

钢丝帘线的技术现状及 轮胎工业的要求

M. Basaran 著 王晓冬译 涂学忠校

1 引言

自从50年代发明并推出子午线轮胎以来,轮胎工业一直未出现其它重大变革。虽然优化设计进展缓慢,但自那以来,轮胎产品发生了很大变化。正是在这一时期,诞生了钢丝帘线,而且人们不久就掌握了其规律性,自此钢丝帘线开始对生产当今优质轮胎起重要作用。

用。在这些年里,轮胎工业对钢丝帘线工业的要求越来越多,更重要的是这些要求已变成保证轮胎质量和效益手段的一个组成部分。

图1示出了轮胎工业和钢丝帘线工业的相互关系。本文仅讨论与轮胎性能要求有关的钢丝帘线特性。

2 轮胎使用性能

2.1 拉伸强度和强力

在现有的轮胎增强材料中,钢丝是拉伸强度最大的材料之一。但是,由于钢丝的密度较大,所以其单位重量的拉伸强度比大多数织物增强材料低。而钢丝的强度/体积比较大,多少弥补了这一缺点。换句话说,能够用较少的钢丝帘线增强帘布层达到同样的增强效果,从而减少隔离胶用量,提高压延和成型效率。

同样值得注意的是,Bekaert公司不断努力改进所用钢丝帘线生产技术,以便能够生产出接近材料极限的高拉伸强度的钢丝帘线(见图2)。采用这种钢丝帘线可以使轮胎中

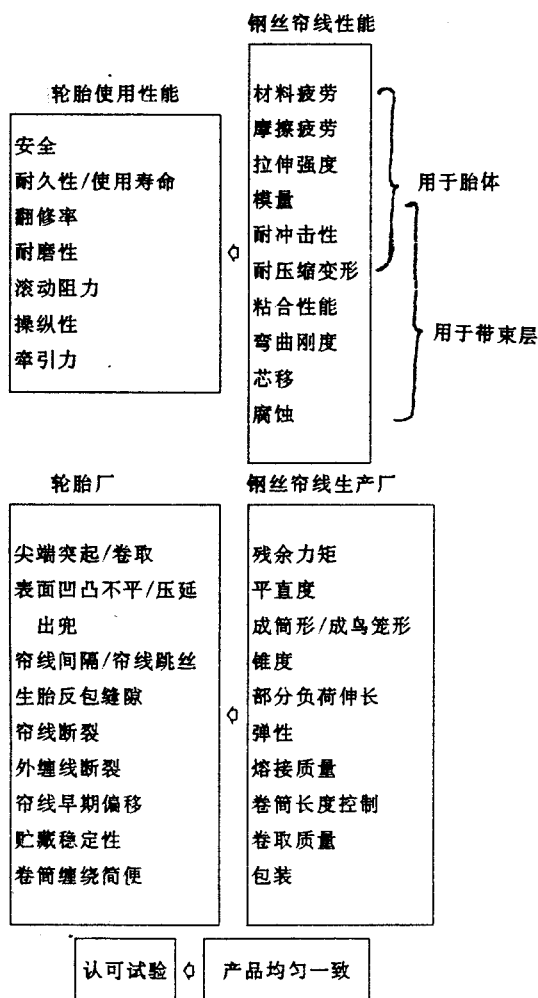


图1 轮胎工业与钢丝帘线工业的相互关系

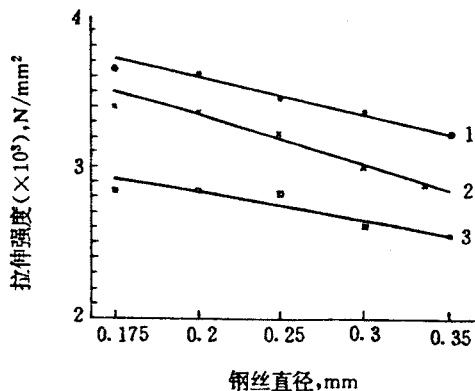


图2 不同钢丝帘线单丝直径与拉伸强度的关系

1—已进入中试阶段;2—HT;3—NT

的钢丝帘线用量减少 20%，并可大大降低轮胎的行驶温度和滚动阻力。

2.2 模量和弯曲刚度

当钢丝受拉伸力作用时,其应力-应变曲线分弹性和塑性两部分,弹性部分的斜率称为弹性模量,钢的弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

