

聚酯帘线增强的轿车胎特性及使用性能

D. S. Liu 等著 黄丽萍译 曾泽新校

对 Allied-Signal 公司生产的4种不同聚酯帘线(1100 dtex)进行了一系列模拟试验,并与有代表性的人造丝帘线进行对比。更具体地说,纱线加捻成工业用帘线,然后在不同的伸张条件下处理,以提供在177℃下具有不同自由收缩率的轮胎帘线。利用新近开发的模拟方法说明轮胎的硫化和行驶对帘线的影响。胎侧凹陷、胀大、均匀性、操纵性和压穿能的模拟结果表明,一些聚酯凭借其高尺寸稳定性可以成为目前轮胎增强材料人造丝的竞争者,是很有发展前途的。

1 引言

目前全球轮胎用帘线的消耗趋势预示未来对聚对苯二甲酸乙二酯(PET)——轿车轮胎应用的工业纱线的需求将大大增加。例如,在截止1995年的这5年时间里,预计全世界PET轮胎纱线的消耗量将以高达30%的速度增长。这种增长原因有两个:一是织物轮胎增强材料总需求增加;二是人造丝价格昂贵,特别是在东西欧,市场的90%为人造丝占领。

有史以来,人造丝在轮胎应用中因其与橡胶粘合良好,提供了良好的使用性能;吸湿量可以减小,尤其在高温下强度和模量可以获得良好平衡。然而,最近对环保和成本关注日益增加,迫使轮胎制造厂家寻找一种可替代人造丝作为轿车胎胎体理想的主要增强材料。幸运的是,广泛的研究和设计计划已提供了具有制造高性能轿车胎胎体所需性能的新一代PET。本文论述有关胎侧凹陷、行驶过程中的胀大、均匀性和操纵性的预测结果。这些预测是以设法重复轮胎帘线从硫化、硫化出模、充气以及最终轮胎使用所经历的所有使用条件的实验室模拟为基础。

2 原材料

本研究采用的是 Allied-Signal 公司生产的4种1100 dtex 聚酯纱线:1W70,是一种普通聚酯纤维;1X90,用于轮胎增强的第一

代尺寸稳定型聚酯纤维;1X30,第二代高强度聚酯纤维材料;以及1X40第二代超高稳定型聚酯纤维材料。所有纤维材料均加捻成315×315捻/m的3股结构帘线。将白坯帘线在两组分浸渍粘合剂体系(环氧树脂/间苯二酚-甲醛-胶乳)中浸渍,然后在两个加热区中处理,帘线在此先伸张后松弛:1区温度215℃,伸张6%;2区温度240℃,不同的反向伸张/松弛(如无另外说明,则松弛为4%,净伸张为2%)。进行对比时,人造丝纱线(1850 dtex)加捻成广泛使用的470×470捻/m的两股结构白坯帘线。帘线在间苯二酚-甲醛胶乳浸渍液中浸渍并于165℃下伸张+3%。每次更换时,在试验或模拟轮胎性能之前经过处理的帘线必须保存在相对湿度为0%的环境中。

3 经过处理的帘线性能

经过处理的PET帘线的尺寸稳定性是最重要的,因为它直接影响轮胎制造工艺和成品轮胎的均匀性及外观。按照以前研究⁽¹⁾既定的常规,将尺寸稳定性定量表示,见图1。图中示出4种聚酯帘线和典型人造丝轮胎帘线的数据。曲线是由处理成具有不同净伸张的帘线绘制出的,因而改变了拉伸刚度(如LASE,即特定伸长率下的负荷;按目前的惯例,用LASE-x表示在伸长率为x%时的应力)。正如所预料的,对给定的材料,通过较高

