

轮胎工业用钢丝帘线现状与发展（一）

于清溪

摘要: 介绍了轮胎用钢丝帘线的性能要求; 轮胎生产中不同部件所选用钢丝帘线的结构; 目前钢丝帘线的种类和规格; 钢丝帘线的特点; 生产企业的情况及今后的发展方向。

关键词: 轮胎工业; 钢丝帘线; 钢丝子午线轮胎; 发展趋势

钢丝帘线是由多根细钢丝合股组成的钢线绳, 自从 1948年引入轮胎工业之后, 作为子午线轮胎的带束层和载重、工程子午线轮胎的胎体增强层, 几十年来生产不断发展, 使用急剧扩大, 现已成为当今轮胎工业最为出色的骨架材料。一条载重子午线轮胎要用 40%的钢丝材料, 一条乘用车子午线轮胎也要用 15%以上的钢丝材料。2006年全球钢丝帘线的产量已达 170万 t, 超过所有有机化纤帘线量的总和, 占居半壁江山的地位。我国生产使用量现已达到 56万 t, 约占世界的 1/3, 成为全球第一生产使用大户。

钢丝帘线具有许多优越的性能, 同有机化纤帘线相比, 破断强度和模量为其数倍以上, 不仅在拉伸轴向, 而且在弯曲、剪切、压缩等状态下也都表现出良好的强度和刚性。并且它还可通过合股的结构种类, 单丝粗度以及捻向角度等方面的变化, 对钢丝帘线的特性加以调整和控制。除重量之外, 钢丝帘线是各种帘线材料中极具特性的骨架增强材料 (见表 1)。

表 1 钢丝帘线与其它化纤帘线性能比较

项目	钢丝	芳纶	玻璃纤维	尼龙丝	涤纶
密度 / (mg·m ⁻³)	7 85	1 44	1 58	1 14	1 38
熔点 /℃	1600	500	1200	255	260
断裂强度 / (cN·d ^{tex})	3 45	20	5 2	8 3	8 4
初始模量 / (cN·tex)	260	350	120	50	100
断裂伸长率 /%	1 9	3 3	13	20	13 5
含湿率 / (200℃×48 h)%	0	4 5	12 5	4 5	0 5
耐热性 /℃	100	90	20	45	55
热空气收缩性 / (160℃×4min)%	0	0 1	0 2	4	5 5

钢丝帘线在轮胎上使用的优点是高强度、高刚性、高耐热性、高尺寸稳定性和低成本; 缺点是重量重、易生锈。因为强度大, 可使轮胎胎体和带

束层数大幅减少; 由于尺寸稳定性 (刚性) 好, 能有效提高轮胎的均一性, 在行驶以后也能抑制其变化。正因如此, 钢丝帘线作为最理想的骨架材料, 在乘用车和载重子午线轮胎方面得到了广泛使用。

1 轮胎对钢丝帘线的要求

近年来, 随着子午线轮胎的发展和低滚动阻力轮胎的扩大, 对其所用帘线的要求也发生了很大变化: 除了直接影响耐久性的三要素, 即高强度 (保持性)、高耐疲劳性和高粘合耐久性等三大基本特性以外, 现在对高刚性也作为一种非常重要的特性指标加以提出, 并且越来越受到重视。

1.1 强力

轮胎的基本功能是将支撑车辆的力 (驱动力和制动力) 传递到路面, 转换或维持方向, 吸收和缓和来自路面的冲击等。而最根本的是用轮胎中钢丝帘线的强度支撑着车辆, 这就是钢丝帘线必不可少的首要特性。因为轮胎实际上就是一个压力容器, 保持其固有形状, 承受车辆的载荷, 行驶时抵抗各种外力的破坏, 都要用其骨架来加以保证, 要求帘线必须具有足够的强力。

1.2 耐疲劳性

车辆在行驶时, 轮胎要持续不断滚动变形, 并将载荷加在轮胎上, 由静负荷变为动负荷, 造成轮胎带束层和胎体部位承受多次反复变形, 因而要求钢丝帘线具有极好的耐疲劳性, 即耐久性。同时, 因为轮胎是在各种气候环境下使用, 因此还要特别考虑在腐蚀条件下的抗腐蚀疲劳性的问题。另外, 为提高耐疲劳性, 在钢丝帘线制造过程中, 一定要千方百计在拉拔加工中消除钢丝的剩余应力。

