

# 热定型对丙纶综丝绳索性能的影响

赵书经 中国纺织大学 朱吉平 广州市纺织纤维检验所

**〔摘要〕** 本文研究热定型对绳索结构及性能的影响。以船用丙纶综丝绳索为对象，通过一系列实验和分析，揭示了热定型使丙纶综丝绳索结构、性能变化的规律，说明了热定型使绳索的使用性能大大改善、寿命延长。

绳索的热定型是谋求绳索结构稳定及改善性能的重要手段。未经定型的绳索，因结构和性能不稳定，将直接影响实际使用情况。新制成的船用缆绳较为松软，容易弯曲和捻接，并容易使用，但其性能在船舶使用中会发生很大的变化。使用初期，容易产生相当大的结构变形，此后绳索明显收缩、束紧，而且不均匀，结果使绳索在捻接及使用柔顺性等方面发生困难，更严重的将导致整根绳索机械性能变差，局部紧密度不均，从而降低绳索的使用性能及寿命。

绳索的热定型可视为纤维内部结构的定型和绳索几何结构的定型，定型后的绳索使用性能将大大改善，并延长使用寿命。本文以船用丙纶综丝绳索为对象，在研究热定型对丙纶综丝结构、性能变化规律的基础上，系统探讨了热定型对丙纶综丝绳索性能的影响。

## 实 验

### (一) 试样

未定型试样(用 N-H 表示): 丙纶综丝(直径为 0.34mm); 丙纶综丝船用缆绳(三股搓捻, 名义直径为 6mm)。

热定型试样: 在自制热定型实验装置上, 对未定型试样在干热空气介质下进行热定型处理。热定型张力分松弛和定长两种(分别以 D-N、D-F 表示); 热定型温度未经特殊说明的均为 140℃; 热定型时间: 综丝为 5min, 绳索为 15min。

### (二) 实验方法

#### 1、热收缩率

利用岛津 AG-10TA 型试验机的附设恒温箱(有自动控温系统, 升温速度约为 8℃/min)及自制的热收缩测定装置, 记录升温过程中各温度点的试样长度。热收缩率(%) =  $L_0 - L / L_0 \times 100$ , 式中:  $L_0$  为试样收缩前长度; L 为试样到达收缩温度时的长度。

#### 2、X 射线衍射强度曲线

利用理学 3015-X 射线衍射仪测试粉末试样的 I-2θ 曲线, 测试条件: 电压为 40KV, 电流为 20mA, 用 CuK<sub>α</sub> 射线。

#### 3、热谱

在 CDR-1 型差动热分析仪上测定热谱。升温速度为 10℃/min, 量程为 5mcal/s, 试样用量约为 8mg, 测定时通入氮气保护。

#### 4、热应力

利用岛津 AG-10TA 型试验机及附设的恒温箱测定热应力特性, 升温速度为 8℃/min, 综丝夹距为 300mm, 绳索试样夹距为 200mm, 用记录仪自动记录热应力的变化。

#### 5、应力—应变特性

利用上述同样试验机测定应力—应变特性, 试样夹距为 200mm, 综丝试样拉伸速度为 200mm/min, 绳索试样拉伸速度为 500mm/min。

#### 6、结节强力

在试样中部打结, 测其断裂强力, 测试

方法与条件同上。

#### 7、回弹性

利用上述同样试验机的自动负荷—变形控制功能，选用循环拉伸实验方式，测定回弹性，测试长度均为 200mm。

#### 8、蠕变

试验机和选用功能同上。综丝试样设定恒负荷为 3kg；绳索试样设定恒负荷为 450kg。试样夹距长度均为 200mm。

#### 9、耐疲劳性

在 Instron 疲劳试验机上测定耐疲劳性。综丝试样设定的平均负荷为 2.5kg，振幅为 2.5kg，频率为 1Hz，三角形波，试样长度为 200mm；绳索试样设定的负荷为 325kg，振幅为 175kg，其余与综丝相同。

#### 10、耐磨性

在自制的弯曲磨损试验装置上测定耐磨性，该装置如图 1 所示。综丝试样的磨料采用干磨砂布（A 粒度：120），磨辊直径为 36mm，转速为 60rpm，负荷为 50g；绳索试样的磨辊直径为 80mm，负荷为 5kg，其余与综丝相同。