在不同结构钢丝帘线的应力-应变曲线中,由于帘线各自结构伸张潜力不同,曲线弹性部分的斜率不同。尽管弹性模量是钢丝材料的内在特性,但不同结构钢丝帘线的弹性模量也各不相同(见图 3)。

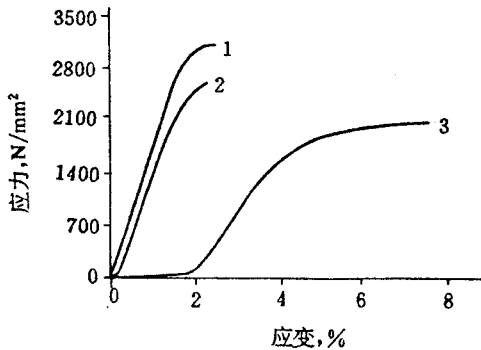


图3 钢丝和钢丝帘线的应力-应变曲线

1—钢丝直径为 0.20mm; 2— $3+9 \times 0.22+1$;
3— $3 \times 7 \times 0.22\text{HE}$

正是钢丝帘线的高模量使载重轮胎的单层胎体能将汽车的驱动力和制动力传递给路面,由于钢丝帘线的弯曲刚度与模量直接有关,所以带束层中钢丝帘线的模量同样也起非常重要的作用。钢丝帘线的弯曲刚度与弹性模量(E)及构成帘线的钢丝根数(n)和单丝直径的 4 次幂(D^4)有函数关系。若钢丝帘线的弹性模量较高并且单丝直径相对较大,则采用适当的带束层层数和比较低的经线密度,即可提供所需的带束层部位的刚度。带束层部位的高刚度是轮胎获得较好的胎面耐磨性和操纵性、较低的滚动阻力的必要条件^[1~3]。

轮胎设计者为提高带束层刚度,可能会牺牲某些强度特性(根据断裂负荷计算),并通过选择单位重量刚度较高的带束层钢丝帘线来减轻轮胎重量,如表 1 所示。

表 1 强度(或刚度)相同的不同带束层帘线

	两层带束层		相同强度	相同强度	相同刚度
	帘线	帘线	帘线	帘线	帘线
	$3 \times 0.20 + 6 \times 0.35$	$3 \times 0.20 + 6 \times 0.35$	$0.38 + 6 \times 0.35$	$0.38 + 6 \times 0.35$	$0.38 + 6 \times 0.35$
	NT	HT	HT	HT	HT
断裂负荷, N	1600	1800	1800	1800	1800
经线密度 根·英寸 ⁻¹	53	47	47	47	43
带束层强度 N·dm ⁻¹	85000	84600	84600	84600	77400
带束层强度指数	100	100	100	100	91
线密度, g·m ⁻¹	5.32	5.32	5.56	5.56	5.56
帘线刚度, N·mm	931	931	1135	1135	1135
带束层刚度 N·mm·dm ⁻¹	49343	43757	53345	53345	49343
刚度指数	100	89	108	108	100
两层帘布总重量, g	3094	2744	2868	2868	2624
帘布重量指数	100	89	93	93	85

注: 轮胎规格: 11R22.5; 帘布层宽度: 18cm; 帘布层长度: 305cm。

举例来说,对于中型载重轮胎带束层,在相同刚度条件下以 $0.38+6 \times 0.35 \text{ HT}$ 替换 $3 \times 0.20+6 \times 0.35 \text{ HT}$,帘线重量减轻 15%,强度下降 9%。目前设计的各种轮胎已能经受相当于 15%断裂负荷充气压力下的伸张力。进行上述替换之后,轮胎能经受相当于 17%断裂负荷充气压力下的伸张力。

2.3 耐压缩变形

众所周知,在轮胎接地区域,特别是当轮胎转弯时,胎体冠部和带束层边部将承受压缩负荷^[4]。根据轮胎模压硫化后的形状、带束层层数及排列角度、经线密度和胶料定伸应力等设计参数的不同,每根帘线承担的压缩负荷量不同。

Bekaert 公司对压缩负荷下的钢丝增强橡胶进行实验室试验得出压缩力与变形曲线(见图 4),从该图中可以确定弯曲应力(δ_k)、非稳态变形(W_k)和压缩模量(E_k ,弯曲前曲线的斜率)。

