

提高矿用工程机械轮胎的耐用性

Walker L A 等著 何卫东摘译 吴新民校

**摘要** 大型矿用工程机械轮胎的耐用性取决于生热、耐热性和抗掉块/崩花性能。最初,人们通过减小填充剂用量、增大硫化剂用量和采用半有效硫化体系来直接降低生热,提高耐热性和耐老化性能。在翻新轮胎胎面中使用一种经过处理的纤维素短纤维,可大大提高抗掉块/崩花性能。更进一步的研究发现,用 SBR 部分替代 NR,并填充白炭黑后,有利于提高撕裂强度和抗掉块/崩花性能。本文介绍一种新型裤形撕裂试验,它提供了与实际使用不寻常的相关性。翻新轮胎的试验包括大量的实验室试验和实际使用试验。通过将普通用途的配方用于牵引机和装载机轮胎中而使其获得了良好的耐用性。

当今大型矿用工程机械轮胎经常要满足各种用途或使用需求。当用于载重车辆时,由于路面通常是非常粗糙、尖锐的,易导致胎面掉块/崩花。大多数这种类型的车辆是在极低的速度下行驶,生热有时是一个影响因素,但基本不会达到载重量大、行驶速度相对较高的牵引车辆的程度。后面这种情况,特别是在路面磨损的情况下,生热高,易产生掉块/崩花。迄今为止,观察到两种或更多种不同类型的胎面配方用于满足特别的需求。特别涉及到胎面是因为胎面与引起其损坏的路面具有最大的接触。当然,恰当的设计也能获得最佳的耐用性,这里仅讨论胶料的直接作用。本文旨在介绍配方导致提高装载机和牵引机轮胎耐用性的进展情况。

最初的努力方向是降低生热,主要通过采用纯 NR 配方(无 SR),减小补强填充剂用量,同时增大硫化剂用量,保持或提高其它性能来实现。在减小硫黄用量的同时,增大促进剂或硫黄给予体的用量,硫化胶性能可获得进一步改善。此试验的主要变量和结果见表 1。当炭黑与白炭黑并用后,白炭黑可提高与抗掉块/崩花性能有关的撕裂强度。这是我们实现同时降低生热和减少掉块/崩花目标的一个经验。这里有一个重要提示:在实验室有多种方法可测定生热/滞后性能(在轮胎试验中通常也能确定),但测定抗掉块/崩花性能则是另外一回事,进行与现场使用相关的室内测试十分困难。以上述情况为基础,本文详述了改进配方对改善耐用性的效果。配方变化有加入经过处理的纤维素短纤维(TCF)、用 SBR 部分替代 NR 以及采用半有效硫化体系。

表 1 改变填充剂和硫化剂用量对硫化胶性能的影响

| 项 目                               | 对比   | 配方编号           |                |                |                |
|-----------------------------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                   |      | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> |
| 用量/份                              |      |                |                |                |                |
| 炭黑 N231                           | 45   | 40             | 40             | 40             | 40             |
| 白炭黑                               | 20   | 12             | 12             | 12             | 12             |
| 油                                 | 6    | 3              | 3              | 3              | 3              |
| 硫黄                                | 2.4  | 2.4            | 2.4            | 1.5            | 1.5            |
| 促进剂 MBS                           | 0.7  | 0              | 0              | 0              | 0              |
| 促进剂 NS                            | 0    | 1.2            | 0.7            | 1.5            | 0.7            |
| 硫化剂 DTDM                          | 0    | 0              | 0.5            | 0              | 0.9            |
| 144 ℃ × t <sub>90</sub> 硫化胶性能     |      |                |                |                |                |
| 生热/℃                              | >60  | 15             | 16             | —              | —              |
| 爆破时间/min                          | 2    | 21             | 18             | —              | —              |
| C 型撕裂强度/<br>(kN·m <sup>-1</sup> ) | 60.4 | 112.7          | 132.1          | —              | —              |
| 132 ℃ × 6 h 硫化胶性能                 |      |                |                |                |                |
| 生热/℃                              | 75   | —              | —              | 18             | 17             |
| C 型撕裂强度/<br>(kN·m <sup>-1</sup> ) | 34.3 | —              | —              | 103.8          | 97.9           |
| 拉伸强度/MPa                          | 19.3 | —              | —              | 28.2           | 27.3           |

