

文章编号: 1001-4888(2009)03-0191-06

一种聚酯帘线单向拉伸试验的新方法

吴福麒, 李子然, 董 毅, 夏源明*

(中国科学技术大学 近代力学系, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 提出了一种适合聚酯帘线单向拉伸试验的新方法(简称减法试验法)。该方法首先进行不同长度试件的单向拉伸试验; 然后对获得的任意两个差别较大的载荷—位移曲线实施位移减法, 从而得到消除了端部效应的新的载荷—位移曲线(其对应试件的长度为原两试件长度之差); 进而得到相关的力学参数。本文的试验和相关分析表明, 直接的单向拉伸试验存在明显的端部效应, 必须予以消除, 且在同一载荷下端部效应与试件的长度无关; 同时又表明本文所提出的减法试验法是有效的, 能够获得聚酯帘线较真实可靠的应力应变曲线和相关力学参数。

关键词: 聚酯帘线; 拉伸模量; 减法试验法; 端部效应

中图分类号: TQ330.38⁺9; TB302.3 **文献标识码:** A

0 引言

轮胎是一种由橡胶和骨架材料组成的复合结构。骨架材料包括纤维帘线、钢丝帘线和胎圈钢丝, 在轮胎中起到增强的作用。轮胎在使用中主要靠骨架材料来承受各种载荷^[1]。近三十年来, 随着计算机水平和有限元技术的飞速发展, 有限元分析已逐渐成为子午线轮胎结构分析的主要手段^[2]; 而在轮胎结构的数值模拟中, 骨架材料的拉伸模量将对计算结果产生很大的影响, 因此有必要通过试验准确地获得各种帘线在实际承载范围内的拉伸模量。对于丝状试件的拉伸试验, 试件与夹头之间的滑移是影响试验结果的主要因素。李炜等^[3]在研究钢丝帘线的拉伸力学性能时, 先用两块紫铜板夹住帘线, 再连同紫铜板一起夹持在试验机的夹头中。他们在试验后发现帘线与紫铜板之间存在滑移的痕迹, 但由于他们使用引伸仪来测量帘线的变形, 因此消除了端部效应对测试结果的影响。在聚酯帘线的拉伸试验中, 同样也存在较大的端部效应, 且由于其材质软、直径小、伸长量大, 已经不能用引伸仪来测量它的变形, 因此必须寻求新的能够消除端部效应的测试方法。

为了消除端部效应对试验结果的影响, 人们尝试了很多新的试验方法。在金属压缩试验中, 文献[4]提出了一种新方法, 即减法试验法, 来消除端部效应对试验结果的影响; 文献[5]则用有限元分析进一步证实了这种方法的有效性。

本文试图推广文献[4]的减法试验法, 应用到聚酯帘线拉伸模量的测试中, 以期消除端部效应对试验结果的影响。

1 试验原理

设两个同材料、同截面的试件, 原长分别为 L_1 和 L_2 ($L_1 > L_2$); 又设在同一载荷(也即同一应力)下, 相应的夹头相对位移分别为 u_1 和 u_2 , 夹头与试件之间的相对位移, 即端部效应均为 Δ , 而试件真实伸长量分别为 Δl_1 和 Δl_2 , 则有:

* 收稿日期: 2009-01-07; 修订日期: 2009-06-10

通讯作者: 夏源明(1942—), 男, 中国科学技术大学近代力学系教授, 博导。E-mail: ymxia@ustc.edu.cn

$$\begin{cases} u_1 = \Delta + \Delta l_1 \\ u_2 = \Delta + \Delta l_2 \end{cases} \quad (1)$$

在同一载荷下,试件中的真实应变应相等,即:

$$\epsilon = \frac{\Delta l_1}{L_1} = \frac{\Delta l_2}{L_2} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得:

$$\epsilon = \frac{u_1 - \Delta}{L_1} = \frac{u_2 - \Delta}{L_2} = \frac{u_1 - u_2}{L_1 - L_2} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,对同一载荷下的夹头位移进行减法处理,即可消除端部效应的影响,得到试件的真实应变,进而得到真实的拉伸模量。