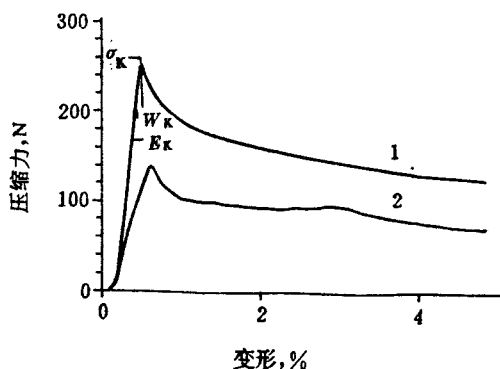


图4 压缩试验

$$1-3 \times 0.20 + 6 \times 0.35; 2-3 + 9 \times 0.22 + 1$$

轮胎设计人员应选择具有一定的弯曲应力的帘线,该应力值应高于轮胎在行驶过程中可能经受的压缩应力^[5]。

当钢丝帘线和织物帘线的断裂强度相同时,二者的压缩模量和弯曲应力值具有不同的数量级,钢丝帘线明显优于其它增强材料。

带束层帘线的压缩模量也被认为是非常重要的性能指标,因为胎面磨损大多发生在轮胎转弯过程中(此时带束层部分承受压缩应力),具有高模量的带束层有助于减少花纹块移动,从而减轻磨损程度。加大单丝直径,加大捻距和采用螺旋外缠钢丝可以提高钢丝帘线的压缩模量。

2.4 芯移

另一个重要现象是芯移,即钢丝帘线芯丝向外移。这样会减弱实际增强效果,有时还会刺穿邻近的橡胶层。在波动应力作用下,并且当芯线未充分固定到帘线外层的时候,在带束层裁断边处易发生这种现象。例如密实型帘线中具有少量芯线固定到其它钢丝层,因此在用于带束层时就有发生芯移的可能。但是,所有能改善橡胶渗透的因素以及采用螺旋外缠钢丝则可以消除发生这种芯移的可能性。

2.5 耐冲击性能

就实际情况而言,轮胎设计者们对“冲

击”问题几乎没有一致的意见。实验室冲击试验(改进的卡毕冲击试验)可以测试因冲击使帘线扯断所需的负荷和至损坏时所吸收的能量,该能量是扯断伸长率的函数。耐冲击试验时,选用有特定经线密度的硫化带束层作试验样品。对于胎体增强材料,大多数人似乎更重视冲击断裂负荷,而吸收的能量则是带束层顶层增强帘线的重要指标。无论哪种情况,结构获得良好平衡的帘线都具有较高的冲击负荷和能量吸收值。

2.6 材料的干湿疲劳性能

材料的疲劳是指在周期应力作用下龟裂开始和/或增长的过程,它是胎体增强材料非常重要的性能(见图5)。

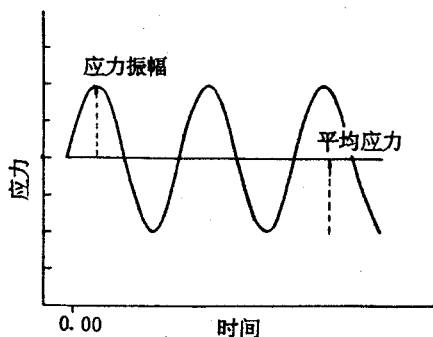


图5 疲劳性能

一次参数,应力振幅;二次参数,平均应力

用疲劳极限来比较耐疲劳性能是非常有效的,它是在疲劳试验之前或试验过程中出现的龟裂到最终破坏前的最大应力幅度。

一些常用的实验室龟裂试验如下^[6~8]:

- (1)剥离/剥离试验(平均应力为正值)
- (2)旋转横梁试验(平均应力等于0)
- (3)3辊筒试验(平均应力为正值)

影响疲劳性能的参数归纳如下:

a. 钢丝和帘线参数

- 力学性能:拉伸强度、韧性等
- 表面特性:粗糙度、杂质、残余应力等
- 单丝直径
- 捻距、捻向
- 应力均匀分布的帘线结构

b. 施加的应力和周围环境参数

—轴向应力(缘于轮胎内压)

—弯曲应力(取决于轮胎形状、内压及负荷)

