

# 轮胎用芳纶帘线的性能研究

王同英,陈振宝,张清水

(北京橡胶工业研究设计院,北京 100039)

**摘要:**研究了芳纶帘线的物化性能、动态力学性能及芳纶带束层(缓冲层)轮胎性能。试验表明,芳纶帘线具有高断裂强度、高模量、低断裂伸长率及独特的耐切割性能;其动态模量高、弹性好、滞后损失率小,耐疲劳性能较差;芳纶子午线轮胎高速性能好、质量小、滚动阻力低。

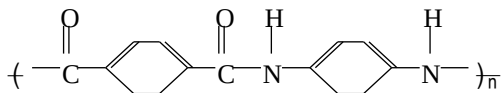
**关键词:**轮胎;芳纶帘线;物理性能;动态力学性能

**中图分类号:**TQ342<sup>+</sup>.72;U463.341<sup>+</sup>6 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8171(2002)08-0476-05

目前子午线轮胎日益向高速、安全、低滚动阻力、节省燃料、减少环境污染等性能方面发展,而轮胎骨架材料对轮胎性能的影响至关重要。为了推动芳纶在轮胎骨架材料中的应用,本文对芳纶的结构、物化性能、动态力学性能及芳纶轮胎性能进行讨论。

## 1 芳纶的结构及物化性能

芳纶为聚对苯二甲酰对苯二胺,其结构式为



由 X-射线衍射测得晶胞尺寸  $a = 7.78 \text{ \AA}$ ,  $b = 5.28 \text{ \AA}$ ,  $c = 1.29 \text{ \AA}$ , 聚合物链段在晶体中的排列情况见图 1。芳纶的取向度为 95%~98%, 在结晶度测定中, X-射线衍射图中没有观察到非晶区结构的弥散光晕, 为此认为芳纶的结晶度相当高。

图 1 表征了芳纶纤维为轴向伸展的聚合物, 链给予纤维高的纵向弹性模量, 芳香族环及电子的共轭体系给予纤维高的化学稳定性和力学刚性; 横向为氢键结合, 氢键使酰胺基具有稳定性, 但它比纤维轴向的共价键要弱得多, 因此芳纶纤维具有较高的纵向强度和较低的横向强度。这也是芳纶纤维不耐压缩疲劳的原因之一。

芳纶在空气和氮气中的差热分析(DSC)谱图

见图 2。由图 2 可以看出, 芳纶纤维具有优异的热稳定性, 其在氮气中的分解温度比在空气中高, 而且在空气中分解是放热反应, 而在氮气中分解是吸热反应。

在吸收光谱中, 芳纶在紫外线区间约 250 nm 处有一个强的吸收峰, 低而宽的吸收峰集中于 330 nm 周围, 这就造成了芳纶使用上的缺陷。芳纶纤维不仅须屏蔽紫外光, 而且不可暴露于阳光中。芳纶在空气中吸收来自于阳光的 300~400 nm 波长的辐射, 导致强力性能严重下降。阳光辐射对芳纶帘线强力的影响见表 1。由表 1 可见, 在相同阳光照射条件下, 浸胶芳纶帘线强力损失率比未浸胶帘线小得多, 可见芳纶浸胶层不仅可解决其与橡胶的粘合问题, 同时具有良好的防紫外线辐射效果。浸胶芳纶选用黑色聚乙烯膜包

