

未来的经济型钢丝帘线结构

Arkens O 等著 王晓冬摘译 涂学忠校

钢丝帘线是由细钢丝合股而成的,用作汽车轮胎、输送带和胶管的增强材料。随着战后钢丝子午线轮胎的普及,不仅在欧洲而且在美国和日本,钢丝帘线的消耗量均增大。在新兴的工业化国家,随着道路质量和轮胎的子午化水平的进一步提高,钢丝帘线的用量正急剧增长。

近年来,全世界轮胎子午化的发展情况见图 1。美国各种轮胎帘线的产量见图 2。

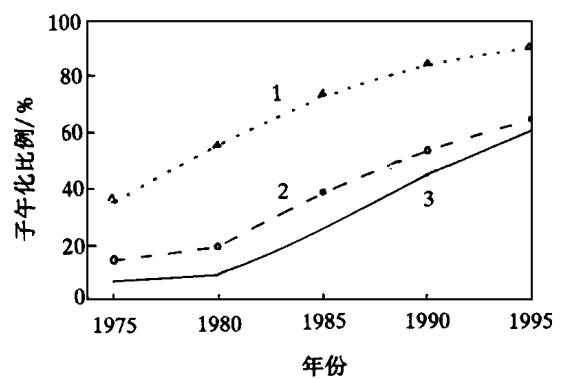


图 1 全世界轮胎子午化比例
1—轿车轮胎;2—中型和重型载重轮胎;
3—轻型载重轮胎

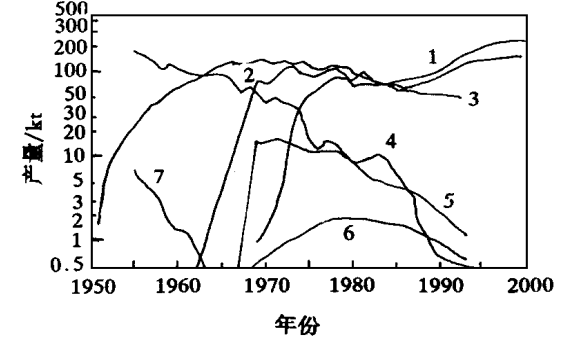


图 2 美国各种轮胎帘线的产量
1—钢丝;2—聚酯;3—尼龙;4—玻璃纤维;
5—人造丝;6—芳纶;7—棉

从图 2 可以看出,钢丝帘线对于轮胎生产者的重要性。钢丝子午线轮胎具有以下优点:

- (1) 改善耐磨性能;
- (2) 在轮胎高速行驶时生热低;

(3) 减小胶层厚度。

钢丝帘线的强度/密度比值低于尼龙、聚酯和芳纶等合成纤维,而且一般认为会导致轮胎质量增大。

钢丝帘线较高的强度/体积比明显补偿了其质量较大的缺点,换句话说,即采用较少的帘布层数和较小的布层厚度也可以获得相同的增强效果(强度和韧性等),从而减小轮胎质量、提高压延和轮胎成型生产效率。

180/55ZR17 轮胎的质量见表 1。

表 1 180/55ZR17 轮胎的质量		
项 目	0 冠带层子午线轮胎	子午线轮胎
胎面型号	Dragon	MP7-Sport
带束层	单层缠绕钢丝	2 层芳纶
	3 ×4 ×0.22	1680/2,20°
胎体	1 层尼龙	1 层尼龙
	1400/2,90°	1400/2,90°
轮胎质量/kg	6.4	7.0

从表 1 可以看出,钢丝帘线增强的高性能摩托车轮胎可以设计成质量小于采用芳纶增强的轮胎。因此,钢丝帘线供应商的一个重要课题就是通过提高钢丝强度并保持耐疲劳性能,以减小轮胎质量。

在与钢材生产商的共同合作下,开发出了高碳、高纯度的钢丝盘条。通过一系列的热处理和冷拉操作,随后进行合股,制成帘线。通过对每一步生产工序进行更深入的研究与开发,生产出的钢丝帘线具有特殊的比强度。根据经验,在 1/3 单丝强度确定的疲劳水平下,直径为 0.2 mm 且有空隙的丝线比强度可以达到 3 900 N·mm⁻²。

直径为 0.2 mm 的钢丝在不同拉伸态下的比强度(单位为 N·mm⁻²)分别为:一般拉伸 2 800;高拉伸 3 200;超高拉伸 3 600;极高拉伸 3 900。