—空气湿度和温度

2.6.1 钢丝及帘线参数

珠光、冷拉钢丝的拉伸强度与干疲劳极限值之比因钢丝盘条质量、钢丝韧化处理及钢丝拉拔工艺不同而异,处于 0.30~0.40 之间。尽管如此,最低耐疲劳性也得到了保证,因为有严重表面缺陷和含有杂质的钢丝往往无法承受从 5.5 mm 粗拉拔至 0.15~0.35 mm 的工序及随后帘线加工中的苛刻条件。换句话说,所有保证提高钢丝帘线产量和生产效率的措施也能使产品不出现内在和外观缺陷。

另外,钢丝表面的残余应力对疲劳性能也有较大的影响。

钢丝在拉拔加工中,其表面通常会产生拉伸残余应力,然而经一种特殊处理方法(BECRIS®)可使此应力转变成无极即压缩应力(见图 6)。

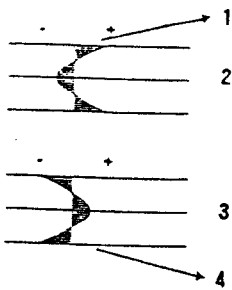


图 6 表面残余应力

1—表面残余拉伸应力;2—普通拉拔钢丝;3—经处理钢丝;
4—表面残余压缩应力

实验室试验结果表明,钢丝中若有拉伸残余应力,则其湿疲劳极限值下降(见图 7)。

在周期弯曲条件下,钢丝直径以及一定范围内的帘线捻距都与疲劳性能有倒数关系。要获得最佳的耐疲劳性能还须优化帘布

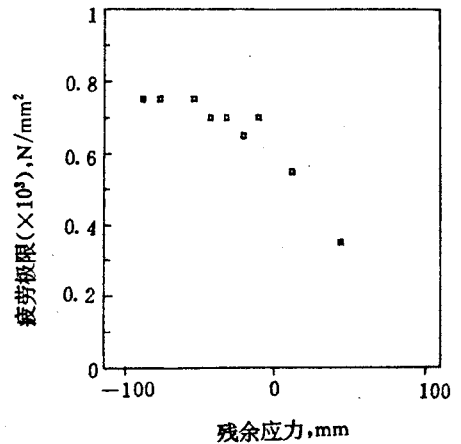


图 7 腐蚀疲劳与表面残余应力的关系

层数和帘线捻向并对钢丝精心预加工,使其应力分布均匀。

2.6.2 施加的应力及环境参数

作者认为,耐疲劳性与所施加的应力成反比。这就是在严重气压不足和超载使用条件下,载重轮胎胎体帘线会疲劳损坏的原因,此时产生的应力大大增高,甚至超过了帘线的疲劳极限,从而出现了疲劳损坏。但如果有水分存在,疲劳极限值将大幅度下降^[10],此时轮胎即使在一般工作应力条件下也会出现胎体疲劳损坏(见图 8,9)。所以采用良好的气密层保护胎体帘线是很有必要的。

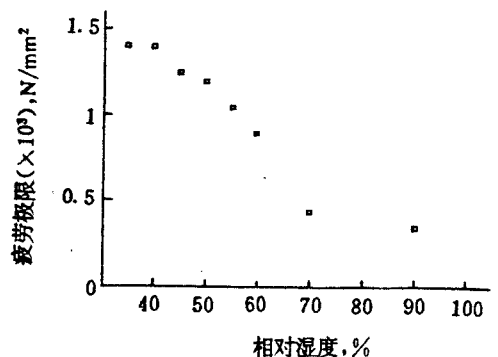


图 8 湿度对钢丝帘线疲劳极限值的影响

(测试样品为 0.15 mm HT 钢丝)

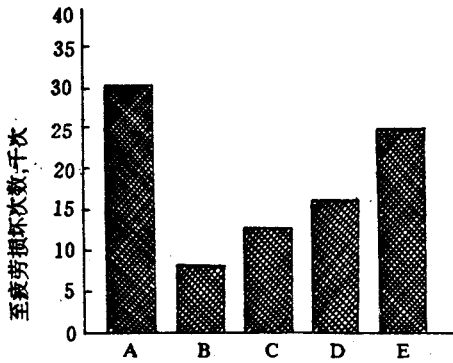


图 9 胶料中水分与疲劳性能的关系

3 辊筒试验条件不同: $12 \times 0.2 + 1\text{cc}$; A—空白, 含水分 0.38%; B—在密炼机中加入 0.5% 的水, 含水分 0.86%; C—B+24h, 室温, 相对湿度为 50%, 含水分 0.61%; D—A+24h, 40℃, 相对湿度为 95%, 含水分 0.60%; E—D+24h, 室温, 相对湿度为 50%