伸张处理提高拉伸刚度,当帘线置于硫化温度下时,也可能增加收缩。根据恒定收缩率或恒定 LASE 可进行不同材料间的有意义的比较。例如,通过处理得到1.5%自由收缩率的1X40聚酯纤维提供的拉伸刚度(23cN/tex)比普通聚酯材料如1W70(11cN/tex)高。从替代的观点看,通过恒定的 LASE-5 25 cN/tex 处理的1X40,1X30,1X90和1W70聚酯纤维,在一般的硫化温度(177℃)下,收缩率分别为1.7%、2.8%、3.9%和8.5%。通过测定,1X40的尺寸稳定性明显优于1W70。

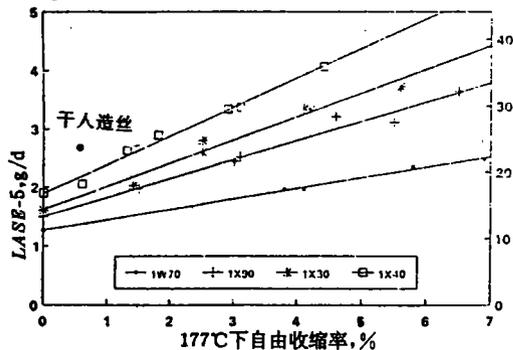


图1 经过处理的聚酯帘线尺寸稳定性

干人造丝的 LASE-5 为25cN/tex,如图所示。如前所述,人造丝的自由收缩率低是人所共知的。在相同收缩率下进行对比时,1X40的 LASE 比1W70高50%,但仍比干人造丝低。但是,聚酯的强力大大高于人造丝,如图2所示。

尽管经过处理的干人造丝帘线可以有效地用于质量控制场合,但含有水分的轮胎帘线则不能应用于高质量轮胎。在人造丝完全干燥时,强力和 LASE 等性能达到最大。然而,暴露于湿气中时,这些性能随着温度增加而显著降低。对于聚酯,则未观察到这种结果。有关湿气影响的进一步讨论将在下一节中介绍。

4 在轮胎中的帘线性能

要弄清楚变量如何影响轮胎性能,首先

必须了解从处理后的帘线到硫化轮胎以及到行驶轮胎的帘线性能的变化。

4.1 硫化的轮胎

一种新的模拟硫化/行驶轮胎(SC/RT)的模拟法是在文献^[2]叙述硫化/硫化后充气方法基础上开发的。新方法是对在管式烘炉中经过处理的帘线施加定负荷(图3)。为反映被模拟的轮胎硫化过程的特殊区段或使用条件,亦即硫化、硫化出模和在规定充气压力下的轮胎使用条件,必须选择负荷。在负荷输入或除去时,调节温度,以便与所研究的特定过程相对应。在模拟过程中,监测帘线长度,并测定关键步骤所得的帘线性能。图4示出了硫化和硫化出模过程而无后充气的一条典型的模拟曲线。由于美国轮胎行业有取消硫化后充气的趋势以及欧洲一般缺少这种设施,因此不包括硫化后充气。下面继续叙述模拟过程中出现的现象。开始时,施加相当于177℃(一般的硫化温度)下产生的帘线收缩力的负荷。然后在几分钟内将温度从室温升到177℃,并将此负荷和温度保持20min,以模拟硫化过程。20min以后,移去初始负荷;同时关闭通向管式炉的电源,此刻与硫化出模点相对应。让管式炉在30min内缓慢冷却至室温。此时,有接头的和邻近无接头的帘线由于收缩减少了相同的长度。这与从硫化轮胎中取出的帘线分析是一致的,这些有接头和无接头帘线的 LASE 相同。

冷却后,施加负荷,模拟帘线在轮胎充气过程中的伸张过程。为研究接头的影响,根据网络分析,假定单层轮胎中接头帘线所受负荷是无接头帘线所受负荷的一半。本研究采用负荷是8.8N和17.6N。

上述 SC/RT 方法可模拟轮胎从硫化机出模时胎侧总收缩主要是帘线产生收缩的情况。换句话说,如果帘线经过胎体被拉向气密层,或者通过绕胎圈反拉而沿其纵轴收缩,那么在硫化机中可能产生收缩。收缩程度取决于橡胶基料给予的约束力。内部研究表明,可

