

通过优化设计改进轻卡子午线轮胎的耐老化性能

轮胎老化是轻型卡车（LT）大规格轮胎故障的重要原因，如果环境温度高且日照时间长，这些轮胎更容易出现老化耐久性问题。美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）已经研究轮胎老化耐久性近15年，现在已经确定了一种合适的室内试验方法，该方法可能会在未来写入FMVSS标准。

本文将从轻型子午线轮胎的结构入手，根据轮胎的老化和耐久性特点采取相应措施，最后，通过测试验证，获得了明显的改进效果。

1 老化机理分析

与普通耐久性失效相比，老化耐久性在失效现象和失效原因方面存在一些差异，主要体现在本文所述的四个特征上。

1.1 化学老化是故障的主要原因

在实际使用中，有许多因素会导致轮胎性能下降，但其机理主要可分为化学老化和机械老化。

然而，如果仅使用转鼓试验（机械老化）来模拟轮胎老化，则对轮胎性能退化的影响并不显著。通过收集市场上使用过的轮胎，发现了一个有趣的现象：不仅使用多年的轮胎会发生老化性能下降，未使用的备用轮胎老化也非常严重，性能下降仅略低于正常运行的轮胎（约70%至80%）。

因此，得出以下主要结论：对于轮胎老化而言，化学老化是主要问题；行驶里程不是关键因素；轮胎类型、臭氧、湿度和路况等其他因素对胎体的损坏并不重要；影响老化程度的关键因素是环境温度和轮胎类型。

1.2 老化会影响胶料和材料的性能

随着老化时间的增加，胶料的硬度、模量、交联密度和含氧量增加；而拉伸强度、极限伸长率、剥离附着力和弯曲性能会随着时间的推移而降低。

佳通轮胎做了大量的物理测试，并比较了轮胎各部分的胶料（胎面胶、胎侧胶、顶点和轮辋缓冲[RC]橡胶），以期发现轮胎老化前后橡胶性能的变化。不

同硬度水平和位置的详细测试数据如表1~4所示。

表1 胎面胶老化前后物理性能试验对比

	轮胎A		轮胎B	
	老化前	老化前	老化前	老化前
硬度, HA	63	67	63	68
密度, g/cm ³	1.144	1.14	1.188	1.192
M100, MPa	2.7	3.3	2.5	4
M300, MPa	11.7	14.7	11.6	16.3
TS, MPa	20.8	22.4	20.3	20.1
Eb, %	483	437	507	381
永久变形, %	18	13	22	14

表2 胎侧橡胶老化前后的物理试验比较

	轮胎A		轮胎B	
	老化前	老化前	老化前	老化前
硬度, HA	49	57	45	54
密度, g/cm ³	1.103	1.104	1.103	1.11
M100, MPa	1.4	2.3	1.3	2.3
M300, MPa	5.9	9.1	5.5	9.4
TS, MPa	14.9	13.4	13.4	13.6
Eb, %	616	428	617	419
永久变形, %	11	6	11	6

表3 老化前后轮胎顶点的物理测试比较

	轮胎A		轮胎B	
	老化前	老化前	老化前	老化前
硬度, HA	86	89	86	87
密度, g/cm ³	1.178	1.176	1.18	1.179
M100, MPa	7.4	11.5	7.5	11.1
M300, MPa	-	-	-	-
TS, MPa	15.3	15.1	15	14.5
Eb, %	207	133	201	131
永久变形, %	8	6	10	5

表4 RC橡胶老化前后物理性能试验对比

	轮胎A		轮胎B	
	老化前	老化前	老化前	老化前
硬度, HA	65	74	66	74
密度, g/cm ³	1.186	1.188	1.179	1.18
M100, MPa	4.7	8.7	4.8	8.6
M300, MPa	-	-	-	-
TS, MPa	16.8	17	16.2	15.8
Eb, %	263	165	248	162
永久变形, %	6	2	7	3

通过物理测试发现，轮胎胶料的硬度和刚度增加，橡胶材料的强度大大降低，恢复变形的能力也降低。经过轮胎转鼓老化试验后，发现损伤部位主要在胎侧和胎圈。通过物理性能分析，RC和胎侧橡胶的