1.3 粘着耐久性

钢丝帘线在轮胎中作为骨架材料要与相邻的橡胶牢固渗透结合在一起,确保粘着的耐久性才能发挥其各种优越特性。而且还要特别考虑在各种恶劣环境下的耐热粘着性、湿热粘着性等。因此,钢丝帘线使用的钢材种类、表面镀层、合股结构,还有橡胶的类别、配方成分等,都对粘着耐久性有着极为重要的影响。

1.4 刚性

钢丝帘线的刚性对子午线轮胎,特别是行驶速度高的乘用车轮胎来讲极其重要,这也正是其它有机纤维材料无法比拟的。轮胎的带束层部位承受着内压所产生的强力。为发挥其“箍扎”的效果,周向必须要有很大的刚性。另外,在轮胎转向时带束层内部还要产生剪切、弯曲、移动变形,发生很大的转向力。只有转向变形小、刚性大的轮胎才能具有良好的驾驶稳定性,而钢丝帘线正是具有周向刚性和内变形刚性的最佳材料。

当然,除了钢丝帘线本身特性之外,带束层的结构即帘线交叉层数、排列密度和角度、配置宽度和差级以及橡胶的刚性、层内厚度等,也均为提高刚性的重要因素。带束层刚性大的轮胎,不仅能发挥良好的驾驶稳定性,同时又因接地面的局部移动小,还可提高轮胎的耐磨性和降低轮胎的滚动阻力,达到耐久又节能的目的。

1.5 附加性能

轮胎在生产过程中,特别是在压延、裁断、贴合、成型乃至硫化方面,对钢丝帘线还有许多工艺上的要求。如钢丝帘线的抗湿性和氧化变色、生锈速度、打结能力和结扣拉断强力,直线性和柔顺性、弯曲性和弹回性、扭曲强度和次数、应力消除和断头松散度等。还有,钢丝帘线长度的一致性,油污消除程度,生产保存时间和密封性包装等,也是生产使用前必检的项目。

此外,钢丝帘线本身的强度偏差大小、粗度(直径)公差、捻向、捻距、密度、最低缠绕长度以及黄铜镀层的厚度和均一性等,更是钢丝帘线生产厂予以保证的。总之,钢丝帘线的上述性能,对轮胎厂来说是一项也不可缺少的。

2 钢丝帘线在轮胎中的选择使用

为了满足轮胎的要求,钢丝帘线首先必须在

原材料、电镀和拉丝及合股上下功夫,解决制约和支配其特性的各种因素,使之达到高强度化、柔韧化、轻量化并实现经济性的目标。

2.1 钢材

轮胎钢丝帘线用的材料要使用高碳钢,含碳量一般应在 $0.72\% \sim 0.8\%$ 范围内,分为强力钢(NT)、高强度钢(HT)和超强力钢(ST)三种。近年来,为达到强力的目的,对于某些特殊规格要求甚至已开始使用碳量达到 0.9% 的超高碳钢(SST)。这是因为高碳钢烧结产生的硬度大,容易得到高拉伸强度($2000\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 以上)的线材。

高碳钢为一种结晶性组织,是由称之为珠光体组织的铁素体(α 铁)与碳化铁体(Fe_3C)呈重叠状形态的复合材料。碳化铁体非常坚硬,是发挥钢丝帘线强力所寄托的部分;而铁素体比较柔软,是能寄托发挥韧性(粘力性)的部分。钢丝帘线由于在拉拔加工时是径向挤压,组织向引伸的轴向排列,形成密度高的纤维状组织,因而能得到高的强力(轴向单位面积的强力)。因为钢丝帘线要求高的强力和韧性,所以首先必须选择无不纯物的盘条线材(盘元)。