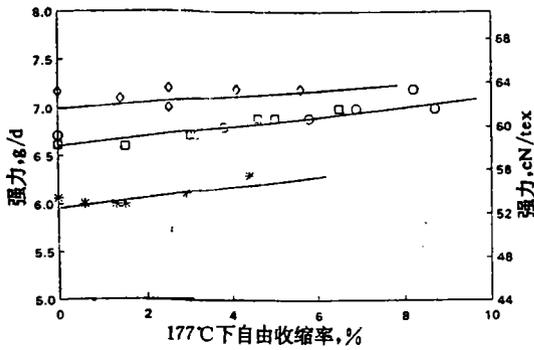


图2 经过处理的聚酯帘线强力

— 干人造丝; ○—1X70; □—1X90;
◇—1X30; *—1X40

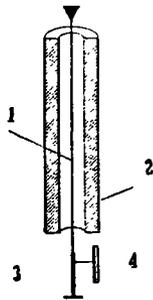


图3 硫化模拟仪器

1—处理过的帘线; 2—管式炉;
3—重量底座; 4—刻度尺

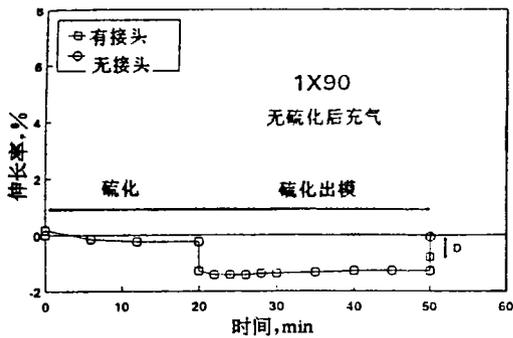


图4 一般硫化模拟过程中
伸长率的变化

把 ASTM 所用的负荷和硫化过程及出模过程的自由收缩试验归类为“有效”约束力^[3]。

这里要注意的是适用于有关聚酯的处

理。在第3节中业已证实,不同的净伸张处理将导致不同的收缩。除非帘线净伸张太低,否则在自由收缩后的 LASE 完全不变。例如,图5示出了对1X90经过不同净伸张处理,即在+6/0、+6/-2和+6/-4%伸张/松弛后的数据。尽管经过自由收缩后的收缩率不同,但自由收缩后的 LASE 值却完全近似(12 cN/tex),与初始净伸张无关。有些意外的是,净伸张较低者,收缩后 LASE 一直较高。然而,如果最初处理过的帘线再处理成 LASE 为10cN/tex,那么将没有外力能够使收缩后的 LASE 提高到12cN/tex。在确定最佳处理聚酯条件时应牢记这一点。聚酯的固有优点是通过调节收缩,帘线处理可以满足获得最大的外胎均匀性的要求。与聚酯不同的是,人造丝收缩率完全不依赖于处理条件。

研究证明,硫化轮胎中人造丝帘线的含湿量范围为4%~6%^[4]。因此,将聚酯帘线性能与含湿量范围的人造丝帘线进行对比看来是恰当的。例如,在图6中,经过处理的帘线:

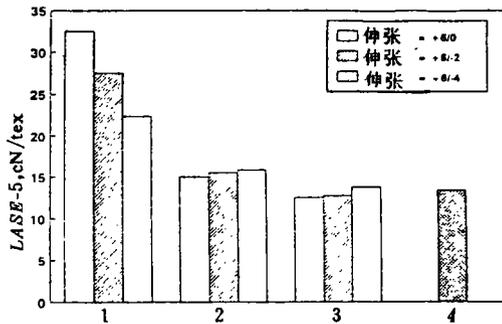


图5 净伸张对处理时帘线性能以及 ASTM 和自由收缩后性能的影响

1—初始; 2—ASTM 收缩后;
3—自由收缩后; 4—取自轮胎
(无硫化后充气)