2.7 磨蚀疲劳

钢丝帘线中各单丝在承载和/或弯曲时的相对运动引起的摩擦, 会导致各单丝在接触点产生磨蚀疲劳。钢丝在开始阶段形成的磨蚀产物(硬金属氧化物)会增加磨蚀的严重程度, 因而是一个自促进过程。

这种磨蚀疲劳主要取决于钢丝帘线结构。

(1) 在多股或多层结构的钢丝帘线中, 不同层中的单丝彼此有接触点, 而接触力往往集中在这一小区域内, 使单丝间相互切入。而在密集结构型钢丝帘线中, 由于其所有单丝彼此都是平行排列, 以线接触, 因而不存在切割作用。

(2) 具有便于胶料充分渗透结构的帘线, 由于其金属间的接触减少, 也具有较好的耐磨蚀疲劳性。密集结构钢丝帘线虽然耐磨蚀疲劳性能优异, 但胶料渗透不充分。提供一种可使胶料充分渗透的密集结构钢丝帘线是对钢丝帘线生产厂的新挑战。

这 10 年的奋斗目标是使载重轮胎两次或多次翻新后行驶里程达到 100 万公里, 而密集结构型钢丝帘线的出现是朝此目标迈出的重要一步。实际上, 对无接头带进行实验室测试得出了屈挠 4×10^7 次(约相当于轮胎使

用寿命 12 万公里)后断裂负荷损失值(见表 2), 车队实验也证实了上述结果(见图 10)。

表 2 无接头带的断裂负荷损失 %

帘线类型	芯线	内层	外层	总计
$3+9+15 \times 0.175+0.15$	1.95	2.14	7.80	5.30
$12 \times 0.22\text{cc}$	—	—	—	0.50

带轮直径: 143mm; 预应力: $400\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$; 屈挠次数: 4×10^7

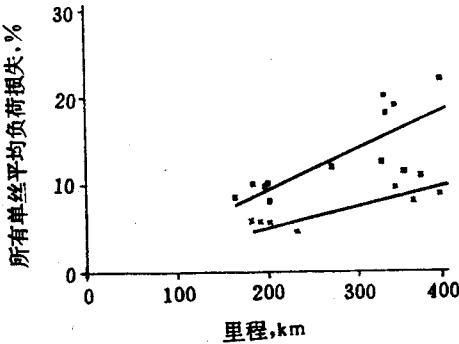


图 10 315/80R22.5 载重轮胎车队试验胎体帘线单丝负荷损失

□— $3+9+15 \times 0.175+1$; x— $12 \times 0.22\text{cc}$

密集结构型钢丝帘线的强度保持率较高, 给轮胎设计师提供了新的机会。在胎体强度计算中, 安全倍数通常要涉及轮胎总使用寿命和帘线强度保持率。

因此, 将层状结构帘线改为密集结构帘线(即将 $3+9+15 \times 0.175+1$ 改变为 $19 \times 0.175\text{cc}$ 小心地减小安全倍数将是非常合理的。例如, 在一实例中^[11], 对名牌轮胎中的帘线进行这种替换, 胎体帘线重量减轻 10%。

2.8 粘合

帘线粘合层的粘合质量受胶料、帘线性能和硫化方法的影响(见图 11)。

在钢丝帘线表面特性中, 黄铜组分似乎是各轮胎生产厂都关心的。尽管粘合性能改进的程度主要取决于胶料, 但多数轮胎生产者发现低含铜量(63.5%)黄铜具有较好的粘合性能。