钢丝盘条供应商和钢丝帘线生产商共同努力研究的结果表明,钢丝帘线的强度极限还没有达到。钢丝帘线的进一步优化和发展与轮胎

工业的发展要求直接相关,而轮胎工业必须满足现代化道路运输系统所提出的基本要求。

通过对钢丝帘线进一步均衡强度、韧性、杨氏模量、耐久性、尺寸稳定性、弹性、均匀性及经济性等独特性能,认为今后钢丝将成为占主导地位的骨架材料。

对钢丝帘线的基本研究除了提高强度和相应的耐疲劳性能以外,还在寻找理想的帘线结构,包括:简化结构、一步法生产、尽可能较少和较粗的钢丝丝线以及钢丝间磨损最小。

贝卡尔特公司的橡胶完全渗透的钢丝帘线(BETRU)是改善耐腐蚀性的又一个突破。橡胶完全渗透对于防止带束层中的钢丝帘线因破损(腐蚀)而导致的氧化和水分扩散是非常必要的,而且通过特殊的表面处理可以保证制止水分扩散和可能产生的腐蚀,从而使胎体帘布获得最佳保护。BETRU帘线在优化粘合性能以获得较高的粘合强度保持率方面也是一个突破。这种帘线一般采用专用黄铜镀层,对表面进行进一步的处理,可以获得与客户指定胶料的可能最好的粘合性能。

本文将进一步介绍赋予轮胎独特性能的这些钢丝帘线的发展情况。

1 理想的钢丝帘线结构

1.1 带束层用简化结构钢丝帘线

目前,高强度钢丝帘线(HT, SHT, UT)在钢丝帘线中占很大一部分,其中大部分应变为0.8%的普通碳素钢盘条被拉拔到实际应变为3.6%(截面积减小98%)。

这些开发工作旨在减小质量和降低成本。用于带束层的 2×0.30 HT或 3×0.30 HT结构的钢丝帘线已经为市场普遍接受,它们已逐渐替代价格较高的 $2+7 \times 0.22$ 和 5×0.25 。

直径为0.3 mm钢丝丝线性能和捻制帘线的性能见表2。

1.2 胎体用密实结构钢丝帘线

密实结构钢丝帘线是由几根钢丝丝线以相同的捻向同时加捻而成。 $3+9$ 层状结构钢丝帘线与 12×1 密实结构钢丝帘线比较示意图见图3。

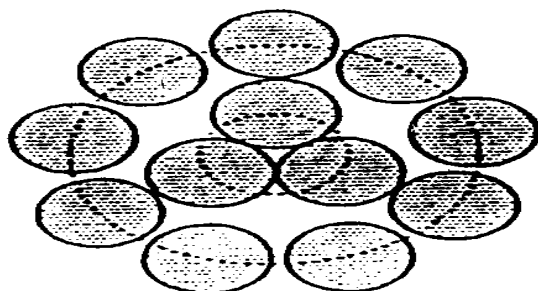
密实结构钢丝帘线具有以下突出优点:

(1)它可以一步或同步制成,因此生产成本

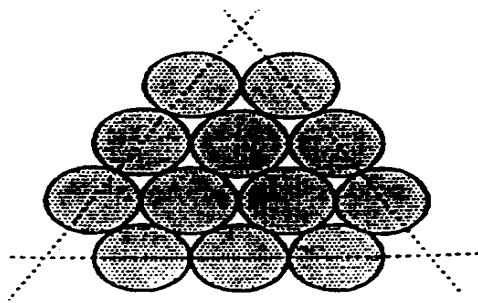
表2 钢丝丝线及帘线性能

项 目	一般拉伸	高拉伸	超高拉伸
钢丝丝线			
断裂强度/(N·mm ⁻²)	2 850	3 217	3 544
屈服强度/(N·mm ⁻²)	2 630	3 000	3 314
截面积减小率/%	45.6	39.1	40.5
扭力(200×Φ)	87	72	59
挠度(R=0.75 mm)	21	20	18
疲劳强度/(N·mm ⁻²)	1 033	1 133	1 250
钢丝帘线(2×0.30)			
弯曲负荷/N	392	444	494
冲击应力/N	112	132	144
疲劳强度/(N·mm ⁻²)	850	1 050	1 200

注:疲劳强度采用转动曲柄进行测试,埋置。



(a) 层状结构帘线



(b) 密实结构帘线

图3 帘线结构比较

较低;