2.2 拉拔与热处理

为保证高的强力和拉拔处理中不断丝,要求使用最佳的热处理条件和最高拉拔加工技术,通常均选用 5.5mm 的盘元钢材,使用冷拔拉伸法,经过多次拉拔才能挤压成细丝。在由粗到细的拉拔过程中,钢丝要硬化难以一直拉拔到底,中间须进行一次热处理加以调节,一般是加热至 $950 \sim 1000^\circ\text{C}$,通过熔铅炉急冷至 $530 \sim 580^\circ\text{C}$ 以改变钢的结构。然后,继续拉拔到 0.8mm 左右的粗度进行电镀,一方面是容易最终拉成 $0.38 \sim 0.15\text{mm}$ 的细度,另一方面又增加了与橡胶的粘接性能。

2.3 电镀

目前,线材粗丝选用的镀层为铜锌合金的黄铜,先镀上一层 $1\mu\text{m}$ 左右的铜,再镀上 $0.5\mu\text{m}$ 左右的锌,然后热扩散使铜锌分布均匀。为使之能均匀扩散,近年来也使用多层热扩散的方法。以前最好的方法是氰化物电镀,粘着性稳定,但因有毒氰化废水排放处理极为困难,污染环境,随之改为非氰化物镀铜。可是非氰化物在电镀过程中常出现复杂的络合物,使粘着性能不稳定,不得已改为热扩散法。

钢丝镀黄铜有一举三得的作用:一是增加了与橡胶的粘结性能,二是可以防止钢丝生锈,三是保证线材加工时的润滑,减少断丝现象。在这里,对钢丝帘线的使用来说,作为骨架材料与相邻橡胶材料的粘结是最大的前提,也是之所以要镀黄铜的根本原因。铜锌组成比例对粘结性能的影响非常大,最好的比例为 $\text{Cu}60\% \sim 70\%$, $\text{Zn}30\% \sim 40\%$,近年来,为抑制其反应性过高而给粘结带来不利的影响,主要是由于吸收水分产生的负面作用,一般均采用薄镀层和低铜 ($60\% \sim 65\%$) 的作法。

钢丝帘线与橡胶的粘结机理,一般认为是黄铜镀层中的 Cu 与橡胶材料中的 S 相互结合,在介面形成 CuS 即在硫化时,橡胶中的 S 不仅起交联反应,同时也起粘结反应,并设法使两种反应达到平衡的状态。如果 Cu 的成分高时,黄铜镀层与 S 的反应也随之相应提高。同样,其成分过高时则反应性也过高,形成过度粘结层,结果对粘结的耐久性和加工性都不利。

Zn 的作用是通过在钢丝帘线表面形成的 ZnS 和 ZnO 调节粘结的反应性。然而, Zn 容易氧化,且与水的反应性也高,因而在轮胎行驶中可与空气、橡胶中的水分进行反应,过度生成氧化物、氢氧化物,从而成为引起粘结恶化的主要原因。所以,对 Zn 在界面上反应的控制技术极为重要。同时,为了从橡胶材料方面提高粘结性,还必须要 在配方中增加必要的 S 量,增量至少在 0.5 ~ 1.0 份以上。

粘结反应助剂对提高橡胶与钢丝帘线的粘结力也有帮助,一般可添加 0.5 ~ 1.0 份左右的有机钴盐。例如油酸钴、硬脂酸钴、环烷酸钴、树脂酸钴、癸酸钴、噻唑类和二硫代氨基甲酸盐类促进剂钴盐等。他们都能促进 CuS 层的形成。但是由于在水分存在时也有促进生成 Cu_2S ZnS ZnO 而不利于粘结的现象,现在大多使用对水稳定性好的羧基硼酰化钴。RHS 间甲白体系对增强粘结有协同效果,但有腐蚀性,用时要多加以注意。

2.4 合股结构

钢丝帘线的粗度一般为 0.52 ~ 1.62mm,是仿照有机纤维帘线的结构由 3 ~ 39 根的 0.15 ~ 0.38mm 细钢丝合股而成的,合股的结构分为:

1. 一次合股而成的单捻帘线,一般以 $1 \times N$

表示。

2 以中心部为芯,周围再顺次捻合 2 ~ 3 层钢丝层的层捻帘线,以 $N+M+I$ 表示。

3 合股的钢丝帘线再进一步多根捻合在一起而成的复捻帘线,以 $N \times M$ 表示。

对于层捻帘线来说,中心部第一层称之为芯层,第二层以下叫覆盖外层。为使捻合紧密,防止松散,通常还在最外层缠绕一根细钢丝,称为带螺旋线的钢丝帘线,以 $N+M+I+1$ 表示。三种钢丝帘线的股捻结构如图 1 所示。

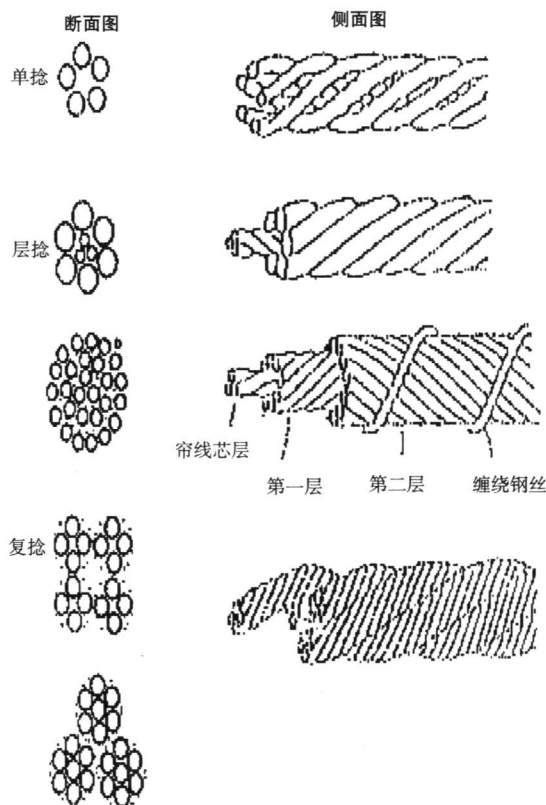


图 1 钢丝帘线股捻结构种类

单捻帘线结构简单,刚性好,最适于用作子午线轮胎的带束层部位,可以获得大的箍扎力和高的驾驶稳定性。而两层和两层以上的层捻帘线主要用于轻卡和载重子午线轮胎,一般按带束层部位为 3 ~ 4 层,胎体部位为一层来配置。两层以上的层捻帘线可以保持高充气压下载荷轮胎的形状,并且在行驶时免受各种外界压力的冲击破坏。复捻帘线的强力最大,结构也最复杂,主要用于大型工程子午线轮胎,帘线粗度从 2.1 ~ 4.4mm,细钢丝根数可达 49 ~ 190 根。

2.5 橡胶渗透性

当轮胎在使用中受到外伤而从胎面贯穿到内层时, 外来的水气往往会传到钢丝帘线的表面, 继而侵入结构内部, 从而导致钢丝帘线发生黑化、锈蚀, 使强力急剧下降。为了防止这种现象的发生, 现在更多地使用橡胶渗透性好的钢丝帘线。这种渗胶型钢丝帘线的结构能使橡胶材料充分地渗透

到钢丝帘线的空隙之间, 把每根钢丝用的橡胶完全包覆起来。这样, 即使轮胎因外伤而使水气侵入到钢丝帘线处, 由于有橡胶的保护也不会出现锈蚀, 无损于轮胎的耐久性。这种钢丝帘线多为开放型, 橡胶可以直接渗透到每一个部位, 多用于带束层, 有 T型、开放型、异径线型、空松型、非紧密型等 (见图 2)。