硬度和刚度都有很大提高，胎顶强度大大降低，这说明这三个部位的性能变化可能会对轮胎的耐久性产生较大影响。

一般来说，老化的轮胎橡胶和帘线会变得又硬又脆，不利于轮胎的耐久性。

1.3 不同类型的轮胎具有不同的性能退化

选择不同规格和类型的轮胎，通过老化前后的转鼓试验来比较耐久性的变化。表5显示了比较试验的结果。

表5 不同规格老化耐久性试验数据比较

规格规格	老化前	老化后
155/80R12 77T	200 h/200 h	200 h/200 h
165/70R13 79H	200 h/200 h	200 h/200 h
195/65R15 91H	200 h/200 h	200 h/200 h
205/40ZR17 84W	200 h/200 h	200 h/200 h
205/55R16 91V	200 h/200 h	200 h/200 h
P265/70R17 113T	200 h/200 h	114.4 h/49.02 h
LT245/75R16 120/116S	200 h/200 h	4.62 h/18.92 h
LT265/70R17 121/118Q	200 h/200 h	18.25 h/18.93 h
LT275/65R18 123/120Q	200 h/200 h	65.57 h/29.98 h

将老化的轮胎放进冲入了50%/50%的氮氧混合气体中，然后在65℃的烘箱中老化5周，混合气体每周更新一次。老化试验后，对FMVSS139参比物的低压耐久性试验方法进行试验；机器试验参照FMVSS139的低压耐久性试验方法，在转鼓上进行，直到轮胎损坏，然后停止。如果测试时间达到200h，并且轮胎没有损坏，则手动停止机器并完成测试。

通过这一阶段的研究发现，规格较小、载荷较低的轮胎在老化前后性能几乎没有变化。对于规格更大、载荷更高的轮胎，老化后的耐久性测试时间大大缩短，大部分缩短时间在100h以上。大部分损坏之处在于胎肩和胎冠开裂或橡胶脱落（70%），其他损坏包括胎圈鼓起（30%）。

由此可以判断，耐久性老化问题主要表现在大规格、高负荷轮胎上，LT型轮胎表现更为明显，而普通乘用车轮胎表现较好。

2 解决方案

基于以上研究的机理，对轮胎结构进行了三次调整。

2.1 内衬厚度

研究表明，耐久性测试结果与氧气扩散能力有更大的相关性。在转鼓试验和道路行驶过程中，气体扩散引起的内压增加和胎体氧化降解是导致带束层边缘分层和膨胀的重要因素。在所有转鼓耐久性试验中，

充气压力损失率最低的轮胎具有最佳的试验结果。

内衬用天然橡胶代替溴代异戊二烯橡胶后，老化后性能下降。随着内衬中溴代异戊二烯橡胶含量的增加，透气性呈线性下降。因此，在目前使用的内衬配方的基础上增加内衬厚度或增加肩带以提高保气性能是提高耐老化性的一种对策，这将在下一阶段得到验证。

2.2 胎圈处的耐久性

对于由橡胶、纤维和金属骨架材料组成的轮胎，只要施加一定的空气压力，就会发生变形。当轮胎运行时，施加在轮胎上的载荷、驱动力、制动力和侧向力可能会对轮胎的某个部分产生一定的力。通过计算机有限元模拟工具的分析，发现焊道上的应力较大（图1）。此外，现有的轮胎结构设计技术在胎圈中聚集了大量的端点，通常包括帘布层上翻端点、胎圈包布端点、RC端点、顶点端点、加强层端点和白胶端点。

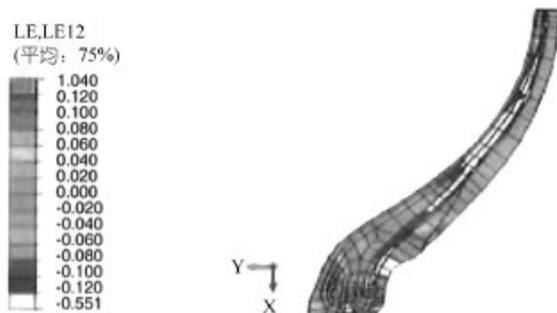


图1 预优化方案

胎圈上有许多端点，应力集中和高发热会导致帘线与橡胶的附着力下降，不利于轮胎的耐久性。在实际使用中，表现为轮胎胎圈脱层，严重影响汽车的行驶安全。

从图2的云图中可以看出，优化后的方案在胎圈处的剪切力小于优化前的方案。

2.3 带束层耐久性

分析了轮胎老化耐久性试验后的损伤部位。最严重的损坏始于带束层的末端，然后整个第一个带束层和第二个带束层分离，最终导致轮胎胎肩损坏。带束层末端的主要材料是胶条（GS），胶条安装在第一个带束层和第二个带束层之间。