(2)丝线间采取线接触,与不同层间点接触的钢丝帘线结构相比,由于接触面积较大,接触压力较小,因此将提高耐疲劳和耐磨损疲劳性能。

密实结构钢丝帘线具有密实的结构,多根钢丝排列在一个有限的横断面内,因此帘线的直径会减小,同时仍保持着原有的增强效果。但这种帘线有一个主要的缺点,特别是当帘线中所有单丝直径相同的时候,它们容易产生芯移,也就是说当帘线被裁断和反复弯曲,芯部的单丝会移出帘线。

芯移可以通过优化轮胎成型工艺和设计改

进的帘线结构加以避免。后者可以通过提高芯线周长,即采用较粗的芯线或减少外层丝线的数量来实现,这两种方法均具有较好的橡胶渗透能力,可以保证芯线机械锚定并抑制芯线的偏移倾向。具体结构见图 4。

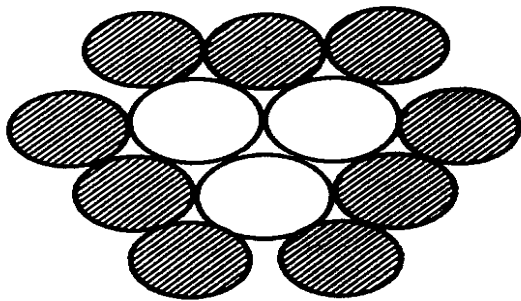


图 4 新密实结构钢丝帘线结构

耐用载重轮胎胎体的发展趋向于采用无缠绕密实结构钢丝帘线(具有改善橡胶渗透性的能力),这种帘线由于改善了耐磨损疲劳性能和具有优异的耐冲击性,因此优于层状结构钢丝帘线。

在实验室中对无接头带束层进行 40×10^6 周期疲劳测试,相当于轮胎行驶 120 000 km,钢丝丝线的断裂负荷损失率见表 3。

表 3 钢丝丝线的断裂负荷损失率

帘线类型	断裂负荷损失率/ %			
	芯线	内层	外层	总计
3 + 9 + 15 $\times 0.175$	1.95	2.14	7.80	5.30
12 $\times 0.22$ cc	—	—	—	0.50

注:转鼓直径为 143 mm;预应力为 $400 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$;试验周期为 40×10^6 。

密实结构钢丝帘线具有较高的强度保持率,为轮胎设计者提供了很多新的机会。在胎体强度计算中的安全因数通常会涉及到轮胎的总使用寿命和帘线的保持强度。因此,将层状结构钢丝帘线改为密实结构钢丝帘线后(例如,从 3 + 9 + 15 $\times 0.175 + 1$ 改为 19 $\times 0.175$ cc),小心地降低轮胎安全因数也是合理的。

在一个一流品牌的轮胎中将 3 + 9 + 15 $\times 0.175 + 1$ 改为 19 $\times 0.175$ cc,使轮胎胎体帘线质量减小了 10 %,见表 4。

1.3 为特殊性能要求定制的钢丝帘线

当对钢丝丝线施加拉伸力的时候,其应力-应变曲线中涵盖了弹性和塑性部分,弹性部分的斜率称为弹性模量,钢丝的弹性模量约为

表 4 不同胎体帘线的性能

性 能	3 + 9 + 15 $\times 0.175 + 1$	19 $\times 0.175$ cc
断裂负荷/ N	1 700	1 300
线密度/ (g $\cdot \text{m}^{-1}$)	5.2	3.7
经线密度	57	72
胎体强度/ (N $\cdot \text{m}^{-1}$)	969 000	936 000
胎体强度指数	100	96.5
帘线质量指数	100	90

$2.1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。但是,不同结构的钢丝帘线具有相似的应力-应变曲线,其弹性部分的斜率会因帘线结构性拉伸能力的不同而有所不同。这就是尽管弹性模量是每根钢丝丝线固有的材料性能,但不同结构钢丝帘线仍有不同的弹性模量的缘故。

通过适当的热力学处理,钢丝帘线生产商也可以改变选定帘线应力-应变曲线的塑性部分。正是钢丝帘线的高模量使载重轮胎的单层胎体可以将汽车的驱动和制动力传递给路面。同样,由于弯曲刚性与模量直接相关,因此模量在带束层帘线中起着非常重要的作用。