(a)暴露于不同湿度的环境中以获得不同含湿量;(b)硫化在轮胎中然后抽出,其 LASE 可与处理过的1X40聚酯帘线相比较(不同湿度对聚酯 LASE 的影响尚未证实;经验告诉

我们,暴露于同一湿度环境下产生的变化不到3%)。示出了处理过的帘线在处理时以及按 ASTM 试验收缩和自由收缩的试验结果(松弛条件:分别在温度177℃,负荷0.44和0.088cN/tex)。将取自轮胎的人造丝与处理过的含湿率为6%的人造丝帘线进行比较,进一步证明了前面提到的研究结果。由此可见,在实际使用条件下,与人造丝相比,1X40的尺寸稳定性相当优越。

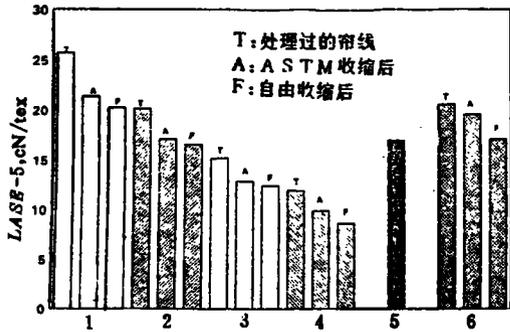


图6 处理过的具有不同含湿率的人造丝帘线、取自轮胎的人造丝帘线和处理过的1X40帘线之间的中等模量对比(图中示出的是处理过的帘线在处理时及 ASTM 和自由收缩后的数据)

1—1%水;2—6%水;3—10%水;4—15%水;
5—取自轮胎的人造丝帘线;6—1X40

4.2 行驶中的轮胎

SC/RT 模拟可继续用于估计轮胎使用条件对帘线性能的影响。“充气”后,或者在帘线冷却后施加负荷,将加热室温度升至100℃,以模拟轮胎在超高速下的行驶条件。假定压力保持不变,经过5h后,切断通向加热室的电源,让帘线逐渐冷却至室温,这可模拟轿车行驶5h后制动和停车。代表曲线如图7所示。或者反过来,人们可用经历过 ASTM 收缩试验或自由收缩试验的帘线对这种行驶的轮胎进行模拟。因为预测的结果相同,所以没有做这种试验。

5 预测的轮胎使用性能

5.1 胎侧凹陷(工厂)

在应用充气伸张基础上的伸长取决于被模拟的帘线有接头还是无接头;有接头与无接头的伸长率之差用 D 表示(见图4)。该差值与在工厂测得的轮胎胎侧凹陷水平有直接关系。

为了说明伸长率差 D 与胎侧凹陷深度的关系,使用一个简单模型。在该模型中,胎侧距接头的距离近似于半圆的半径 R_2 (图8)。接头处半径为 R_1 。胎侧凹陷等于半径之差($R_2 - R_1$)。伸长率差 D 等于两个半圆的弧长之差。由于半径与弧长成正比,因此胎侧凹陷深度可以表示为

$$SWI = (R_2 - R_1) \propto \frac{\Delta L}{\pi}$$

式中 $\Delta L = D$ (充气时的胎侧弧长)。注意,对一给定结构的轮胎, D 与预测的胎侧凹陷深度成正比。

用4种聚酯进行试验的结果列于表1。将硫化时和充气的轮胎帘线与标准帘线相比,尺寸稳定的高级聚酯1X40预计胎侧凹陷浅37%以上。

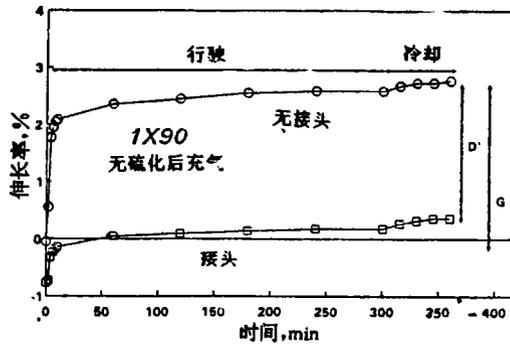


图7 典型行驶模拟过程中伸长率的变化

在上述模拟中测得的伸长率变化值(差值) D 预计与取自轮胎使用同种帘线模量预测的不同伸长率相关。预测的轮胎胎侧凹陷可根据轮胎内帘线的模量经由 Rim 和 Nel-