其它还应提到的表面处理方法有: 镀铜钢丝的磷化、三元合金镀层(Ni 和 Co)、钴盐等离子体涂层(最上层)。钢丝磷化工艺是

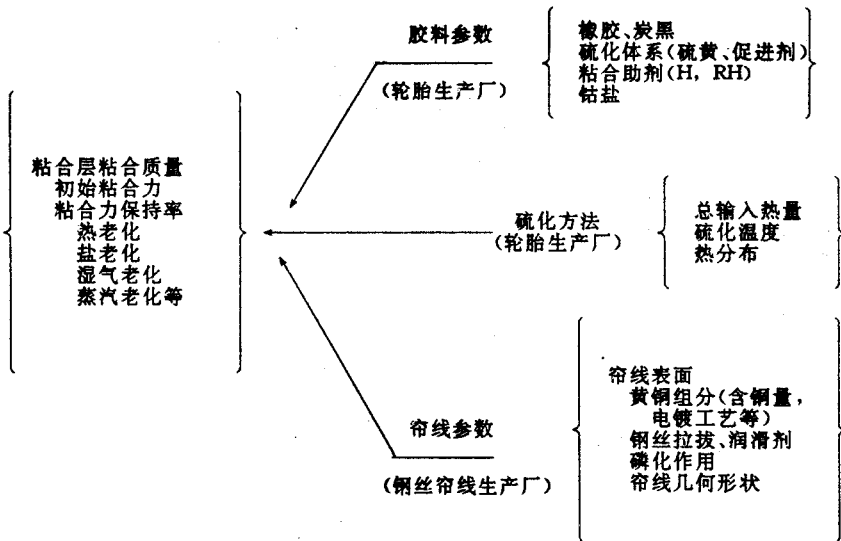


图 11 粘合剂及其影响因素

Bekaert 公司的专利技术,该工艺对某些轮胎胶料的热老化(过硫)和蒸汽老化后粘合性很有益处(见图 12),而钢丝表面磷酸盐含量过

高会对某些其它胶料的初始粘合剂有不利影响(见图 13)。

采用三元合金镀层和钴盐等离子镀层的目的在于增加配方设计人员更大的自由度。在所需的位置,即在界面层引入钴元素,会使含有极少钴或不含钴的胶料具有较好的老化后粘合性能。目前,这两种帘线的样品正由一些客户进行评估,结果认为大有前途,但这两种帘线尚未上市。

另外,轮胎帘线的几何形状对粘合耐久性影响同样重要。因为胶料渗透性较好的帘线在蒸汽及盐浴老化后,具有较高的粘合强度保持率。

2.9 腐蚀

如果轮胎中的钢丝帘线与水接触,则不可避免地会被腐蚀。有时,水分会通过胎面割口渗入到带束层帘线中,这样产生腐蚀的程度和速度取决于帘线的几何形状和胶料的电阻率。在能使胶料充分渗透的帘线结构中,不会出现任何使水分扩散的毛细通道。使用这种结构的帘线是防止帘线腐蚀的最有效的方法。

Bekaert 公司实验室研究认为,胶料电阻率也是影响腐蚀速度的重要参数。实际上,这是原电池作用产生的钢丝腐蚀。人们通过钢丝切头腐蚀试验来研究胶料对腐蚀的影响以

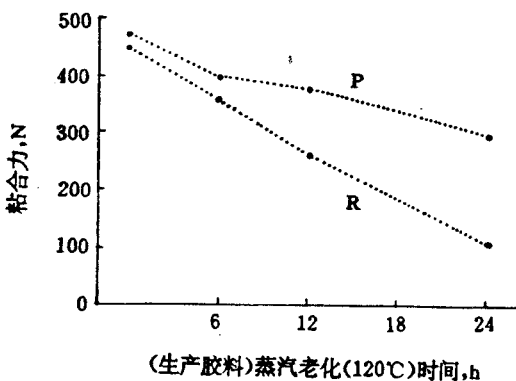
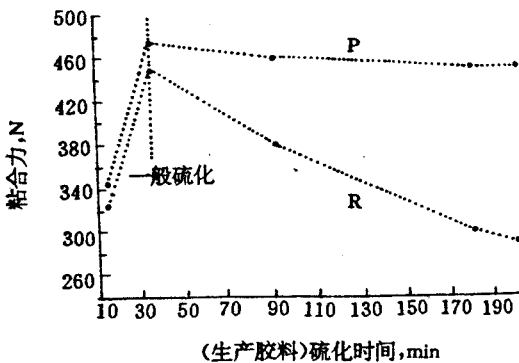