弹性模量与钢丝帘线中丝线的根数以及丝线直径的 4 次幂存在函数关系。若钢丝具有较高的弹性模量并具有相对大的丝线直径,则以合理的帘线层数和相对低的经线密度,便可为带束层提供必要的刚性,带束层具有较高的刚性对于获得较好胎面耐磨性和汽车操纵性能以及较低滚动阻力是十分必要的。

众所周知,轮胎胎冠部和带束层的边部在接地印痕区,特别是在转弯的时候要承受压缩负荷。依据如硫化后的形状、带束层层数和帘布斜裁角度、经线密度和胶料模量等轮胎设计因素,每根帘线要分担部分压缩负荷。

轮胎设计者选择帘线的标准是,其扭转应力值应高于轮胎在行驶过程中可能经受的所有压缩应力。在相同断裂负荷范围条件下,钢丝帘线的压缩模量和扭转应力与织物帘线在不同的数量级,这就是钢丝帘线优于其它增强材料的明显优点(钢丝的压缩模量为 $77\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$;芳纶的压缩模量为 $3\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$;玻璃纤维的压缩模量为 $4\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$)。

由于胎面的磨损大多在转弯时发生,其间带束层部分承受压缩力,因此带束层增强帘线的压缩模量也是非常重要的性能。带束层增强帘线的压缩模量高,则可降低胎面花纹块的移

动(蠕动)以及由此导致的严重磨损。增大钢丝单丝直径和帘线捻长,且采用螺旋外缠可以进一步提高压缩模量。

对于胎体帘线的重要要求是耐屈挠和特别耐磨损,因此最好采用非缠绕结构的钢丝帘线。非缠绕结构钢丝帘线还具有布层厚度较小的特殊优点。在胎体中也应避免压缩和纵向弯曲,因此采用非缠绕结构钢丝帘线则要求轮胎设计作适当修改。

2 BETRU 帘线

目前,对提高轿车和载重车轮胎的质量和使用寿命以便提高道路行驶安全性以及轮胎翻新率有非常迫切的要求。如在胎体中转向使用钢丝帘线,则较高的粘合强度保持率和较好的耐腐蚀性可延长轮胎的使用寿命。

满足上述要求的第一个里程碑是采用了开放结构钢丝帘线,采用这种帘线可以使橡胶渗入帘线,从而避免或限制可能进入帘线的水分的浸蚀。

在丝线合股过程中,对于单层帘线通过适当的预成型或对于多层帘线通过将丝线留在一层外,从而制得开放结构帘线。如 $3+8+13$ 和 $3+9+15$ 。

从图 5 的 4×1 结构钢丝帘线的横断面图可以看出,常规结构钢丝帘线中心的“通路”是如何成为沿帘线的水分通路的。而在开放结构钢丝帘线中,橡胶充满丝线的四周。

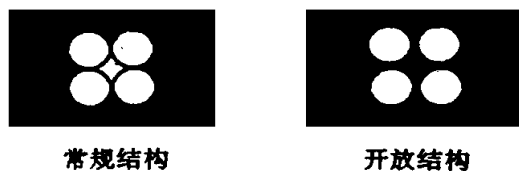


图 5 开放与常规结构帘线结构比较

如果开放结构帘线在一定拉伸负荷的作用下闭合和伸长(这有可能在压延辊筒架导出张力失控时发生),则无法再保证橡胶的渗透,从而失去了开放结构钢丝帘线的特有优点。开放结构钢丝帘线的其它缺点还有帘线直径大、很不规则及结构性伸长率较大(PL E, 定负荷伸长率,在 $2.5 \sim 50$ N 轴向力下测得),这会妨碍轮胎的驾驶响应。

因此,一种新的开放结构 BETRU 帘线已

开发出来,它直径较小、PL E 较低,而且在硫化时较高的预牵伸力作用下,橡胶可完全渗透。BETRU 技术的基础即是在钢丝合股时帘线中的一根和多根丝线预成型为多边形。