反之,若不消除端部效应的影响,则直接测得的应变分别为:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{\Delta + \Delta l_1}{L_1} = \frac{\Delta}{L_1} + \epsilon \\ \epsilon_2 = \frac{\Delta + \Delta l_2}{L_2} = \frac{\Delta}{L_2} + \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,直接测得的应变大于真实应变,同时直接测得的模量会低于真实模量;试件长度的增加可以减小端部效应所产生的误差,在相同条件下,试件长度越大,试验测得的应变越接近真实应变,相应的模量也越高。

2 聚酯帘线的单向拉伸试验

聚酯帘线的单向拉伸试验在 DCS5000 岛津材料试验机上进行。由于帘线无法直接用试验机的夹头进行夹持,本文将聚酯帘线通过灌胶固结在夹块的锥孔中(图 1),然后再把夹块夹持到试验机的夹头上。

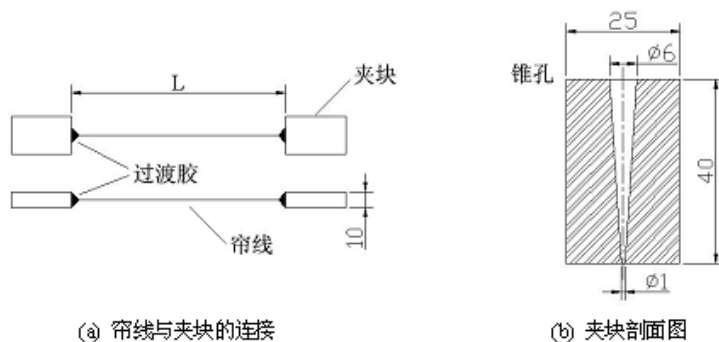


图 1 聚酯帘线拉伸试件示意图(单位: mm)

Fig. 1 Sketch of the specimen

简要的操作步骤如下:

- (1) 用酒精将夹块擦洗干净,尤其要保证夹块锥孔内的清洁;
- (2) 用单面贴纸封住夹块的下端锥孔,并在对准锥孔中央的贴纸处刺一个小洞,使得帘线能够穿过而胶不会漏出;
- (3) 将帘线穿过锥孔并按照设定好的长度打结,用大头针将打好的结固定在夹块的上端锥孔中央,而在帘线另一端悬挂一个确定重量的重物,以确保帘线垂直于夹块端部;
- (4) 向锥孔内灌胶,本试验所用的胶为 SA103 耐冲击胶;
- (5) 待胶完全凝固后,撕去密封的贴纸,然后在帘线末端涂适量的胶,使得帘线与夹块之间平滑过渡;
- (6) 将试件夹持到岛津材料试验机上,以预定的加载速率 5mm/min 和设定载荷 20N(聚酯帘线在

实际使用中承受的最大载荷^[6])对试件进行单向拉伸循环加载。

本文对 1500D/2 高模低缩型聚酯帘线进行了不同长度下的单向拉伸试验,试验分为两组,具体试验内容见表 1。图 2 为聚酯帘线多次循环加载的载荷一位移曲线。从图 2 可以看出,帘线首次加载得到的拉伸曲线与经过不同次加卸载后获得的拉伸曲线并不一致,但经过数次加卸载循环后,获得的加卸载曲线基本吻合。这是因为聚酯帘线是一种由数根(本文为两根)聚酯单丝捻在一起的加捻结构,内部存在空隙,前几次加载获得的拉伸曲线并不是真实的材料响应。为获得 0~20N 范围内真实的材料响应,本文采用 5 次加卸载循环后的试验数据进行处理。

表 1 聚酯帘线单向拉伸试验方案

Tab. 1 Scheme of the uniaxial tension test

帘线类型	高模低缩型聚酯帘线(1500D/2)		
帘线直径 ϕ (mm)	0.66		
试件长度 L (mm)	第一组: 232	356	470
	第二组: 232	355	468
加载速率	5 mm/min		