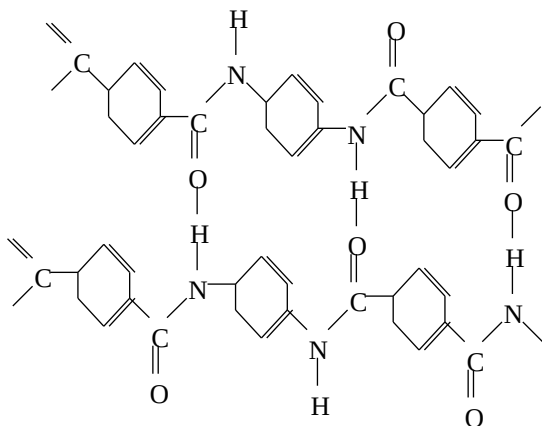


图 1 聚对苯二甲酰对苯二胺的化学结构

**作者简介:**王同英(1936-),女,山东蓬莱人,北京橡胶工业研究设计院教授级高级工程师,主要从事橡胶用骨架材料的应用研究工作。

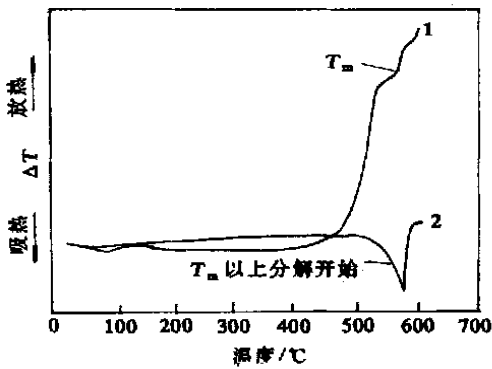


图 2 芳纶在空气和氮气中的 DSC 谱图  
1—空气中放热分解;2—在氮气中吸热分解

表 1 不同阳光辐射时间下的芳纶强力损失率 %

| 项 目      | 辐射时间/h |      |      |      |
|----------|--------|------|------|------|
|          | 60     | 150  | 260  | 400  |
| 未浸胶芳纶    |        |      |      |      |
| 白色聚乙烯膜包装 | 10.7   | 17.0 | 28.1 | 29.8 |
| 浸胶芳纶     |        |      |      |      |
| 白色聚乙烯膜包装 | 4.3    | 9.0  | 8.6  | 12.8 |
| 黑色聚乙烯膜包装 | 5.6    | 9.0  | 7.3  | 8.5  |

装比白色包装强力损失稍小,但对保持其与橡胶的粘合力有明显的效果,例如经过 480 h 阳光照射,黑色聚乙烯膜包装的浸胶芳纶粘合力下降率为 3.5 %,而白色聚乙烯膜包装的浸胶芳纶粘合力下降率为 63.2 %,可见黑色包装对芳纶帘线浸胶层的防护作用十分显著。

2 芳纶帘线的力学性能

2.1 强伸性能

芳纶纤维的化学结构决定了其具有高断裂强度、高模量及低伸长的优异性能。这些性能在纤维的应力-应变曲线中得到充分体现(各种轮胎帘线用材料的应力-应变曲线见图 3)。此外,芳纶纤维还具有耐高温性能,而且在高温下基本不收缩。轮胎常用帘线材料的性能对比见表 2。

2.2 耐刺扎性能

芳纶兼备了材料的刚性和韧性,因而具有很好的耐刺扎、耐切割性,这对防弹用品和轮胎非常重要,但给产品的加工带来了困难。试验表明,用直径 6.35 mm 的螺杆分别对涂有 CR 的芳纶纤维织物和锦纶纤维织物进行恒速刺扎,以试样破坏的负载来判断耐刺扎性能,结果芳纶破坏负载