注:基本配方为:NR 100;氧化锌 5.0;硬脂酸 2.0;防老剂 6PPD 2.0;防老剂 TMQ 2.0。

1 实验

- (1)混炼:实验室用 00 本伯里密炼机或工厂用 11<sup>#</sup>本伯里密炼机(轮胎试验),采用普通混炼工艺制备所有的母炼胶。终炼时加入硫化剂,可在普通开炼机上加入(混炼温度为 70 ℃),或在 9<sup>#</sup>本伯里密炼机上加入(最高温度为 94 ℃)。
- (2)加工特性:门尼焦烧采用孟山都门尼粘度仪测试(ASTM D 1646—81)。
- (3)硫化特性:采用孟山都 R-100 型硫化仪按所要求的硫化温度测定(ASTM D 2084—

81)。正硫化点为转矩最大值与最小值之差的 90%时所对应的时间。试样的制备和硫化按 ASTM D 3182—74 进行。测试用的翻新工程机械轮胎采用 Brad Ragan 橡胶公司的 Banlug 工艺制造。

(4)物理性能:应力-应变性能采用 Monsanto 500 拉力机,按 ASTM D 412 测定;硬度用邵尔 A 型硬度计测定;C 型撕裂强度按 ASTM D 624 测定。同时还进行了自制的裤形撕裂试验和特殊厚度试样(更具实用性)的撕裂试验。

(5)动态性能:生热采用 ASTM D 623 规定的固特里奇屈挠试验机测定;疲劳性能采用孟山都疲劳破坏试验机测定;回弹值采用卢氏法(Lupke)测定;耐磨性能采用 ASTM D 2228 规定的皮克(Pico)磨损试验机测定。

(6)割口增长:按 ASTM D 813 用德墨西亚屈挠试验机及 BFG 环形屈挠试验机测定割口增长到初始割口 5 倍的时间(h)。

(7)胎面性能:通过用肉眼观察装配于车辆的轮胎来测定。

(8)抗掉块/崩花性能:采用可记录崩花或破坏数量的室内侧刀型仪器测定。

2 结果

2.1 TCF

在过去 10 年里开发了一系列纤维素短纤维,经过各种处理后分散于许多弹性体中。它们在相对较高的用量(5~30 份)下,能够提高生胶强度,增加挺性,减小膨胀,提高负荷能力。然而,这样的用量不适合轮胎胎面的加工。从获得的性能中可以推测,低用量的纤维素短纤维可以机械的方式提供抗外力的能力。

明确一些实验室试验中可能提高轮胎性能的指标。遗憾的是,没有明显观察到试验轮胎的撕裂强度比普通轮胎有适度增长;实际上,它们对耐磨性和生热的影响较小。但是,提高抗掉块/崩花性能的巨大潜力促使我们在公司之间开展一项联合试验项目,以评价短纤维在工程机械轮胎胎面中的应用效果。选择一种与普通不饱和弹性体相容的叫作“TCF”的短纤维。翻新轮胎胎面的胶料在工厂进行混炼,轮胎规格从牵引用的 18.00×33 和 24.00×35 到载重

用的 65.35×33。试验在美国的许多采石和采矿场所,如乔治亚州、佛罗里达州、宾夕法尼亚、纽约和其它地方进行,评估上百条轮胎。

初步的测试包括一般用量的 TCF 与白炭黑(7.0 份)并用,与现在使用的性能优良的炭黑填充 NR 胎面进行比较,两者都采用普通硫化体系。与前面的标准实验室试验结果相比,室外的试验结果至少可以说是突出的。下面列出室外试验观察到的优点。