此外，还利用有限元分析工具分析了加厚带束层复合材料对带束层端点应力的影响。结果表明，加厚胶条对肩部耐久性有积极影响。从图3和图4的云图中可以看出，1.6 mm厚的胶条在肩部剪切力方面明显

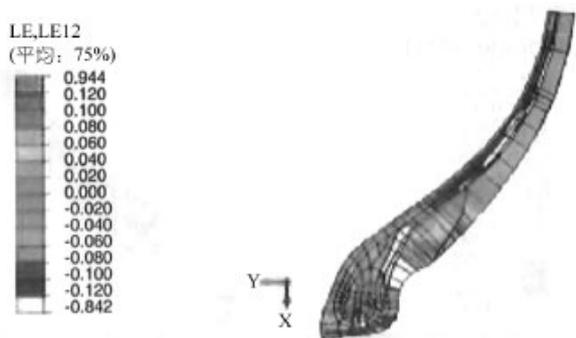


图2 优化方案

优于 0.8 mm厚的胶条。同时，为了提高带束层的耐久性，应优先选择封闭层钢丝，避免使用一般的开口型钢丝。



图3 GS厚度0.8 mm



图4 GS厚度1.6 mm

由于带束层的切割端没有黄铜涂层，因此会出现套接现象。橡胶不会粘附在裸露的钢丝上。随着带束层的运动，套接面积变大；随着带束层的持续移动，套接区域在相邻的钢丝端部之间逐渐接合（图5）。

3 第一阶段成品试验

选择LT265/75R16轮胎作为性能验证的原型产品。根据原始结构生产的轮胎标记为A，根据当前结构生产的车轮标记为B。A和B之间的差异如表6所示。

3.1 物理规格

根据GB/T 521-2012轮胎外形规格测量方法测量轮胎截面宽度和外周长。结果表明，轮胎A和B的截

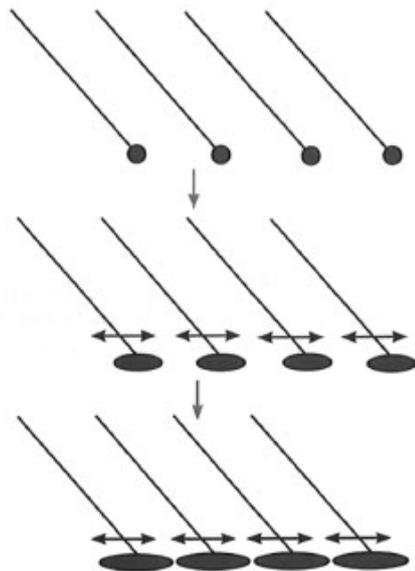


图5 带束层分离机理

表6 轮胎设计

	轮胎 A	轮胎 B
胎体	H1P: 80 mm ; H2P: 20 mm	H1P: 105 mm ; H2P: 80 mm ; L3P: 0 mm
内衬厚度	1.0 mm	1.7 mm
GS厚度	0.8 mm	1.6 mm
顶点高度	55 mm	15 mm

注：H1P 为第一层上翻的高度；H2P 为第二层上翻的高度；L3P 为第三层下翻的低点。

面宽度分别为272.0 mm和270.0 mm，总直径分别为808.0mm和809.0 mm。轮胎均符合国家标准要求（断面宽度257.0~280.0 mm，总直径793.0~815.0 mm）。

3.2 胎圈抗脱离性能

根据GB/T4050-2016载重汽车性能室内试验方法进行的试验结果表明，A、B轮胎的脱圈阻力分别为36 116N和36 892N，满足国家标准（≥11 120N）的要求。

3.3 强度性能

根据GB/T 4501-2016《载重汽车轮胎性能室内试验方法》进行的强度性能试验表明，A、B轮胎强度分别为1 626J和1 891J，满足国家标准要求（≥972J）。

3.4 高速性能

根据GB/T 4501-2016《载重汽车轮胎性能室内试验方法》进行高速性能试验。在达到国家标准要求后，按照企业标准继续进行试验，直到轮胎损坏。试验条件和结果如表7所示。