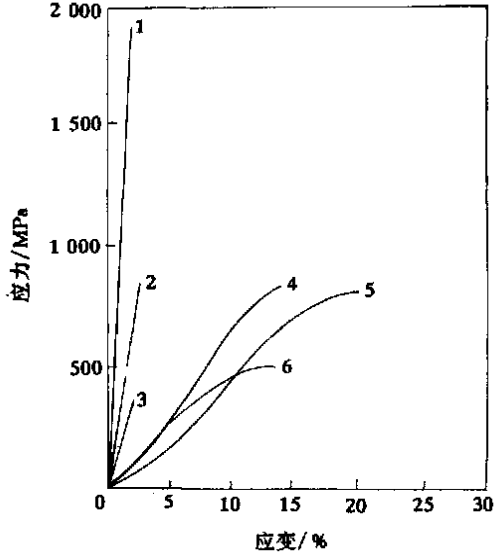


图 3 各种轮胎骨架材料应力-应变关系曲线

1—芳纶;2—玻璃纤维;3—钢丝;4—聚酯;  
5—锦纶 66;6—人造丝

表 2 轮胎常用帘线的性能比较

| 项 目                                            | 芳纶    | 玻璃纤维 | 锦纶 66 | 聚酯   | 钢丝    |
|------------------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|
| 密度/( $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )         | 1.44  | 1.53 | 1.14  | 1.38 | 7.85  |
| 熔点/°C                                          | 500   | 200  | 255   | 260  | 1 600 |
| 断裂强度/<br>( $\text{mN} \cdot \text{tex}^{-1}$ ) | 2 000 | 520  | 830   | 840  | 345   |
| 初始模量/<br>( $\text{N} \cdot \text{tex}^{-1}$ )  | 55    | 12   | 5     | 10   | 26    |
| 断裂伸长率/%                                        | 3.3   | 13   | 20    | 13.5 | 1.9   |
| 含湿率/%                                          | 4.5   | 12.5 | 4.5   | 0.5  | 0     |
| 耐热性能*/%                                        | 90    | 20   | 45    | 55   | 100   |
| 热空气收缩率#/%                                      | 0.1   | 0.2  | 4     | 5.5  | 0     |

注: \*试验条件:200 °C×48 h; # 试验条件:160 °C×4 min。

约为 534 N,锦纶仅为 267~311 N。试验还表明,刺穿破坏负载与织物的拉伸强度成正比,而且芳纶纤维大多没有被切断,只是由于施加负载使织物结构被破坏。由此可以确信芳纶纤维具有独特的耐刺扎和耐切割性能。

2.3 疲劳性能

选择芳纶-橡胶复合材料为试样,进行弯曲、拉伸、压缩及剪切的疲劳试验,然后测定帘线的强力保持率,结果锦纶帘线强力保持率为 100 %,而芳纶帘线为 70 %~78 %,芳纶-锦纶复合帘线为 85 %,显然芳纶帘线的耐疲劳性能较差。

为了探讨芳纶纤维耐疲劳性能差的原因,进行了纤维拉伸破坏和疲劳破坏的形态分析,采用

扫描电子显微镜观察芳纶和锦纶纤维的破坏形态。试验发现,锦纶纤维拉伸和疲劳破坏后的形态均为纤维的横向裂纹,形成 V 形槽破坏,见图 4 和 5,这种破坏在材料学上属韧性破坏;芳纶纤维拉伸和疲劳破坏后的形态均为纵向裂开,见图 6 和 7。这是由于芳纶纤维为棒状的伸直链结构,具有高结晶和高取向,使纤维具有极高的纵向强度,而横向的氢键结合弱得多,导致芳纶纤维破坏为纵向裂开。

疲劳试验后的芳纶纤维表面出现了许多小球状凸起物(见图 7),人们称其为缠结带。分析认



图 4 锦纶纤维拉伸断裂形态



图 5 锦纶纤维压缩弯曲疲劳断裂形态

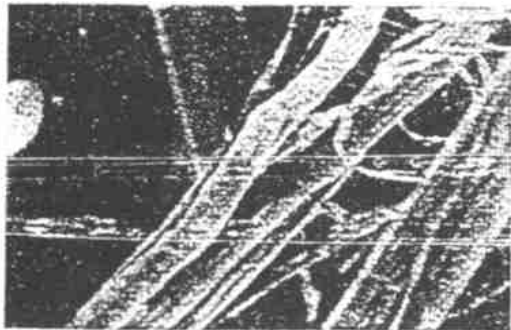


图 6 芳纶纤维拉伸断裂形态



图 7 芳纶纤维压缩弯曲疲劳断裂形态

为,这是由于这种纤维结构只能适应极小的压缩变形,当压缩变形增大时会引起分子链构象的变化,导致大分子链弯曲,沿着单位晶胞及微纤维传递,最后在纤维上形成缠结带。

### 3 芳纶帘线的动态力学性能

帘线动态力学性能试验方法较多,在此仅讨论粘弹谱和循环往复拉伸试验结果。

#### 3.1 粘弹谱试验

粘弹谱试验帘线应变为小应变,属线性粘弹行为。不同帘线的动态模量( $E$ )及损耗因子( $\tan \delta$ )与温度( $\theta$ )的关系曲线见图 8 和 9。