在横断面投影图中,典型帘线的钢丝丝线是圆形的,而多边预成型的帘线根据所采用的预成型方式不同,其断面形状可能不同,见图 6 和 7。

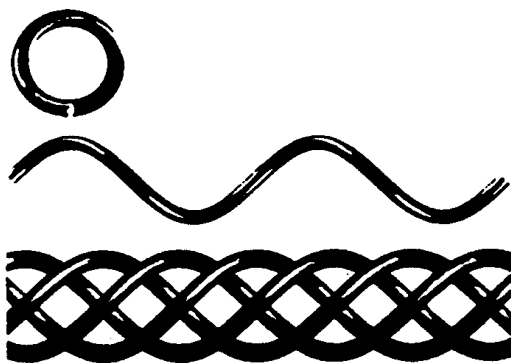


图 6 圆形开放结构钢丝帘线

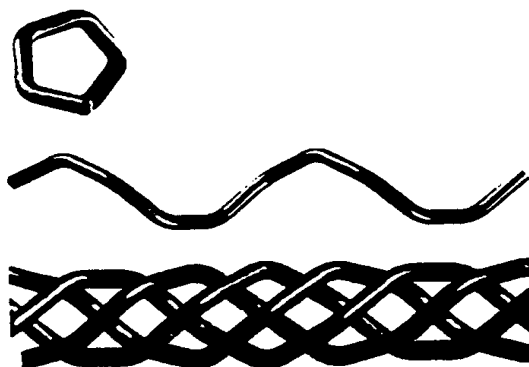


图 7 BETRU 多边形钢丝帘线

在帘线最后进行合股时,变形成多边形的丝线间会形成微孔孔隙,需要较大的外力才能闭合。优化预成型与钢丝强度和直径以及与橡胶粘度的关系,可以为轮胎生产商生产出具有最大橡胶渗透能力的定制帘线。

橡胶渗透能力通过测定压力降来确定,测试试样在一定压力和 30 N 的拉伸作用力下进行硫化,并裁切成捻长的 $9/10$,将压力为 0.1 MPa 的气流通入 60 s。橡胶完全渗透的帘线没有压力降。

典型的带束层结构中,常规密实结构帘线、开放结构帘线和 BETRU 帘线的实验结果与其它性能见表 5。

表 5 不同带束层帘线性能比较

项 目	3 ×0.30/16 HT		
	常规结构	开放结构	BETRU
橡胶渗透压力降/ %	100	22	0
帘线最大光学直径/ mm	0.75	1.09	0.91
线密度/ (g ·m ⁻¹)	1.68	1.68	1.68
帘线断裂负荷/ N	660	660	660
定负荷伸长率/ %	0.150	0.310	0.185
摆动疲劳强度/ (N ·mm ⁻²)			
埋置,空循环	1 000	1 050	1 000
埋置,预处理	< 300	< 400	400
低周期疲劳 [*] / %	11	33	100

注: *表示预处理相当于空循环的百分比。

帘线的直径、定负荷伸长率和橡胶渗透力的差异是显而易见的。对预加工技术有效的研究与开发以及全面提高钢丝帘线性能的不断努力,不仅使 BETRU 帘线橡胶完全渗透,同时使耐疲劳性能更加优异。

这些测试结果及弯曲和拉伸疲劳的数据使我们可以相信,BETRU 帘线作带束层骨架材料很有潜力。

已经得到验证的优点:

(1)橡胶可以完全渗透,即使在高拉伸负荷条件下硫化;

(2)帘线的直径较小,帘布层厚度较小,有可能减小橡胶的质量;

(3)与开放结构钢丝帘线相比,外观更规则;

(4)提高了粘合强度保持率。

可以预测的优点:

(1)与开放结构帘线相比,加工的轮胎更耐用;

(2)由于减少了钢丝丝线之间的接触点,因此改善了耐磨性能;

(3)与开放结构帘线相比,耐腐蚀和耐腐蚀疲劳性能优异。

3 结论

我们可以预测各种应用领域钢丝帘线结构的发展趋势。

3.1 轿车轮胎增强钢丝帘线发展趋势

轿车轮胎帘线的发展见表 6。

表 6 轿车轮胎钢丝帘线的发展

演变	轿车轮胎帘线的发展					
帘线演变	2 + 7 (+ 1)	5 ×1	5 ×1-OC	2 + 2	2 + 2 HT	3 ×1 ST
		4 ×1	4 ×1-OC	3 ×1-OC	3 ×1 HT	BETRU
丝线演变	0.22				BETRU	
		0.22	0.25	0.25	0.25 HT	0.25 ST
		0.25	0.28	0.30	0.28 HT	0.28 ST
					0.30 HT	

轿车轮胎钢丝帘线的发展趋势:

- (1) 钢丝单丝更粗且根数更少;
- (2) 钢丝帘线直径更小,以减少覆胶量;
- (3) 橡胶完全渗透,与导出拉伸无关;
- (4) 帘线刚度提高;
- (5) 低定负荷伸长率,使驾驶响应最佳化;
- (6) 具有较好的粘合性能。