从表7中可以看出，A、B轮胎的高速性能试验结果符合国家标准和企业标准的要求。在轮胎上高速行驶时，离心力变大，胎冠温度持续升高，橡胶老化严

重，性能下降，导致胎冠塌陷。

表7 轮胎高速性能测试条件和结果

工艺流程	速度 (km/h)	时间 (min)	
1	0~150	10	10
2	150	10	10
3	160	10	10
4	170	30	30
5	180	10	10
6	190	10	10
7	200	10	10
8	210	10	10
9	220	4.5	8.4

注：充气压力为 550 kPa，负荷为 90%（额定负荷为 1 395 kg）；当 A 轮胎行驶 4.5 min×220 km/h 时，胎冠塌陷，试验终止；当 B 轮胎行驶 8.4 min×220 km/h 时，胎冠塌陷，试验终止。

3.5 老化耐久性试验

为了验证耐久性，使用了美国DTAP烘箱老化试验方法，该方法首先在烘箱中对轮胎进行老化，以模拟轮胎使用多年后的性能退化。根据研究，该条件可以模拟使用4年后的轮胎（表8）。

表8 轮胎烘箱老化试验条件

最小参数	老化试验条件
气体	50%/50% O ₂ -N ₂ 混合气体
压力	100% 胎侧压力 (550 kPa)
温度	65° (±2.0°)
时间	5周
气体再充气	每两周更换一次混合气体

在烘箱中进行老化试验后，进行耐久性机器试验。试验条件和结果如表9所示。这种规格的标准最大充气压力为500kPa。

表9 轮胎耐久性试验条件和结果

工艺流程	负荷率 (%)	压力 (kPa)	速度(km/h)	时间 (h)
1	85	410	120	4
2	90	410	120	6
3	100	410	120	24
4	0	320	0	2.5
5	100	320	120	1.5
6	100	320	120	9.5
7	100	320	120	6.5
8	100	320	120	8
9	100	320	120	8
10	100	320	120	Damage

轮胎老化后的耐久性试验结果显示，轮胎A累计行驶37.8h，行程4 536公里，花纹块脱落，试验终止；B轮胎累计行驶200h，行程24 000公里，轮胎外观完好，带束层末端有气泡。

从损坏的现象来看，方案A的图案块被磨平；随后，通过剖切可以看出，轮胎内部出现了带束层脱落现象。由于烘箱的老化过程，加速了橡胶与氧气的反应，可以快速模拟自然使用条件下橡胶性能退化的过

程。在带束层的末端，有一组胎面胶和胎侧橡胶。烘箱老化过程导致这些橡胶的性能下降，并且带束层的末端是轮胎应力集中的位置。因此，在老化耐久性测试后，首先损坏了带束层的端点（图6），然后胎面花纹块掉落。这种损伤是典型的老化后的耐久性损伤。

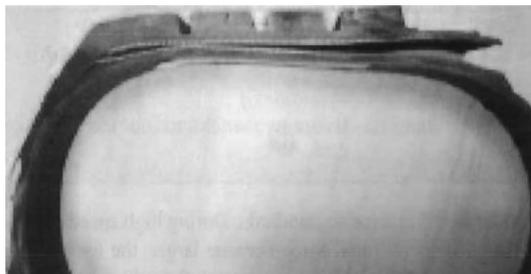


图6 老化试验后的方案A

方案B即使经过了200h的转鼓试验，轮胎的外观仍然完好无损。通过轮胎无损检测机，发现带束层末端有气泡。气泡产生的原因（图7）是在轧制过程中，带束层连续变形，导致带束层末端产生恒定的剪切应变，这将导致带束层钢丝和端点橡胶之间出现小缝隙。轮胎无损检测对轮胎周围环境抽真空，导致轮胎内部缝隙因压力而膨胀；然后通过x射线检查，缝隙以气泡的形式显示出来。由于方案B的无损检测结果是带束层末端有一个小气泡，并且带束层末端的缝隙在耐久性测试中很常见，因此损坏不严重。