从图 8 和 9 可以看出,芳纶帘线的  $E$  和  $\tan \delta$  均不随试验温度的升高而变化,基本平行于温度坐标轴。芳纶帘线的  $E$  明显大于聚酯和锦纶帘线,而  $\tan \delta$  则比聚酯和锦纶帘线小得多,这充分表征了芳纶帘线具有高动态模量、低滞后损失的特性,非常适宜用作滚动阻力低的高性能轮胎骨架材料。

#### 3.2 循环往复拉伸试验

循环往复拉伸试验是帘线在大变形下进行往复拉伸-回缩试验,属于非线性粘弹行为,对其在轮胎中的实际应用更有意义。循环往复拉伸试验测定的帘线滞后损失率见图 10。图 10 表明,芳纶帘线的滞后损失率最小,而聚酯帘线最大。滞后损失率与帘线在循环拉伸过程中的塑性变形有关,塑性变形大,则滞后损失率大,这亦可通过图 11 中的滞后圈进行分析。帘线在拉伸时为外力对帘线做机械功,回缩时帘线对外做功,这部分功

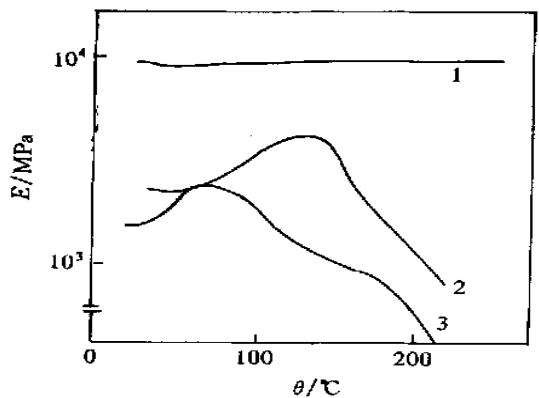


图 8 不同帘线 E-θ 关系曲线  
1—芳纶;2—聚酯;3—锦纶

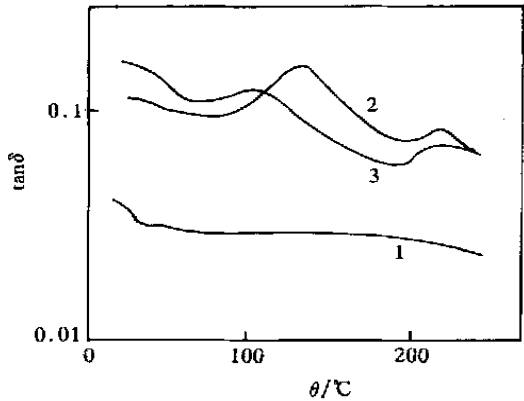


图 9 不同帘线 tan δ-θ 关系曲线  
注同图 8

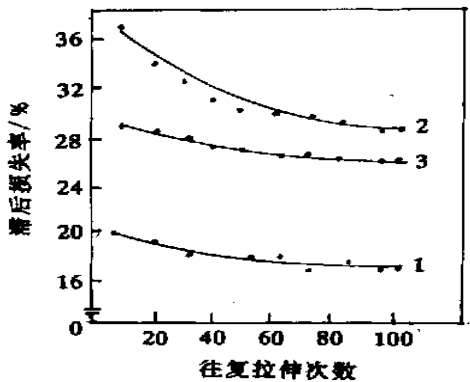


图 10 滞后损失率与往复拉伸次数的关系曲线  
注同图 8

系帘线释放出拉伸时储存的能量。图 11 中  $oab$  所围面积为滞后圈,变形越大,滞后圈面积越大,则损耗功越大。

试验证明,芳纶帘线的塑性变形最小,滞后损

失率也最小;聚酯帘线塑性变形最大,滞后损失率也最大。塑性变形实质就是高分子粘弹行为中粘性部分的宏观反应。

图 12 示出了芳纶帘线滞后损失率与循环拉伸速度的关系。由图 12 可以看出,滞后损失率随循环拉伸速度的增大而减小,这一规律可用温度-时间等效关系分析。拉伸速度或作用频率增大与降低温度的效应相似,也就是说,拉伸速度大,外力对高聚物的作用时间短,纤维大分子形变来不及响应,相当于作用温度低,大分子得到的能量小,使高分子在同一应力作用下应变小,因此,滞后损失率小。芳纶帘线的这一特征对轮胎实际使用非常有意义。