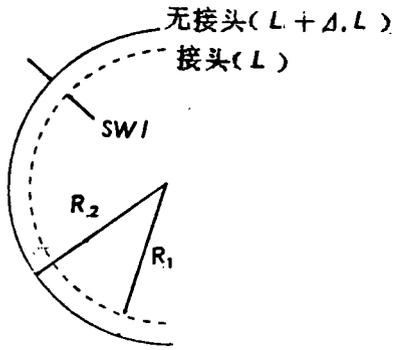


图8 在硫化模拟基础上用于计算胎侧凹陷的模型

$$SWI = R_2 - R_1 = \frac{\Delta L}{\pi}$$

son 推导出的表达式^[6]来表示:

$$SWI = \frac{r\pi P(r_c^2 - r_w^2)(N_2 - N_1)}{EN_1N_2}$$

式中 SWI ——胎侧凹陷;

r ——凹陷部位的曲率半径;

P ——充气压力;

E ——帘线模量(例如 LASE-5/0.05);

N ——一条轮胎的帘线层总数;

r_c ——轮轴到胎冠的距离;

r_w ——轮轴到轮胎最宽处的距离。

对于一给定结构的轮胎,预测的胎侧凹陷与胎体层帘线的模量成反比。

在本文中,采用自由收缩试验来模拟轮胎加工过程。有两种不同的方法可获得自由收缩后帘线模量。一是通过每种材料自由收缩率曲线外推至零得到的尺寸稳定性图并读出 LASE 近似值来估计帘线模量;另一个是直接通过进行帘线自由收缩试验,然后测量

表1 伸长率变化值与 SWI 改善

材料	$D, \%$	改善, %
1W70	0.71	0
1X90	0.60	15
1X30	0.54	24
1X40	0.45	37

模量来获得。外推法可对实际测得的值给予可靠的评价(图1)。

根据模量法,下面预测的胎侧凹陷将有所不同改善(表2)。

表2 SWI 改善(模量法)

材料	LASE-5/0.05	改善, %
1W70	820	0
1X90	960	17
1X30	1020	24
1X40	1150	40
人造丝(轮胎内)	1140	39

如表2所示,从帘线收缩/模量法获得的结果实际上给出了管式炉模拟的凹痕结果。模量法的优点是它极快而且容易实行。实际的轮胎胎侧凹陷测量结果表明,1X90比1W70小32%^[1]。因此,本试验已低估了对高级产品改善的潜力。

处理过的人造丝帘线模量也列于表2,该帘线的湿度为6%,且在相同的 decitex 下测定。看来1X40和人造丝实际上具有相同的性能。

5.2 胎侧凹陷(行驶轮胎)

在硫化/充气后和行驶以后伸长率差如图9所示。行驶后,对于所有材料,胎侧凹陷均显著增大。然而,尺寸稳定性较好的材料的凹陷开始较小,而且一直保持着优于标准1W70聚酯的优势。从轮胎在试验转鼓实验中获得的数据表明,这种胎侧凹陷足以代表实际在轮胎上出现的胎侧凹陷。轮胎试验还指出,使用过程中出现的胎侧凹陷在轮胎里程约达到1500km 之后增长到一平衡水平(图10)。

最后,值得注意的是,行驶后立即(冷却前)获得的 δ 值与冷却后获得的 δ 值完全一样。这意味着胎侧凹陷在轿车停放后和轮胎冷却下来不发生变化。这一点经轮胎在试验转鼓上试验得到了证实。