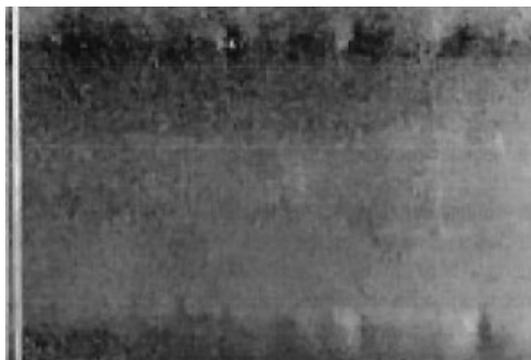


图7 方案B无损胎冠

从老化后的耐久性测试可以看出，方案B 的老化耐久性比方案 A 提高了 6 倍以上，改进方案的老化耐久性明显提高。

4 改进胎肩耐久性

通过第一阶段的改进和验证，改进后的结构的耐老化性能显著提高，其他性能符合国家法律法规的要求。进一步的研究已经开始，以确定是否有办法继续改善老化耐用的胎肩损伤。

4.1 带束层膨胀率 (L_b)

除了带束层的材料、宽度和结构外，影响带束层肩部应力的另一个重要因素是：带束层膨胀率 (L_b)。

L_b通常用于表征子午线轮胎从半成品到成品的带束层膨胀率。因为带束层的作用可以约束轮胎，所以L_b也可以表示对轮胎的约束程度。通常，可以使用图8所示的公式来计算L_b。

$$L_b = \frac{J-DIA \cdot 2 \times (MGD + TG1 + 1.03 \times T_F + 0.75 \times 1.25 \times T_B \times K1 - \frac{T_{Last} \times K_2 - D_{cord}}{2})}{L_{1stB}/\pi + 0.5 \times T_B}$$

其中：

- J-DIA: 轮胎模具外径
- MGD: 轮胎模具的凹槽深度
- TG1: 槽底厚度
- T_F: 覆盖层全带半成品厚度
- T_B: 带束层半成品总厚度
- K₁: 带束层钢丝系数
- T_{Last}: 胎冠最后一层的厚度
- K₂: 胎冠材料系数
- D_{cord}: 最后一层材料的直径
- L_{1stB}: 带束层贴台鼓周长

图8 带束层膨胀率计算公式

4.2 L_b对成品轮胎的影响

L_b的规格影响轮胎的性能和规格。过大的L_b设计会导致带束层膨胀过大 (图9)，并且带束层对胎体的约束应力过大，从而导致胎体分离。



图9 带束层膨胀过大导致的内部裂纹

然而，L_b太小的设计将导致带束层的膨胀太小；胎体的粘合性能不足，容易导致橡胶从胎肩和胎冠脱落；并且轮胎膨胀率小会导致胎肩材料堆积和轮胎内部出现不均匀情况 (图10)。所以L_b的设计必须是合理的，太大和太小都会产生不利影响。

5 L_b对成品轮胎的影响：有限元模拟验证

在轮胎行业中，带束层L_b的设计通常为L_b 1.03±0.1。为了研究更极端的情况，佳通轮胎选择了L_b 1.02和L_b 1.05进行计算机有限元模拟分析，分析规