4 芳纶轮胎性能

芳纶子午线轮胎具有高速性能好、乘坐舒适、质量小、滚动阻力低、节能、噪声低等特性。例如 175/80 SR13 芳纶带束层轿车子午线轮胎的高速行驶性能高达  $220 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,轮胎质量比同规格钢

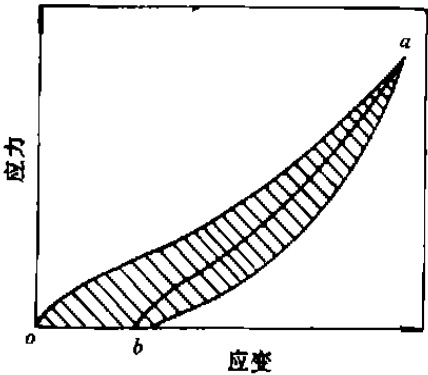


图 11 循环往复拉伸滞后圈

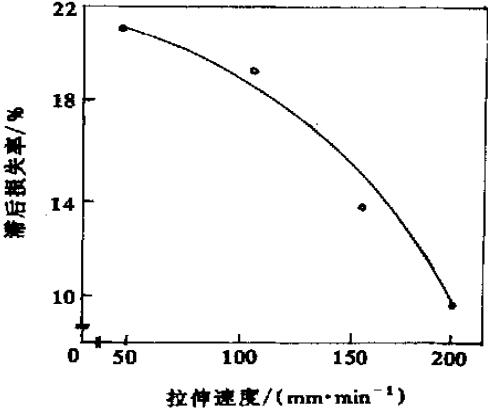


图 12 芳纶帘线滞后损失率与拉伸速度的关系曲线

丝子午线轮胎小 11 %;芳纶单层胎体 6.50R16 轻型载重子午线轮胎质量比同规格 3 层聚酯胎体子午线轮胎小 14.4 %,滚动阻力低 4.3 %。

为了考核芳纶帘线的耐疲劳性,对芳纶带束层轻型载重子午线轮胎进行室内耐久性能试验及实际里程试验。其结果为:耐久性能试验经 120 h 后,帘线强力保持率为 98 %;实际行驶 7.6 万 km 后,帘线强力保持率为 90.17 %。试验结果表明,芳纶帘线的耐疲劳性能虽然比其它合成纤维帘线差,但仍能够满足轮胎的使用要求。

巨型工程机械轮胎在矿区工作,使用条件十分苛刻,绝大部分轮胎因被矿石刺扎而破坏,轮胎使用寿命极短,造成了很大的经济损失。根据芳纶特有的耐切割、耐刺扎性能,将芳纶帘线用于工程机械轮胎的缓冲层,保护了胎体。例如 18.00 - 33 32PR 芳纶缓冲层轮胎由于耐刺扎性能好,

使用寿命比同规格锦纶缓冲层轮胎提高 65 %,比芳纶-锦纶复合缓冲层轮胎提高 18 %。芳纶缓冲层工程机械轮胎使用寿命的提高可降低成本,减少换胎次数,提高使用效率,具有很高的技术经济价值。

## 5 结语

(1) 芳纶纤维具有高断裂强度、高模量、耐高温及独特的耐切割性能。

(2) 芳纶帘线动态模量高、弹性好、滞后损失率小,但耐疲劳性能稍差。

(3) 芳纶子午线轮胎高速性能好、质量小、滚动阻力低;芳纶缓冲层工程机械轮胎具有突出的耐刺扎性能,行驶里程高,社会和经济效益显著。

第一届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文

## Study on properties of aromatic polyamide cord

WANG Tong-ying, CHEN Zhen-bao, ZHANG Qing-shui

(Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The physico-chemical properties and dynamic mechanical properties of aromatic polyamide cord and the performance of tire with aromatic polyamide belt were investigated. The test results showed that the aromatic polyamide cord featured high rupture strength, elasticity and modulus (especially dynamic modulus), low elongation at break and hysteresis, good cut resistance, but poor fatigue resistance; and aromatic polyamide radial tire possessed good high speed performance, reduced weight and low rolling resistance.

**Key words:** tire; aromatic polyamide cord; physical properties; dynamic mechanical properties