5.3 轮胎胀大

如前节所述,轮胎在行驶过程中出现的

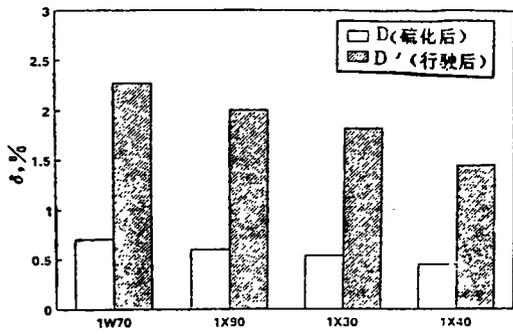


图9 硫化模拟(D)后和行驶模拟(D')后的δ, δ表示相应的胎侧凹陷

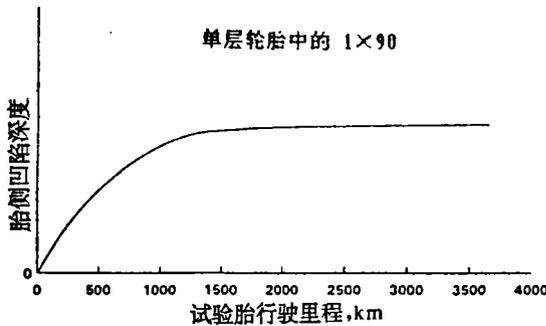


图10 测得的胎侧凹陷与行驶里程的函数关系(速度110km/h)

蠕变, 表现为轮胎断面宽的增大。断面宽增大也可以用监测充气后长度变化, 也就是从硫化到冷却后施加负荷的模拟方法来预测。再参见图7, 在负荷作用下无接头帘线伸长率G的变化反映了断面宽的增大。根据与胎侧凹陷分析相类似的分析, 这种增大与伸长率G的变化成正比。对于较新的材料, 预测的这种增大的改善结果如表3所示。

表3 伸长率变化和增大改善

材料	G, %	改善, %
1W70	3.17	0
1X90	2.79	12
1X30	2.32	27
1X40	1.87	41

如果这种新材料降低的增大足以使一生产批量轮胎断面宽的平均增大低于界限值, 那么这些改善实际上是比较显著的。

5.4 均匀性

轮胎均匀性是由沿与试验轮接触的轮胎圆周的径向力变量测得的。因此, 它主要是与试验轮接触的轮胎断面变形性(径向模量)的测量值。这种测量装置示意图见图11。许多因素如橡胶和胎体层材料的不均匀性和成型时帘布层偏歪导致成品轮胎的径向力变化过大。胎体层的不均匀性包括帘布中不同的帘线间距, 甚至包括由于处理条件不一致导致的帘线性能差异。然而, 许多相邻帘线模量必须有所不同, 使得在足够宽的范围大大提高模量以便检测。就胎体层增强而论, 实验指出轮胎硫化和出模时的温度差可引起轮胎内各部位之间不同的收缩率; 轮胎中温度较高部位产生的径向力, 在曲线上处于较低点⁽²⁾。考虑到这一点, 具有高尺寸稳定性的帘线(也就是给定初始LASE的帘线收缩率较低)应有助于轮胎具有较好的均匀性, 轮胎的降级和次品减少。例如, 经过处理达到相同LASE(18cN/tex)的4种聚酯的自由收缩率与收缩温度的函数关系曲线如图12所示。尺寸较稳定的材料的收缩率在硫化温度至40℃范围内一直是低的, 说明由于硫化和冷却温度不同而产生的尺寸变化较小, 从而导致轮胎均匀性较好。

因为1X40和人造丝具有相似的尺寸稳定性, 所以两种轮胎的均匀性也应该是可比的。

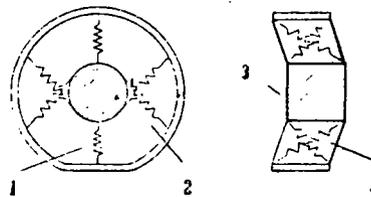


图11 胎侧刚性部件(参考文献[8])

