	837	788
撕裂强度/( $kN \cdot m^{-1}$ )	41	45	80	44	48	64	38	44	61
100℃×72h老化后	35	33	38	33	31	39	33	33	38
100%定伸应力/MPa	4.35	5.02	4.64	3.98	2.83	3.15	3.57	1.96	2.72
300%定伸应力/MPa	—	—	—	10.72	7.27	8.18	9.92	8.97	8.95
拉伸强度/MPa	11.76	12.33	12.14	12.06	11.78	12.24	13.02	12.92	12.69
拉伸伸长率/%	294	285	283	344	572	492	653	703	574

交联密度大,相对分子质量大<sup>[8]</sup>。

(4)采用CV体系的1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>配方硫化胶的拉伸强度较高,其次是采用EV体系的7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫化胶,采用SEV体系的4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>配方硫化胶的拉伸强度较低。原因可能是采用CV体系的硫化胶多硫键多,网链易取向成有序排列,胶料拉伸时各处均匀承载,表现出拉伸强度和定伸应力均很高。虽然采用EV体系的硫化胶多硫键少,网链不易取向,但硫化结构中多为单硫键和多硫键,键能大,易产生诱导结晶,分子结构不易被破坏,所以拉伸强度高<sup>[7]</sup>。

(5)采用CV,SEV和EV体系的硫化胶的拉断伸长率从小到大顺序为:CV体系,SEV体系,EV体系,说明采用CV体系的硫化胶分子构象变化能力大,分子链柔性强。

(6)采用促进剂TBSI的3<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫化胶的撕裂强度较高,抗撕裂性能较好。农业轮胎使用环境相对恶劣,提高胶料的抗撕裂性能非常重要。

(7)老化后采用CV,SEV和EV体系的硫化胶的拉伸强度均下降,采用CV体系的硫化胶的拉伸强度下降幅度最大,耐老化性能最差,采用EV体系的硫化胶的拉伸强度下降幅度最小,耐老化性能最好。分析认为,采用CV体系的胶料以多硫键交联为主,键能低,多硫键易分解,热稳定性差,耐热老化性能差,而采用SEV和EV体系的胶料单硫键

和双硫键多,键能高,受热后化学键依然牢固,表现出优良的耐热老化性能。

(8)老化后采用CV,SEV和EV体系的硫化胶的100%和300%定伸应力均提高(8<sup>#</sup>配方硫化胶老化后试样断裂点有杂质,导致100%定伸应力较低)<sup>[9]</sup>,拉断伸长率均减小。

## 2.5 耐磨性能

1<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>配方硫化胶的阿克隆磨耗量分别为0.057,0.056,0.034,0.122,0.138,0.147,0.304,0.364和0.391 cm<sup>3</sup>。采用CV体系的1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>配方硫化胶的耐磨性能较好,采用SEV体系的4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>配方硫化胶的耐磨性能次之,采用EV体系的7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫化胶的耐磨性能较差。原因是CV体系中硫黄用量大,硫化胶中多硫键比较多,网链易伸张,降低了橡胶表面因摩擦引起的裂纹扩展现象,提高了抗破坏能力,降低了磨耗体积。另外,采用CV体系的3<sup>#</sup>配方硫化胶的耐磨性能优于1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>配方硫化胶,原因是促进剂TBSI具有后效性,硫化程度高,降低了分子链的活动能力<sup>[10]</sup>。

## 2.6 耐屈挠疲劳性能

硫化胶5万次屈挠时裂口的程度如图1所示,其中1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>配方硫化胶无屈挠龟裂现象,龟裂等级为1;4<sup>#</sup>配方硫化胶出现1个针刺点屈挠龟裂,龟裂等级为1;6<sup>#</sup>配方硫化胶出现2个针刺点屈挠龟裂,龟裂等级为1;7<sup>#</sup>配方硫化胶较大龟裂处的长度为1.5~3.0 mm,龟裂等级为5;8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫

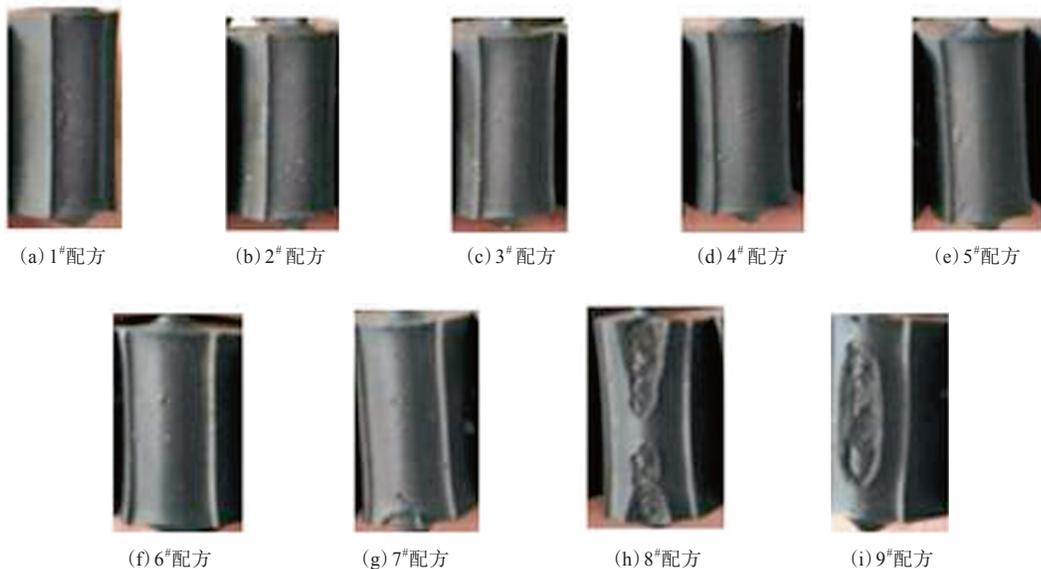


图1 硫化胶5万次屈挠时裂口的程度

化胶较大龟裂处的长度均大于3.0 mm,龟裂等级为6。

由此可知:采用CV体系的1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>配方硫化胶的耐屈挠疲劳性能最好,采用SEV体系的4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>配方硫化胶的耐屈挠疲劳性能次之,采用EV体系的7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>配方硫化胶的耐屈挠疲劳性能较差。原因可能为采用CV体系的硫化胶以多硫键交联,在屈挠疲劳试验中生热大,键能低,易断裂,但断开的多硫键立即与周围的大分子和炭黑或自由基重新交联,恢复了胶料的耐疲劳能力,因此耐屈挠疲劳性能提高;采用EV体系的硫化胶虽然以单硫键和双硫键交联,分子间力大,键能大,但经过5万次屈挠试验后交联键断裂,且不能像多硫键那样可以“自修复”,因此疲劳龟裂现象严重;采用SEV体系的硫化胶中既有单硫键、双硫键,又有多硫键,耐屈挠疲劳性能中等。

## 2.7 耐压缩疲劳性能

硫化胶的耐压缩疲劳性能如表6所示。

从表6可以看出,采用CV体系的硫化胶试样在动态压缩试验过程中破裂,采用SEV体系的硫化胶生热较大,采用EV体系的硫化胶生热较小。原因可能为采用EV体系的胶料分子间及填料粒子间内粘度低,内摩擦小,升温慢,采用CV体系的胶料硫化程度大,分子间内摩擦大,升温快。另外,采用含促进剂TBSI的EV体系的9<sup>#</sup>配方硫化胶温升最

小,压缩生热性能最好。

从表6还可以看出:采用CV体系的硫化胶的静压缩变形、动压缩变形和压缩永久变形均较大,压缩过程中试样变形大,试样破裂;采用SEV体系的硫化胶的静压缩变形、动压缩变形和压缩永久变形相对于采用CV体系的硫化胶小;采用EV体系的硫化胶的静压缩变形、动压缩变形和压缩永久变形均大大减小。原因可能为在压缩疲劳试验过程中采用CV体系的硫化胶升温快,变形大,而采用SEV和EV体系的硫化胶升温稍慢,变形也相对较小。另外,采用含促进剂TBSI的EV体系的9<sup>#</sup>配方硫化胶的静压缩变形、动压缩变形和压缩永久变形均最小。

综合考虑胶料的各项性能,对于农业轮胎,采用含促进剂TBSI的SEV体系的ESBR/TRR共混物较为合适。

## 3 结论

(1) 采用CV体系的ESBR/TRR共混物胶料的门尼粘度低,流动性好;采用EV和SEV体系的胶料的门尼粘度稍高。

(2) 促进剂类型对胶料的焦烧时间和硫化时间影响较大。采用促进剂TBzTD的胶料起硫很快,焦烧时间短,硫化速度快,硫化程度高;采用促进剂MBT的胶料起硫时间稍长,焦烧时间适中,硫

表6 硫化胶的耐压缩疲劳性能

项 目	配方编号								
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
最终生热温度/℃	试样破裂	试样破裂	试样破裂	46.8	47.9	45.3	38.7	39.5	38.0
原始高度/mm	24.78	24.85	24.89	24.82	24.89	24.80	24.81	24.78	24.82
静压缩变形									
高度变化量/mm	5.23	5.46	5.19	4.68	4.57	4.39	4.11	3.98	3.59
变形率/%	21.10	21.97	20.85	18.86	18.36	17.70	16.57	16.06	14.46
初动压缩变形									
高度变化量/mm	3.76	3.98	3.78	3.01	2.97	2.89	2.23	2.36	1.89
变形率/%	15.17	16.02	15.18	12.13	11.93	11.65	8.99	9.52	7.61
终动压缩变形									
高度变化量/mm	试样破裂	试样破裂	试样破裂	8.42	8.39	8.33	5.12	5.46	5.09
变形率/%	—	—	—	33.92	33.71	33.59	20.64	22.03	20.51
压缩永久变形									
最终高度/mm	试样破裂	试样破裂	试样破裂	22.27	22.09	22.78	23.49	23.89	24.17
变形率/%	—	—	—	10.27	11.25	8.15	5.32	3.59	2.62