图 12 钢丝表面磷化对老化后粘合性能的影响

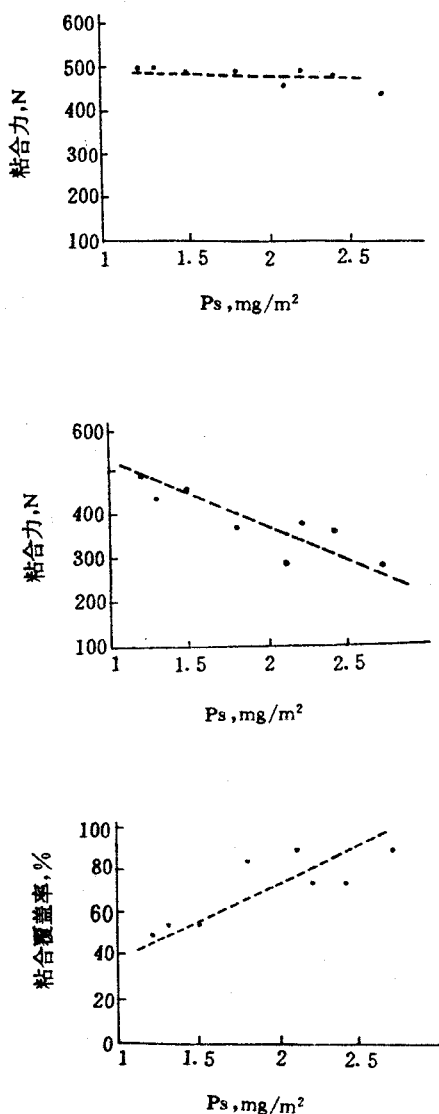


图13 磷化作用对初始粘合性的影响

$P_s = 2 + 2 \times 0.25$ 不同的表面磷酸盐含量; a—胶料(1), 无影响; b—胶料(2), 不利影响; c—胶料(3), 有利影响

及某些胶料对钢丝产生的严重腐蚀程度, 见图14(略)和15。

影响胶料电阻率的因素都与炭黑有关: ①炭黑品种, ②炭黑用量, ③炭黑分散性。Bekaert 公司测定的结果表明了上述参数对胶料电阻率有很大影响(见图16)。

3 结论

钢丝帘线与其它所有增强材料一样不会

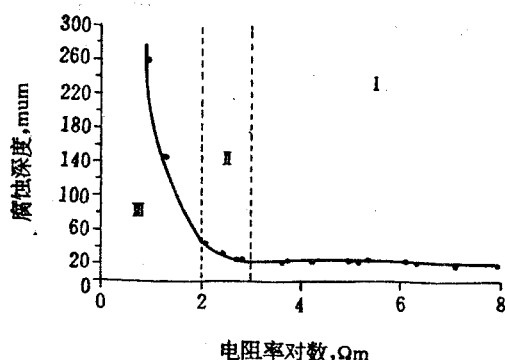


图15 腐蚀深度与胶料电阻率的关系

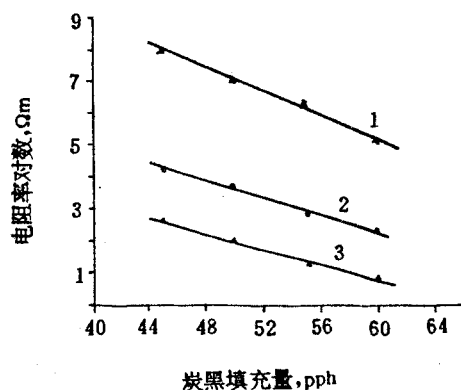


图16 3种不同牌号炭黑的填充量与胶料电阻率的关系

1—炭黑1, $P = 0.182$; 2—炭黑2, $P = 0.127$
3—炭黑3, $P = 0.120$

有哪一种在所有的用途中都是最好的。但可以根据指定用途选择或研制适用的钢丝帘线, 并协调好它与覆胶层胶料的某些特性。正是这种特定用途和对胶料的依赖关系越来越需要轮胎生产厂和钢丝生产厂之间进行单独的合作。这种单独合作关系的结果是: 可根据不同轮胎生产厂的需求定制钢丝帘线, 但更重要的是, 加深了对疲劳、粘合及腐蚀等基本概念的了解, 并改进了钢丝帘线生产的基本生产技术。

参考文献(略)

译自德国《Kautschuk Gummi Kunststoffe》, 46[7], 550(1993)