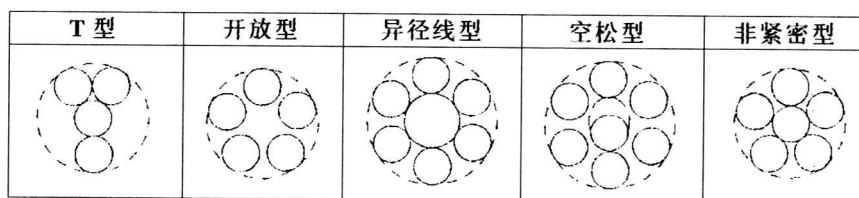


图 2 渗胶型钢丝帘线结构示意图

3 轮胎钢丝帘线的种类规格

轮胎钢丝帘线在钢丝绳行业中属于新兴的金属纤维制造业, 总共不过 50 多年的历史。为了不断满足子午线轮胎的发展要求, 目前的规格品种已达 50 多个, 其产品已经经历了三代。1950 ~ 1970 年的最初一代钢丝帘线, 主要是法国米其林轮胎公司开发使用的 N+M+L+I 的层捻钢丝帘线。规格为 $3+9+9 \times 3 \times 0.15+0.15$ 粗度为 1.15mm (带螺旋线为 1.45), 破坏强力为 1650N 同时并尽可能模仿有机层帘线的粗度和柔软性, 方便轮胎的成型使用。而后, 又相继出现了粗度为 1.6mm 和 2.4mm 钢丝帘线, 单丝直径为 0.175 和 0.25 强力为 3300N 和 5000N 的粗径钢丝帘线, 主要用于重型载重子午线轮胎。

1970 ~ 1990 年, 为提高钢丝帘线的生产效率, 降低生产成本, 出现了单丝较粗, 结构略为简单的第二代产品。欧洲以贝卡尔特为代表的有 $7 \times 4 \times 0.175+0.15$ 粗度 1.49mm, 强力 1690N。日美以东京制钢为代表的有 $3+5 \times 7 \times 0.15+0.15$ 粗度和强力同上述大体相同。而后单丝粗度增至 0.175 ~ 0.22 同时, 胎体与带束层使用不同规格的帘线, 出现了带束层专用的刚度更大、结构更为简单的钢丝帘线。例如载重子午线轮胎专用的 $7 \times 3 \times 0.15, 7 \times 3 \times 0.15+0.15, 3 \times 0.2+6 \times 0.38, 3+9 \times 0.22+0.15$ 乘用车子午线轮胎专用的 $4 \times 0.2+0.15, 2 \times 0.22+0.15$ 。

为使生产成本进一步降低, 生产效率继续提高和功能多样化, 现行的第三代钢丝帘线在单丝

直径、合股结构以及钢材使用上都出现了一些新的变化, 并向第四代发展。首先在钢材选用上, 除常规的标准强力 (NT) 之外, 更多的开始使用高强度 (HT) 和超强力 (ST) 以及超高强力 (SST) 的钢丝线材, 有的称为 SHT 级、UHT 级钢丝帘线。其次是制造工艺简单、成本很低的紧密型钢丝帘线 (CC) 问世, 如 $3 \times 0.22/9 \times 0.2$ CC (粗度 0.88 强力 1270N)、 $0.22+18 \times 0.2$ CC (粗度 1.02, 强力 1945N), 可用在一般的载重子午线轮胎的胎体上面。再有, 带束层除普遍采用渗胶型钢丝帘线之外, 在功能上又分成两种类型, 顶层使用适于易伸张的高伸张钢丝帘线 (HE), 伸长率可由原来的 1.7% 提高到 7.5% 以上。底层用耐冲击钢丝帘线 (HI), 可进一步提高轮胎抗冲撞性能。他们的规格品种有:

$3 \times 4 \times 0.22$ HE—粗度 1.14mm, 强力 1010N (TBR 用)

$3 \times 7 \times 0.2$ HE—粗度 1.37mm, 强力 1400N (TBR 用)

5×0.3 HI—粗度 1.06mm, 强力 945N (LTR 用)

5×0.35 HI—粗度 1.19mm, 强力 1220N (TBR 用)

5×0.38 HI—粗度 1.34mm, 强力 1280N (TBR 用)