注:试样为圆柱体,直径为(17.8±0.15) mm,高度为(25±0.25) mm。试验冲程 4.45 mm,预应力 1.0 MPa,试验温度 55 ℃,压缩频率 30 Hz,调整速率 5 mm·min<sup>-1</sup>,平衡速率 0.5 mm·min<sup>-1</sup>,回位速率 10 mm·min<sup>-1</sup>,预热时间 30 min,测试时间 25 min。

化活性较高,硫化速度较快;采用促进剂TBSI的胶料起硫缓慢,焦烧时间很长,硫化速度慢,硫化平坦期很长。

(3) 采用CV体系的硫化胶的定伸应力和拉伸强度最高,耐磨性能和耐屈挠疲劳性能最好,但耐老化性能差,压缩永久变形大;采用EV体系的硫化胶的耐老化性能最好,压缩生热低,压缩永久变形小,耐屈挠疲劳性能较差;采用SEV体系的硫化胶的综合性能较好;采用促进剂TBSI的硫化胶的撕裂强度高,耐老化性能较好,压缩生热低,压缩永久变形小。

(4) 对于农业轮胎,采用含促进剂TBSI的SEV体系的ESBR/TRR共混物较为合适。

#### 参考文献:

- [1] SIRISINHA C, PRAYOONCHATHPHAN N. Study of carbon black distribution in BR/NBR blends based on damping properties: Influences of carbon black particle size, filler, and rubber polarity[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 81 (13) :3198-3203.
- [2] ZHENG W J, ZENG Y L, GAO L, et al. Just-in-time semi-supervised soft sensor for quality prediction in industrial rubber mixers[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018, 180:36-41.
- [3] HU P, CHEN Q. Investigation on thermal aging and scaling of NBR in alkaline solution[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2009, 14 (1) :65-69.
- [4] 苗珍珍. 硫化体系对SBR/NR并用胶性能的影响[J]. 橡胶科技, 2021, 19 (5) :232-236.
- [5] CHEN Y Y, JIE Y, DENG T. Effect of no ZnO S/TCY curing system on ACM/NBR blends performance[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment (Rubber), 2016, 42 (19) :67-72.
- [6] ZHAO X Y, YANG J N, ZHAO D T, et al. Natural rubber/nitrile butadiene rubber/hindered phenol composites with high damping properties[J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2015, 6 (4) :239-250.
- [7] 陈生, 江俊, 陈波宇, 等. 硫化体系和混炼工艺对胶料玻璃化温度的影响研究[J]. 轮胎工业, 2022, 42 (4) :234-237.
- [8] NAKARAMONTRI Y, NAKASON C, KUMMERL O C, et al. Influence of modified natural rubber on properties of natural rubber-carbon nanotube composites[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2015, 88 (2) :199-218.
- [9] 林正伟, MARTIN H, 史新妍. 硅烷交联三元乙丙橡胶的制备与应用研究进展[J]. 橡胶工业, 2021, 68 (6) :464-470.
- [10] ONYEAGORO G N. Effect of zinc oxide level and blend ratio on vulcanizate properties of blend of natural rubber and acrylonitrilebutadiene rubber in the presence of epoxidized natural rubber[J]. Academic Research International, 2012, 3 (1) :499-509.

收稿日期:2022-06-20

## Effect of Vulcanization System on Properties of ESBR/Reclaimed Tire Rubber Blends for Agricultural Tires

XU Yunhui, XU Yating, ZANG Yanan, WANG Zaixue, LI Peipei, CONG Houluo, WANG Yanqiu

(Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)

**Abstract:** The effects of common vulcanization (CV) system, semi effective vulcanization (SEV) system and effective vulcanization (EV) system on the properties of emulsion-polymerized styrene butadiene rubber (ESBR)/reclaimed tire rubber (TRR) blends for agricultural tires were studied. The results showed that, the compound with CV system had low Mooney viscosity and good fluidity, and the compounds with EV and SEV system had higher Mooney viscosity. The vulcanizate with CV system had the highest modulus and tensile strength, the best wear resistance and flexural fatigue resistance, but had poor aging resistance and large compression set. The vulcanizate with EV system had the best aging resistance, low compression heat build-up and small compression set, but poor flexural fatigue resistance. The overall properties of the vulcanizate with SEV system were good. The vulcanizate with accelerator TBSI had high tear strength, good aging resistance, small compression heat build-up and compression set. For agricultural tires, the ESBR/TRR blend with SEV system containing accelerator TBSI was more suitable.

**Key words:** agricultural tire; emulsion-polymerized styrene butadiene rubber; reclaimed tire rubber; blend; vulcanization system; wear resistance; flexural fatigue resistance