1—径向弹簧; 2—周向弹簧;
3—车轮/轮辋; 4—横向弹簧

5.5 操纵性能

与均匀性一样,操纵性能也是难以单独用帘线模拟来定量的。轮胎结构变量在决定轮胎操纵特性中被认为起主要作用。然而,因为轮胎胎侧在胎面区(通过与地面接触提供牵引力)和胎圈区(作为与车轮轮辋和汽车主体结合的部分)之间充当连接体,所以胎体材料在决定轮胎总的操纵性能方面起着某种作用。瞬时转向性能是测定操纵性能研究的一个主要方面。相位滞后被定义为周期性侧滑角输入与相应转向力输出的夹角(或时间)。操纵性能随着相位滞后的降低而改善。

Futamura^[7]研究了胎体和带束层增强材料对相位滞后的影响。他得出这样的结论:带束层刚度与相位滞后成正比。带束层刚度可以在静态下或借助轮胎转向力来测得。判断胎体帘布层材料对相位滞后没有明显影响。不过,对每条轮胎只测量了一次。Hanada等人^[8]测定了相位滞后与胎侧刚性部件,也就是胎侧径向和周向刚度(图11)之间的相互关系。发现相位滞后随着胎侧横向和周向刚度的增大而减小,但随着径向刚度的增大而增大。与Futamura的观点一样,他们也断定相位滞后随着转向刚度的提高而增大。

有关理想胎体材料性能的上述结论的含义是不清楚的。在方向上,帘线刚度增大,轮胎的横向和周向刚度也应该增大。动态模量是与帘线刚度密切相关的,帘线刚度可在近似轮胎行驶条件的状况下进行测定。图13为动态模量与含湿量的函数关系图(这些测量结果是用高应变动态粘弹仪^[9]获得的。为模拟轿车子午胎在通过接地印痕时典型的负荷和应变振幅,对模拟条件进行了筛选)。在轮胎内,含水量约6%的人造丝的动态模量明显低于具有同等量的1X40帘线。因此,一条轮胎可以使用较少的PET帘线,但却有相等的模量和操纵性能,从而可以大幅度降低成本。

5.6 抗机械损伤性能/柱塞能

由于安全原因,轮胎的抗机械损伤即撞

击性能是重要的。一条轮胎的能量吸收值决定它由于与路面上障碍物的高速撞击或由于穿行路面凹凸不平的地带的抗破坏性。美国运输部要求用对轮胎胎面进行的柱塞能测量结果确定这种静态抗破坏性。有3种可能的破坏形式:胎体帘线断裂、带束层帘线断裂和胎圈钢丝断裂。如果破坏不是发生在胎体帘线上,那么可采用有限元分析法确定胎体帘线“安全系数”的大小和胎体帘线强力本身对安全系数的影响。某些轮胎制造商还通过将一柱塞强压到胎面上并测量该力和分布特性,确定胎侧抗机械损伤性能。这种测量是由胎体帘线的能量吸收特性支配的。

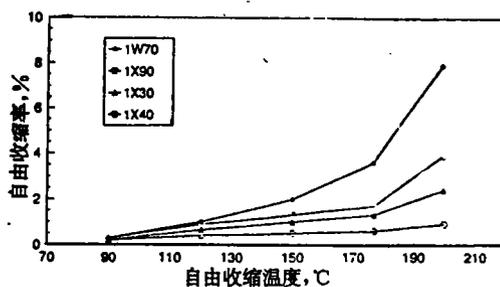


图12 在不同收缩温度下测得的处理过的帘线的自由收缩率

对于胎面和胎侧冲击性,可以通过韧性测量来单独鉴定不同胎体帘线的相对性能,尤其是在中等应变下具有相同LASE的帘线。图14示出4种聚酯和人造丝帘线在自由收缩后的韧性,这些结果能最近似地表示轮胎中帘线的状况。这里,韧性是以帘线破坏的总能量确定的,它相当于应力-应变曲线下的能量。在重量相同时,1X40的韧性比一般聚酯高7%,比人造丝高29%。就聚酯材料而言,这些韧性增大是通过较大的应变破坏达到的。因此,与其它聚酯特别是和人造丝相比,1X40应该赋予轮胎较好的抗冲击性。