(1)胎面表面很光滑,即使有掉块/崩花,也是很少。

(2)磨损率大幅度降低(胎面寿命延长 50%~100%)。

(3)现场使用许多小时后无本质上的磨损。

试验主要变量和结果见表 2。撕裂试验和抗掉块/崩花试验结果表明,装载机和一些牵引机轮胎的性能仅有适度提高;还观察到没有防止割口的产生,但阻止了割口增长。

表 2 TCF/白炭黑并用对胶料性能的影响

| 项 目                           | 对比胶料    | 试验胶料    |
|-------------------------------|---------|---------|
| 用量/份                          |         |         |
| NR                            | 100     | 100     |
| 炭黑                            | 50.00   | 45.00   |
| 白炭黑                           | 0       | 7.00    |
| TCF                           | 0       | 2.50    |
| 硫黄                            | 2.25    | 2.00    |
| 促进剂 NS                        | 0.60    | 1.00    |
| 实验室试验                         |         |         |
| 邵尔 A 型硬度/度                    | 69      | 67      |
| 300%定伸应力/MPa                  | 12.14   | 7.81    |
| 扯断伸长率/%                       | 522     | 596     |
| C 型撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) | 65.6    | 81.9    |
| 疲劳寿命(伸长 100%)/次               | 29 000  | 54 000  |
| 德墨西亚破坏寿命/次                    | 250 000 | 100 000 |
| 环形屈挠*/h                       | 51      | 56      |
| 抗掉块/崩花性能                      | 230     | 300     |
| 轮胎试验                          |         |         |
| 胎面厚度减小 50%所用时间/h              | 1 020   | 2 180   |
| 胎面外观                          | 粗糙/崩花   | 光滑      |
| 预期寿命/h                        | 2 000   | >4 000  |

注: \* 割口增长到初始割口 5 倍的时间。

这些最初的试验包括两个变化,即 TCF 和白炭黑。正如工厂中任何新的变化一样,人们对开炼时轻微增加的硬韧性略有抱怨,因此开始进行无白炭黑的新试验。针对全 NR 胎面,减小炭黑用量(低粘度、生热),增大 TCF 用量,不填充白炭黑,同样试验上百条轮胎。表 3 列

出了主要变量和与第 1 次类似试验的结果。可以看出,轮胎的耐用性依然令人满意,掉块/崩花可以忽略不计,但与 TCF/白炭黑并用体系相比,胎面寿命略有缩短。另外,采用第 2 种配方(即无白炭黑,加入低用量炭黑和 TCF)的实验室试验结果显示生热明显降低,当在气温较高的地区用于牵引机轮胎时更具优势。此试验的掉块/崩花结果比前面低很多,但也证明了白炭黑在提高撕裂强度方面的作用。两种含 TCF 的胎面在磨耗方面的试验结果概括于图 1。必须再次强调,实验室试验数据还不能有效地反映轮胎试验结果。

2.2 SBR 替代 NR

最初用 SBR 替代 NR,严格来讲是因为成本的关系,其目的是使 SBR 获得与 NR 相当的滞后/生热。通过采用低用量炭黑(通常 NR 的用量比 SBR 低),增大硫化剂用量来实现,但要

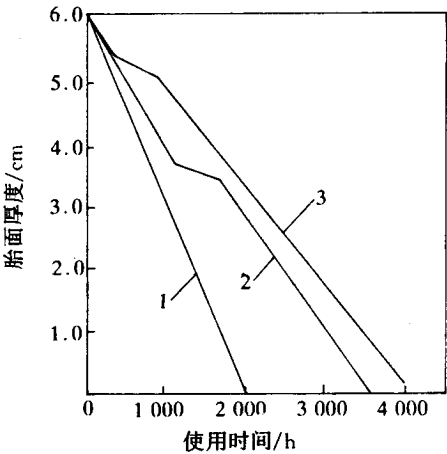


图 1 TCF 对工程机械轮胎胎面耐磨性的影响  
1—对比胶料;2—含 TCF 胶料;3—TCF/白炭黑并用胶  
牺牲可能关系实际使用性能的撕裂强度。表 4 概括了一些采用优化配方所观察到的重要性能。