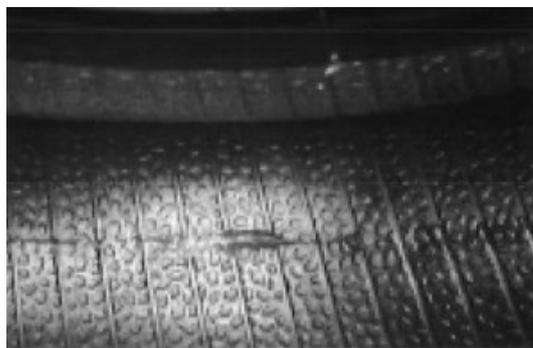


图10 带束层膨胀小导致内部不平

范适用于LT265/65R17轮胎。结果如图11和图12所示。



图11 带束层膨胀率为1.02时的胎肩应力分析



图12 带束层膨胀率为1.05时的胎肩应力分析

从应力图中可以看出，与1.02相比，1.05处的肩部应力可以减少约10%。后来，尝试了不同的L_b进行实验验证。

5.1 方案确定

根据计算机模拟分析的结论，L_b越大，肩部的应力越好。在此基础上，选择LT265/75R16轮胎作为试品。

在第一阶段改进后，通过调整带轮的周长和改变带束层的L_b，分别对L_b为1.02~1.05的试品轮胎进行了测试，以供后续测试验证 (表10)。

表10 不同带束层膨胀率的轮胎

方案	带束层贴台鼓周长	膨胀率
轮胎C	2,355	1.02
轮胎D	2,330	1.03
轮胎E	2,310	1.04
轮胎F	2,290	1.05

6 第二阶段成品试验

6.1 成品对带束层角度和密度的影响

不同的 L_b ，会引起带束层不同的拉伸变化。理论上，随着 L_b 的增加，带束层角度和带束层密度也会增加，但实际程度需要经过测试。

将四种方案的轮胎剖开，测量带束层角度和密度的变化，如表 11 所示。

可以看出， L_b 从 1.02 变为 1.05，成品轮胎的带束层角度和密度变化不大，可以忽略。

表11 带束层角度比较

	半成品角度	半成品密度	成品角度	成品密度
轮胎C	24°	25	22.5°	54
轮胎D	24°	25	23°	55
轮胎E	24°	25	23°	54
轮胎F	24°	25	23°	55

6.2 强度测试

根据中国国家标准，进行了强度试验对比，以验证不同带束层提升对轮胎强度的影响。测试结果如表 12 所示。根据强度测试结果， L_b 越大，轮胎的强度性能越好。

表12 强度试验对比

方案	结果
轮胎 C	688.4J
轮胎 D	690.6J
轮胎 E	704.7J
轮胎 F	715.3J

6.3 刚度测试

带束层是影响轮胎刚度的关键，为了验证不同的带束层提升会改变轮胎各个方向的刚度，进行了相关的实验验证。

试验结果（表13）表明，轮胎的径向刚度和扭转刚度变差，纵向刚度和横向刚度变化不大。

表13 刚度测试比较

方案	径向刚度	纵向刚度	横向刚度	扭转刚度
轮胎 C	49.86	38.87	20.93	128.97
轮胎 D	48.98	39.14	21.44	120.32
轮胎 E	48.24	39.25	21.87	114.28
轮胎 F	47.90	39.26	21.55	111.54

6.4 接触压力分布试验

针对 L_b 值变化对轮胎接触压力分布试验的影响，还进行了相关试验验证（表 14）。结果表明， L_b 增大时，接触面积变化不大，但纵轴变短，横轴变长，矩形率变小。

表 14 接触压力分布测试比较

方案	纵轴	横轴	接触面积	矩形率
轮胎 C	179.6	182.5	28,578	79.4
轮胎 D	181.4	179.5	28,489	77.4
轮胎 E	186.8	176.9	28,424	74.2
轮胎 F	188.4	175.4	27,874	73.7

6.5 高速试验

轮胎的高速性能也是一个关键的性能指标。它可以测试胎肩的应力性能。为了比较 L_b 的变化对高速性能的影响，选择中国国家标准高速试验进行比较试验。试验条件如表7所示，结果如表15所示。所有方案的损坏现象都与从肩部掉落的花纹块相同。结果表明， L_b 的增加对高速性能的影响很小。

表15 高速性能试验比较

方案	测试里程	测试结果
轮胎 C	274	210×7
轮胎 D	269	210×7
轮胎 E	262	210×5
轮胎 F	274	210×8

6.6 老化耐久性试验

最后，验证了 L_b 对轮胎老化耐久性试验的影响。试验结果如表16所示。所有方案的损坏现象与从路肩上掉落的挡块相同。

由此可见，增加 L_b ，可以提高胎肩的老化耐久性。基本 L_b 每增加0.01，老化耐久性可提高约24 h。

表16 老化耐久性试验对比

方案	测试里程/km	测试结果/h
轮胎 C	19,560	163
轮胎 D	22,800	190
轮胎 E	25,920	216
轮胎 F	28,680	239

7 结论

随着人们生活水平的提高，轮胎的安全性能将越来越受到重视。尽管目前的老化耐久性测试尚未写入法规，但它也将成为未来的一种趋势。轮胎制造商应吸取以往轮胎报废的教训，提前计划开发相关技术，以提高轮胎的抗老化性能。

本文分别从材料结构设计和带束层提升设计两个阶段，再现了佳通轮胎在耐老化和耐久性方面的研究，以期提高轮胎的耐老化性能，同时在物理规格、强度性能、胎圈抗脱离性能和高速试验方面均符合国家标准。采用这种优化设计生产轮胎，有利于提高产品质量，增强产品的市场竞争力。

摘编自《Rubber World》No.9/2021

章羽