作为一个有趣的研究结果,应该注意,尽管1X40的强力较一般聚酯稍低,但韧性较高。所有聚酯的强韧性能均大大高于人造丝。

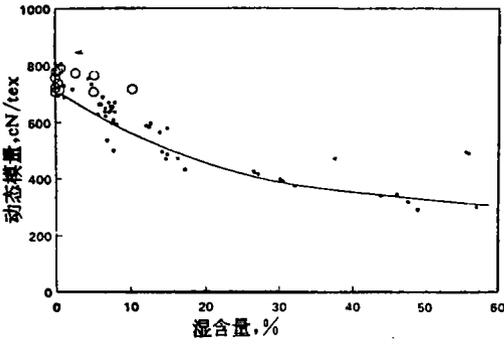


图13 作为含湿量的函数测得的动态模量。

在轮胎中的人造丝的含湿量约为6%。

通过将帘线暴露于从干燥空气
到完全浸入水中的可控环
境中引入所含的水分

预伸张力24N; 测试频率10Hz; 应变幅
度0.5%; ·—人造丝, o—1X40

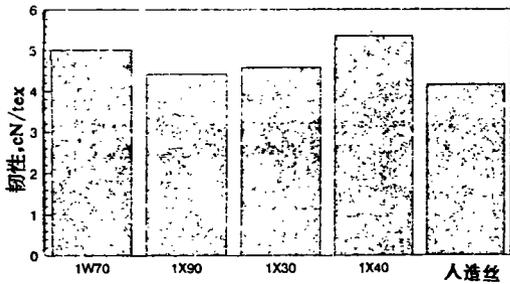


图14 自由收缩后处理过的帘线的韧性

轮胎设计历来是这样的:要求胎体帘线满足某些最小强度要求。这种整体式的方法对在中等负荷下(例如 LASE-5)最终帘线强力和模量之间存在直接相关性的传统帘线来说是需要的。然而,随着新一代改进尺寸稳定型聚酯的出现,现在能在高强度、模量的帘线与强力稍低但有较高的模量、韧性和断裂伸长的

帘线之间作出选择。因此,现在需要调整轮胎耐久性的设计准则,以优化性能并很可能有机会减轻帘线重量而不损失使用性能。

最后要注意的是,人造丝帘线由于严格的试验条件保持问题,不能进行上述模拟。此外,我们的研究表明,轮胎中人造丝帘线的含湿量大约为6%,这与文献提供的数值相一致。为了对人造丝进行严格的试验,需要建立一种能够解释模拟过程中这些结果的方法。其中可能的一种方法是将人造丝帘线埋在橡胶中进行试验。目前这种方法正在研究中。

6 结论

尺寸稳定性高的新一代聚酯能够提供与目前人造丝增强的轮胎竞争的轮胎性能。凭借例如 Allied Signal 公司的聚酯 1X30 和 1X40 的高尺寸稳定性,能够赋予轮胎优异的均匀性、操纵性、耐久性(抗机械损伤性)和物理外观,包括既减少了胎侧凹陷又耐胀大。此外,实际上还可以根据处理条件来判断和控制允许习惯制造的帘线性能,以便对轮胎生产厂的特殊要求相匹配。

已研究并描述了实验室模拟试验,它要求用最少的材料和资源进行试验。对比候选的轮胎增强材料,这种模拟可以提供相对定量的测量结果。他们还在进行广泛试验和修改,以期模拟轮胎硫化和行驶过程的不同部分。

参考文献(略)

译自德国《Kautschuk+Gummi, Kunststoffstoffe》,46[4],297~302(1993)