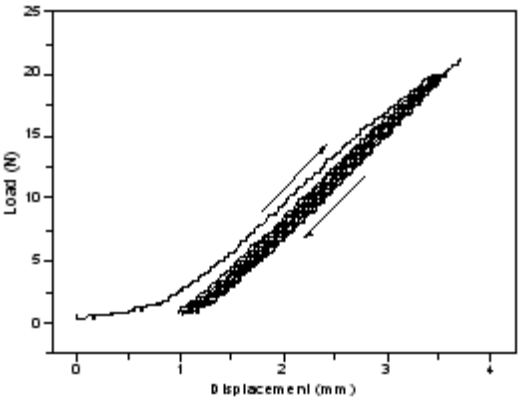


图 2 聚酯帘线的单向拉伸载荷一位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve under uniaxial tension condition

3 试验结果与数据处理

图 3 为不同长度的聚酯帘线在 0~20N 之间的载荷一位移曲线。从图 3 可以看到,试验曲线出现明显的高频抖动,但总体上呈线性分布,故先对这些曲线进行线性拟合。线性拟合结果和相关系数分别列在图 3 和表 2 中。由拟合所得的直线斜率结合试件的截面积和初始长度,即得到聚酯帘线的直接拉伸模量(见表 2)。由图 3 和表 2 可以看出:拟合直线和试验结果非常吻合;试件越长,直接测得的拉伸模量越高,这与式(4)的分析一致,即试件长度的增加可以减小端部效应所导致的误差。

根据式(3)和图 3 的拟合曲线以及表 2 中的数据,在同一载荷下对不同长度的试件进行减法处理,得到新的聚酯帘线的应力一应变曲线,如图 4 所示。图中各曲线的斜率即为减法处理后聚酯帘线的拉伸模量,结果见表 3。

表 2 不同长度聚酯帘线的直接拉伸模量

Tab. 2 Tensile moduli of the polyester cords with different lengths

	第一组			第二组		
试件长度(mm)	232	356	470	232	355	468
直接拉伸模量(GPa)	5.438	5.764	5.939	5.438	5.760	5.929
线性拟合相关系数	0.9990	0.9992	0.9995	0.9990	0.9990	0.9995

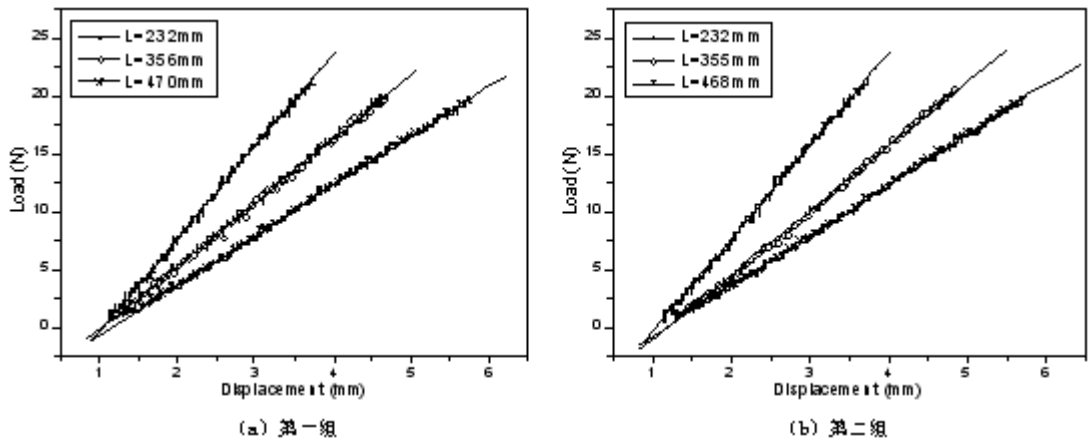


图 3 不同长度聚酯帘线的载荷—位移曲线及拟合结果

Fig. 3 Load-displacement curves and fitting results for the polyester cords with different lengths