3.1 轮胎带束层用钢丝帘线

1. 乘用车子午线轮胎主要用结构简单的单捻钢丝帘线, 粗度为 0.52 ~ 0.65mm, 强力在 420 ~ 890N

之间,几乎全部为 HT级钢丝。高性能乘用车子午线轮胎多用层捻钢丝帘线,粗度为 0.62~0.73mm,强力为 380~630N,主要为 NT级钢丝。

轻卡和 SUV子午线轮胎为层捻钢丝帘线,粗度为 0.78~0.96mm,强力为 860~1240N,多用 HT级钢丝。它们的结构规格和主要性能详见表 2。

表 2 乘用车、轻卡子午线轮胎用钢丝帘线

轮胎结构	断面形状	钢材级别	帘线直径 /mm	强力 /N	单位重量 /(g·m ⁻¹)	捻距及捻向
乘用车子午线轮胎						
2+1×0.25	I形	HT	0.52	420	1.17	11.0(S)
2+1×0.27	I形	HT	0.65	510	1.35	16.0(S)
2+2×0.23	C形	HT	0.60	580	1.30	13.0(S)
2+2×0.25	C形	HT	0.65	570	1.55	14.0(S)
高性能乘用车子午线轮胎						
3×3×0.15	三角	NT	0.62	380	1.26	8.5/8.5(S/2)
3×4×0.15	凸形	NT	0.73	530	1.72	9.5/9.5(S/2)
2×0.18+8×0.16	圆形	HT	0.68	630	1.70	4.0/8.0(S/S)
轻卡和 SUV子午线轮胎						
2+2×0.35	C形	HT	0.81	1060	3.03	(S)
2+3×0.28	I形	HT	0.78	860	2.40	17.0(S)
2+7×0.22	圆形	NT	0.81	830	2.77	6.0/12.0(S/S)
2+7×0.25	圆形	HT	0.96	1240	3.50	7.0/14.0(S/S)
5×0.30	圆形	HT	0.81	1050	2.80	(S)
5×0.35	圆形	HT	0.94	1450	3.83	(S)

2 载重子午线轮胎全为层捻及复捻钢丝帘线,粗度从 1~1.62mm,强力从 1270~2730N,规格有 10 余种之多。单丝直径也较粗,一般从 0.22~0.38mm,帘线刚性大,有的甚至为高伸长型的(见表 3)。

3 载重子午线轮胎有时带束层与胎体用同一种规格钢丝帘线,以便于轮胎厂生产和减少帘线损失。这类钢丝帘线常见的有表 4所列的品种规格。由于强力匹配难以做到完全合理,因而使用不太普遍。

表 3 载重子午线轮胎带束层用钢丝帘线

结 构	断面形状	钢材级别	帘线直径 /mm	强力 /N	单位重量 /(g·m ⁻¹)	捻距及捻向
2×0.2+5×0.39	六角	ST	1.22	1780	4.76	18.0(S)
3×0.2+6×0.35	六角	NT	1.10	1530	5.25	9.5/17.8(S/S)
3×0.2+6×0.35	六角	HT	1.13	1760	5.33	10.0/18.0(S/2)
3×0.32+8×0.345	六角	HT	1.36	2730	7.18	11.0/19.0(S/S)
3×4×0.22	凸形	NT	1.14	1010	3.96	
3×7×0.2	三角	NT	1.38	1270	5.80	
3+9×0.22×0.15	圆形	NT	1.17	1290	3.85	
3+9×0.22×0.15	圆形	HT	1.17	1450	3.85	
3+9+15×0.22×0.15	圆形	NT	1.62	2610	8.50	6.3/12.6/18.0/5.0(S/S/2/S)
5×0.38	圆形	HT	1.03	1160	4.51	

表 4 载重子午线轮胎带束层和胎体共用钢丝帘线

结 构	断面形状	钢材级别	帘线直径 /mm	强力 /N	单位重量 /(g·m ⁻¹)	捻距及捻向
3+9×0.22+0.15	圆形	NT	1.17	1290	3.85	6.12/3.5(S/S/2)
3+9×0.22+0.15	圆形	HT				
3×0.2+6×0.35	六角	NT	1.13	1660	5.34	10/14(S/2)
3×0.2+6×0.35	六角	HT				
4+6×0.35	圆形	HT	1.49	2550	7.59	
4+6×0.38	圆形	HT	1.58	2900	8.95	
3×0.22+9×0.2CC	圆形	NT	0.88	1270	3.33	
1×0.22+18×0.2CC	圆形	NT	1.02	1945	4.84	

(未完待续)