3.2 载重轮胎增强钢丝帘线发展趋势

3.2.1 胎体增强钢丝帘线

(1)具有较好的耐磨损疲劳性:层状结构、密实结构帘线、非缠绕密实结构帘线;

(2)改善耐腐蚀疲劳性:表面条件、基本材料及胶料配方;

(3)较好的耐冲击性:以线接触替代点接触;

(4)极好的粘合强度保持性能。

3.2.2 带束层增强钢丝帘线

带束层增强钢丝帘线的发展趋势:

- (1)钢丝丝线较粗且根数较少;
- (2)帘线直径较小,以控制覆胶量;
- (3)胶料完全渗透;
- (4)较高的耐冲击性;
- (5)最佳的粘合性能。

3.2.3 目前和未来载重轮胎钢丝帘线结构

目前和未来载重轮胎钢丝帘线结构发展趋势见表 7。

贝卡尔特公司将继续努力满足不断变化的要求,并与其客户一同评价生产优质轮胎所需的新型钢丝帘线,使优质轮胎在公路运输系统中更进一步发展,并使其更有效、安全性更佳和

表 7 载重轮胎帘线结构发展

项 目	帘线规格			
轻型载重轮胎				
胎体	3 + 9 ×0. 175 + 0. 15	→	3 ×0. 20 + 9 ×0. 175 cc	→
	2 + 7 ×0. 22 (0. 15)	→	2 + 7 ×0. 20 HT	→ 0. 22 + 6 ×0. 20 HT BETRU
带束层	3 ×0. 15 + 6 ×0. 27	→	0. 30 + 6 ×0. 27 BETRU	→ 2 + 2 ×0. 30 HT
	4 ×0. 38 OC	→	2 + 2 ×0. 35	→ 2 + 2 ×0. 32 HT
		→	2 + 2 ×0. 38	→ 4 ×0. 30 SHT BETRU
				→ 4 ×0. 32 SHT BETRU
中型载重轮胎				
胎体	3 + 9 ×0. 22 + 0. 15	→	3 ×0. 22 + 9 ×0. 20 cc HT(+ 0. 15)	
		→	0. 20 + 18 ×0. 175 cc	
带束层	3 ×0. 15 + 6 ×0. 27	→	0. 30 + 6 ×0. 27 BETRU	→ 0. 28 + 6 ×0. 25 HT BETRU
	3 ×0. 20 + 6 ×0. 35	→	0. 38 + 6 ×0. 35 BETRU	→ 0. 35 + 6 ×0. 32 HT BETRU

降低环境污染。

轮胎生产商的合作是实现这些改进的最好保证。

我们已经展示了复杂的子午线轮胎复合部

件的某些方面将会改进 ,不断地、更加紧密地与

译自“ ITEC ’96 论文选 ”,P183~188

子午线轮胎占日本汽车轮胎产量比例的变化

项 目	1990 年	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年
载重和公共汽车轮胎					
产量/万条	1 144. 8	1 109. 2	1 111. 8	1 106. 7	1 152. 8
子午化率/ %	70. 6	84. 5	83. 9	86. 3	92. 6
轻型载重汽车轮胎					
产量/万条	38 208	33 438	33 627	34 137	30 632
子午化率/ %	56. 3	76. 3	79. 2	81. 9	87. 3
轿车轮胎					
产量/万条	100 423	105 071	110 482	115 162	114 607
子午化率/ %	90. 7	93. 7	93. 9	94. 6	95. 3
合计子午化率/ %	80. 4	89. 1	90. 0	91. 3	93. 5

(相 泰摘自“ Tire Industry of Japan ”,1999 ,P12)

日本汽车轮胎主要原材料消耗量 t

项 目	1990 年	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年
轮胎帘线					
钢丝	179 744	197 998	199 102	201 747	210 296
尼龙	56 314	36 147	35 191	34 893	27 842
聚酯	37 095	37 049	38 875	39 275	40 081
人造丝	1 148	973	918	1 119	1 098
其它	951	1 544	1 062	563	528
合计	275 252	273 711	275 148	277 597	279 845
生胶					
NR	540 966	574 526	590 945	588 111	593 418
SR	486 659	448 594	468 019	494 041	488 006
合计	1 027 625	102 312	1 058 964	1 082 152	1 081 424
炭黑	540 170	540 287	560 318	575 904	566 309

(相 泰摘自“ Tire Industry of Japan ”,1999 ,P23)