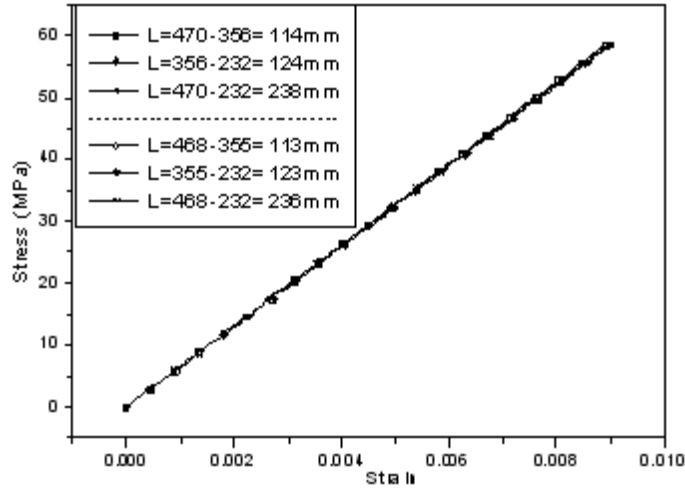


图 4 减法处理后聚酯帘线的应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of the polyester cords after Minus-Treatment

表 3 减法处理后聚酯帘线的拉伸模量

Tab. 3 Tensile moduli of the polyester cords after Minus-Treatment

	第 一 组			第 二 组			
试件长度 (mm)	470—356 =114	356—232 =124	470—232 =238	468—355 =113	355—232 =123	468—232 =236	总平均值： 6.517GPa 总标准差： 0.026GPa
拉伸模量 (GPa)	6.559	6.492	6.524	6.536	6.484	6.509	
平均值 (GPa)	6.525			6.510			
标准差 (GPa)	0.027			0.021			

从表 2 和表 3 可以看出,通过减法处理所得到的拉伸模量的重合性很好,均明显大于直接通过夹头位移所得到的模量。这表明端部效应对试验结果有显著的影响,而减法试验能消除这种影响,得到较可靠的拉伸模量。

4 分析与讨论

下面对试验结果作进一步的分析。仍然假定两个不同长度试件的端部滑移量都为 Δ ,则在同一载荷(也即同一应力)下由式(2)(3)可得:

$$\Delta l_1 = \epsilon l_1 = \frac{u_1 - u_2}{L_1 - L_2} L_1 \tag{5}$$

则试件端部的滑移量为:

$$\Delta = u_1 - \Delta l_1 = u_2 - \frac{u_1 - u_2}{L_1 - L_2} L_1 = \frac{u_2 L_1 - u_1 L_2}{L_1 - L_2} \tag{6}$$

取载荷为 20N,将表 2 中每组三个不同长度试件的试验结果两两联立,由式(6)分别求得试件的端部滑移量,结果见表 4。从表 4 可以看出,两组试验的端部滑移量的相对偏差(标准差/平均值)分别为 3.3%和 2.4%,这表明在相同的试验条件下试件的端部滑移量变化很小,确可近似看成一个常量。另外还可以看出,端部滑移量约占夹头总位移量的 9%~17%,试件越短,其所占比例越大,对试验结果的影响也越显著。