考虑到工程机械轮胎的性能,必须兼顾两种弹性体的优点,决定以 SBR 部分替代 NR。用 SBR1500 替代 20%,40% 和 60% 的 NR,进

表 3 TCF 对胶料性能的影响

| 项 目               | 对比胶料    | 试验胶料   |
|-------------------|---------|--------|
| 用量/份              |         |        |
| NR                | 100     | 100    |
| 炭黑                | 50.0    | 42.0   |
| 操作油/松焦油           | 10.0    | 4.0    |
| TCF               | 0       | 2.5    |
| 硫黄                | 2.25    | 2.25   |
| 促进剂 NS            | 0.65    | 0.75   |
| 实验室试验             |         |        |
| 邵尔 A 型硬度/度        | 66      | 65     |
| 300%定伸应力/MPa      | 13.19   | 11.05  |
| 扯断伸长率/%           | 501     | 556    |
| 裤形撕裂力/N           | 14.23   | 20.46  |
| Lupke 回弹值/%       |         |        |
| 24℃               | 63      | 71     |
| 70℃               | 72      | 78     |
| 回弹衰减速率(-)         |         |        |
| 24℃               | 0.159   | 0.120  |
| 70℃               | 0.129   | 0.095  |
| 疲劳寿命(伸长 100%)/次   | 111 000 | 78 000 |
| 固特里奇屈挠试验          |         |        |
| Δθ/℃              | 38      | 19     |
| 变形/%              | 21.2    | 12.3   |
| 皮克磨耗指数            | 156     | 133    |
| BFG 环形屈挠°/h       | 44      | 77     |
| 抗掉块/崩花性能          | 158     | 129    |
| 轮胎试验              |         |        |
| 胎面厚度减小 50% 所用时间/h | 1 020   | 1 900  |
| 胎面外观              | 粗糙/崩花   | 光滑     |
| 预期寿命/h            | 2 000   | 3 600  |

注:同表 2。

表 4 SBR 替代 NR 对胶料性能的影响

| 项 目                            | 对比胶   | 配方编号           |                |
|--------------------------------|-------|----------------|----------------|
|                                |       | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> |
| 用量/份                           |       |                |                |
| SMR 5CV                        | 100   | 0              | 0              |
| SBR1500                        | 0     | 100            | 100            |
| 炭黑 N330                        | 50.0  | 50.0           | 45.0           |
| 高芳烃油                           | 5.0   | 5.0            | 5.0            |
| 氧化锌                            | 3.5   | 3.0            | 3.0            |
| 硬脂酸                            | 2.0   | 1.5            | 1.5            |
| 混合蜡                            | 1.5   | 1.5            | 1.5            |
| 防老剂 6PPD                       | 2.0   | 2.0            | 2.0            |
| 硫黄                             | 2.2   | 1.0            | 1.2            |
| 促进剂 MBS                        | 0.8   | 0              | 0              |
| 促进剂 NS                         | 0     | 2.5            | 2.5            |
| 硫化剂 DTDM                       | 0     | 1.2            | 1.6            |
| 门尼焦烧 t <sub>5</sub> (135℃)/min | 11.9  | 25.6           | 26.5           |
| t <sub>90</sub> (149℃)/min     | 13.2  | 26.7           | 25.5           |
| 硫化胶性能(149℃×t <sub>90</sub> )   |       |                |                |
| 邵尔 A 型硬度/度                     | 65    | 68             | 67             |
| 300%定伸应力/MPa                   | 12.68 | 17.30          | 16.78          |
| 拉伸强度/MPa                       | 29.04 | 22.20          | 19.49          |
| 扯断伸长率/%                        | 577   | 367            | 340            |
| C 型撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> )  | 133.2 | 49.4           | 43.1           |
| Lupke 回弹值/%                    | 72    | 70             | 72             |
| 回弹衰减速率(-)                      | 0.107 | 0.133          | 0.107          |
| 固特里奇屈挠试验                       |       |                |                |
| Δθ/℃                           | 25    | 23             | 18             |

行了大量的实验室试验。主要变量是改变硫化体系(半有效),用白炭黑部分替代炭黑,以及其它成分,诸如粘合剂(间苯二酚和亚甲基给予体)。不准备报告整个试验结果,但对过去的工作有所改进的重要结果记录如下:

(1) SBR 的量变对比(见表 5)显示 NR/SBR 并用比为 60/40 时胶料的性能具有最佳平衡,尤其是裤形撕裂性能和动态性能。注意略微调节硫黄/促进剂的比例以适应 SBR。