表 4 试件的端部滑移量(20N)
Tab. 4 End slippage of the specimens

	长度组合(mm)	夹头位移(mm)	端部滑移量(mm)	平均值(mm)	标准差(mm)
第一组	$\begin{cases} L_1=232 \\ L_2=356 \end{cases}$	$\begin{cases} u_1=2.494 \\ u_2=3.611 \end{cases}$	0.405	0.420	0.014
	$\begin{cases} L_1=356 \\ L_2=470 \end{cases}$	$\begin{cases} u_1=3.611 \\ u_2=4.626 \end{cases}$	0.439		
	$\begin{cases} L_1=232 \\ L_2=470 \end{cases}$	$\begin{cases} u_1=2.494 \\ u_2=4.626 \end{cases}$	0.415		
第二组	$\begin{cases} L_1=232 \\ L_2=355 \end{cases}$	$\begin{cases} u_1=2.494 \\ u_2=3.603 \end{cases}$	0.402	0.412	0.010
	$\begin{cases} L_1=355 \\ L_2=468 \end{cases}$	$\begin{cases} u_1=3.603 \\ u_2=4.614 \end{cases}$	0.425		
	$\begin{cases} L_1=232 \\ L_2=468 \end{cases}$	$\begin{cases} u_1=2.494 \\ u_2=4.614 \end{cases}$	0.410		
	总平均值:0.416 mm 总标准差:0.013 mm				

5 结论

本文提出了一种适合聚酯帘线的、能消除端部效应的单向拉伸试验的减法试验法。试验结果和相关分析表明,该方法是行之有效的,能够消除直接单向拉伸试验中端部效应的影响,从而获得可靠的试验结果。该方法没有限定于小变形范围,对大变形也应该是适用的。

参考文献:

[1] 俞洪,丁剑平等. 子午线轮胎结构设计与制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 41—65 (YU Qi, DING Jianping, et al. Structure Design and Manufacture Technology for Radial Tires[M]. Beijing: Chemical Industry

- Press, 2006: 41—65(in Chinese))
- [2] 李炜. 子午线轮胎结构有限元分析和设计原理的若干问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2003 (LI Wei. Radial Tires: Finite Element Structural Analysis and Some Basic Problems in Design Principle[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2003(in Chinese))
- [3] 李炜, 夏勇, 夏春光, 夏源明等. 轮胎钢丝帘线拉伸力学性能的实验研究[J]. 实验力学, 2002, 17(3): 307—314 (LI Wei, XIA Yong, XIA Chunguang, XIA Yuanming, et al. An Experimental Study on the Tensile Mechanical Behavior of Steel Cords for Radial Tires[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(3): 307—314(in Chinese))
- [4] 王晋平, 夏根娣. 金属压缩试验的一种新方法[J]. 实验力学, 1995, 10(3): 218—221 (WANG Jinping, XIA Gendi. A New Method for Metal Compressing Experiments[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(3): 218—221(in Chinese))
- [5] 万华培, 王从约, 夏源明. 一种新的金属压缩试验方法的有限元分析[J]. 实验力学, 1998, 13(4): 553—559 (WAN Huapei, WANG Congyue, XIA Yuanming. FEM Numerical Analysis for a New Method of Metal Compression Test[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(4): 553—559(in Chinese))
- [6] 李兵, 李子然, 夏源明, 李炜. 扁平化对子午线轮胎力学性能影响的有限元分析[J]. 力学季刊, 2007, 28(2): 209—216 (LI Bing, LI Ziran, XIA Yuanming, LI Wei. Finite Element Analysis for Effects of Aspect Ratio on Passenger Car Radial Tire[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(2): 209—216(in Chinese))

A New Method for Uniaxial Tension Test of Polyester Cord

WU Fu-qi, LI Zi-ran, DONG Yi, XIA Yuan-ming

(Department of Modern Mechanics, CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A new method for uniaxial tension test of polyester cord, named Minus-Test method, is presented in this paper. Firstly, uniaxial tension tests for specimens with different lengths were performed. Then subtractions between any two of the obtained load-displacement curves were carried out and new load-displacement curves in which the end-effect had been eliminated were obtained. The corresponding specimen's length for the new curve equates to the difference of the two original specimens' lengths. Finally, relevant mechanical parameters were acquired. The tests and analysis in this paper indicate that obvious end-effect which should be eliminated indeed exists in the direct uniaxial tension test and is independent of the specimen's length at the same load. The Minus-Test method presented here is effective and is able to obtain more reliable stress-strain curves and relevant mechanical parameters of polyester cord.

Keywords: polyester cord; tensile modulus; Minus-Test method; end-effect