表 5 SBR 部分替代 NR 对胶料性能的影响

| 项 目                                                | 配方编号           |                |                |                |
|----------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                    | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> |
| 用量/份                                               |                |                |                |                |
| SMR 5CV                                            | 100            | 80             | 60             | 40             |
| SBR1500                                            | 0              | 20             | 40             | 60             |
| 硫黄                                                 | 2.2            | 2.0            | 2.0            | 2.0            |
| 促进剂 MBS                                            | 0.8            | 1.0            | 1.1            | 1.2            |
| 门尼焦烧 $t_5(121\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{min}$ | 42             | 55             | 62             | 67             |
| $t_{90}(150\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{min}$   | 15.2           | 19.8           | 23.7           | 27.8           |
| 300%定伸应力/MPa                                       | 10.72          | 10.76          | 10.66          | 11.12          |
| C 型撕裂强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )          | 112            | 123            | 45             | 40             |
| 裤形撕裂试验(全部多节撕裂)                                     |                |                |                |                |
| 最大撕裂力/N                                            | 14.2           | 17.8           | 36.5           | 80.5           |
| 打结频率                                               | 18             | 13             | 8              | 4              |
| Lupke 回弹值/%                                        | 69             | 66             | 65             | 65             |
| 回弹衰减速率(-)                                          | 0.144          | 0.167          | 0.166          | 0.172          |
| 固特里奇屈挠试验*                                          |                |                |                |                |
| $\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$                    | 34             | 31             | 32             | 33             |
| 变形/%                                               | 20.2           | 16.6           | 12.4           | 14.2           |

注: \* 试验条件为:冲程 0.44 cm, 负荷 1.55 MPa, 温度 100  $^{\circ}\text{C}$ , 时间 30 min。

基本配方为:橡胶 100; 炭黑 N330 50; 油 5.0; 氧化锌 3.5; 硬脂酸 2.0; 防老剂 6PPD 2.0; 防老剂 TMQ 1.0; 石蜡 1.5。

(2) 用白炭黑部分替代炭黑后观察到抗掉块/崩花性能及撕裂强度有一定的改善。

表 6 显示填充白炭黑的 NR 和 NR/SBR (并用比 60/40) 都有令人满意的结果。当添加粘合剂时需要增加硫化剂来保持模量(如填充白炭黑一样),但过去的工作证明在撕裂强度上存在优势。总的来说,当 NR/SBR 并用比为 60/40,炭黑/白炭黑并用比为 40/10 和采用半有效硫化体系是最佳配方。

在上述胶料中加入 TCF 后可大大改进现场使用性能。下一步工作包括应用前述的大量室内试验和现场使用结果改进胎面翻新轮胎耐用性的试验。此工作的关键变化是:

表 6 白炭黑和粘合剂的效果

| 项 目                                                          | 配方编号           |                |                |                |                |
|--------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                              | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> |
| 用量/份                                                         |                |                |                |                |                |
| SMR 5CV                                                      | 100            | 100            | 100            | 60             | 60             |
| SBR1500                                                      | 0              | 0              | 0              | 40             | 40             |
| 炭黑 N330                                                      | 50             | 40             | 40             | 40             | 40             |
| HiSil 233                                                    | 0              | 10             | 10             | 10             | 10             |
| 硫黄                                                           | 2.5            | 2.5            | 2.5            | 1.5            | 1.5            |
| 促进剂 MBS                                                      | 0.8            | 1.5            | 1.5            | 1.5            | 2.0            |
| 硫化剂 DTDM                                                     | 0              | 0              | 1.0            | 0.6            | 1.0            |
| Penacolite B18S                                              | 0              | 0              | 3.5            | 0              | 3.5            |
| 粘合剂 HMMM                                                     | 0              | 0              | 2.5            | 0              | 2.5            |
| 门尼焦烧 $t_5(121\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{min}$           | 27.6           | 28.0           | 20.0           | 40.5           | 27.0           |
| 300%定伸应力(127 $^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h})/\text{MPa}$ | 13.62          | 12.96          | 12.18          | 12.41          | 11.33          |
| 裤形撕裂力/N                                                      | 8.9            | 6.2            | 13.3           | 34.7           | 19.6           |
| 固特里奇屈挠试验*                                                    |                |                |                |                |                |
| $\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$                              | 26             | 18             | 23             | 25             | 32             |
| 变形/%                                                         | 11.9           | 9.1            | 12.7           | 9.6            | 15.2           |
| 抗掉块/崩花性能                                                     | 328            | 402            | 371            | 493            | 386            |
| 皮克磨耗指数                                                       | 171            | 187            | 149            | 185            | 122            |

注: \* 试验条件为:下沉量 17.5%, 负荷 1.55 MPa, 温度 100  $^{\circ}\text{C}$ , 时间 30 min。

- (1) NR/SBR 并用替代 NR;
- (2) 采用半有效硫化体系(促进剂/硫黄并用比为 1.5/1.5);
- (3) 加入 TCF, 但不填充白炭黑。

简单介绍一下 Brad Ragan 实验室开发的新型裤形撕裂试验。与普通试验方法相比的重要变化是试样的厚度。与普通试验方法使用的薄试样相比,它们更符合工程机械轮胎胎面。该试验可相当精确地预测工程机械轮胎胎面的户外使用性能,特别是撕裂性能和抗掉块/崩花性能。

试验装置由带控制套件的气缸和试样撕离夹钳组成,由连接在联动滑轮上的弹簧秤测定试样撕裂所需的力。

试样为 18.42 cm $\times$ 18.42 cm $\times$ 0.635 cm 的试片,硫化条件适当(一般为 148  $^{\circ}\text{C}\times 20, 30\text{ min}$ )。在实验室开炼机上下料时纵向和横向割取试样。从中间切开 1.27 cm 长,钳子各夹住一边。

试验结果见表 7。高品质的含 TCF 的胎面具有极好的性能。即使是标准品质的含 TCF 的胎面也显示出较好的抗掉块/崩花性能。

表 7 新型裤形撕裂试验结果

| 项 目                                                  | 实验室平均<br>撕裂力/N | 标准偏差 | 实际使用<br>性能                |
|------------------------------------------------------|----------------|------|---------------------------|
| CTA(地下采矿)轮胎胎面<br>(NR/SBR 并用、采用半<br>有效硫化体系及加入<br>TCF) | 376            | 6.26 | 10(无掉块/<br>崩花),耐<br>磨性优良  |
| Q&H(采石和牵引用)胎<br>面(含 TCF)                             | 371            | 21.9 | 9.0(轻微掉<br>块/崩花),<br>耐磨性好 |
| OEM 普通用途胎面<br>(无 TCF)                                | 329            | 24.0 | 7.5(有掉块/<br>崩花),耐<br>磨性中等 |

检查大约 30 条(选自 130 条轮胎)地下采矿(CTA)轮胎,观察现象如下:

(1)操作条件非常苛刻,许多情况是水和尖锐物并存,一些地区还有严重的自旋(打滑)。

(2)在多数情况下,从前的轮胎使用 20 h 或更少时间就损坏。

(3)目前这些轮胎已使用了 1 年,其中一些还是新的,而一些轮胎已使用了数千小时。

(4)全部相同的表现,即胎面表面光滑,本质上没有掉块/崩花,胎肩磨损很小。

### 3 结论

根据实验室试验和户外轮胎试验,得出以下结论:

(1)除能预测轮胎试验结果的新型裤形撕裂试验外,室内实验室试验数据与户外轮胎试验数据的相关性较差。

(2)加入 TCF 可提高抗掉块/崩花性能。

(3)用白炭黑部分替代炭黑可提高室内室外性能。

(4)最佳的弹性体体系是并用 NR/SBR、采用半有效硫化体系及加入某些变量(如 TCF 等)。适用于装载机和牵引机的高性能胎面配方如下:

NR 60;SBR 40;炭黑 N231 40.0;白炭黑 10.0;油 3.0;氧化锌 5.0;硬脂酸 2.0;防老剂 TMQ 2.0;防老剂 6PPD 2.0;TCF 2.25;混合蜡 1.5;硫黄 1.5;次磺酰胺(促进剂 MBS 或 NS) 1.5 或 0.7;硫化剂 DTDM 0.6 或 1.5。

译自德国“Kautschuk + Gummi·Kunststoffe”,

38[6], 494~498(1985)