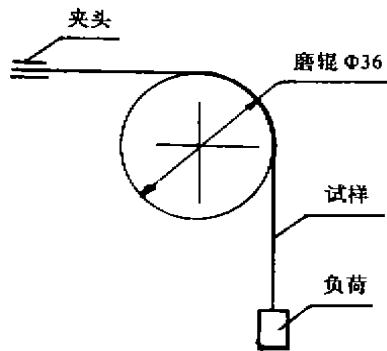


图1 耐磨试验装置示意图

#### 11、柔软性

绳索柔软性用自制实验装置安装在岛津 AG-10TA 型试验机上进行测定，图 2 为实验示意图。试样长度为  $\pi r + 2l = \pi \cdot 36 + 2 \times 20 = 153\text{mm}$ ，圆弧段 ( $\pi \cdot 36$ ) 为有效实验长度，二短柱段 ( $2 \times 20$ ) 为固定长度。实

验时压杆从图示位置下压 36mm，下压速度为 100mm/min，用记录仪记录压缩曲线。

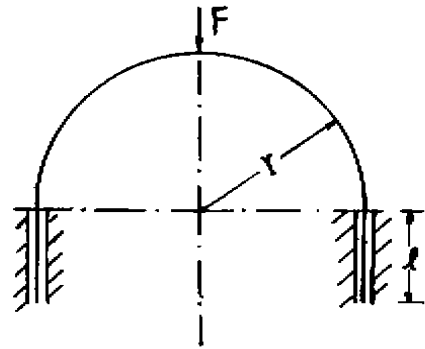


图2 柔软性实验示意图

## 结果和讨论

### (一) 热机械性质

#### 1、热收缩

图 3 为丙纶综丝及其绳索的热收缩曲线。由图中可以看出，与未定型试样相比，定型试样的热收缩突变温度提高，同一收缩温度下的热收缩率降低，尤其松弛定型试样，在定型温度较低的收缩温度区域内，热收缩率几乎为零。此结果表明，热定型会使丙纶综丝的热稳定性显著提高。

丙纶综丝经热定型后热收缩率减小，主要与综丝内部结构变化有关。由综丝各试样的 X 射线衍射强度曲线可知，定型试样各晶面衍射强度的峰值增高、峰形变窄，反映了定型试样的结晶度提高，微晶尺寸增大的结果。高温热定型不仅有利于结晶度的提高，减少无定形区的体积，而且还有利于结晶结构趋于稳定与完整。关于这一点，各综丝试样的 DSC 曲线是很好的辅证。各定型试样 DSC 曲线的熔融峰起始温度及峰值所对应的温度侧转移，表明结晶结构开始熔融温度及熔点都在提高。在比综丝热定型温度稍高的高温侧，出现一类似肩状的小吸热

峰，它不是综丝结晶形态的变异，而是对应于热定型温度的一种热力学稳定性结构的存在。

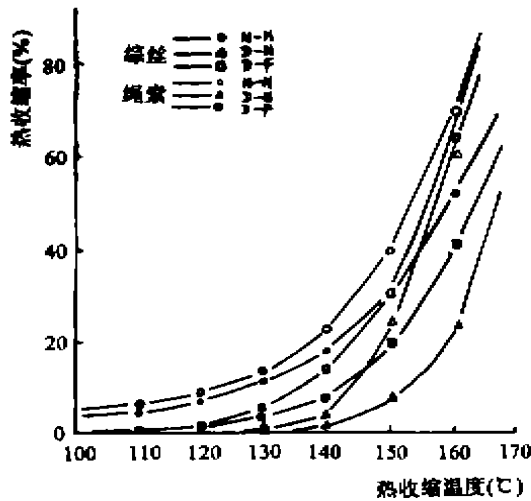


图3 热收缩曲线

由图3中热定型绳索的热收缩曲线，同样可以看出热定型绳索热收缩率减小、热稳定性提高的结果。并且，与热定型综丝热收缩曲线相比较，热定型绳索热收缩曲线相对较低而且平缓些，它反映了同一收缩温度下热定型绳索热收缩率的减小及随收缩温度提高热收缩变化率的降低。

## 2. 热应力

丙纶综丝及其绳索试样的热应力曲线表明，热定型对试样热应力曲线峰形、峰值的影响是显著的，与未定型试样相比，定型试样的热应力曲线的峰值变小，且峰值所对应的收缩温度向高温侧移动；又热应力的起始温度也向右移，峰值相应变窄。热定型试样热应力曲线产生的这些变化，与前述的热定型试样的热收缩变化规律有很好的一致性，它们都表明试样经热定型后内部结构的稳定趋向和热稳定性提高的趋势。

### (二) 机械性质

#### 1. 应力—应变特性

图4为各种定型温度下定型综丝试样的

应力—应变曲线。由图4可知，定长定型试样的应力—应变曲线相互接近，且都位于原丝附近；而松弛定型试样的应力—应变曲线则处在原丝的下面，且随定型温度的增加有较大的变化，高定型温度（160℃）的试样出现明显的屈服现象，且有很大的延伸性。

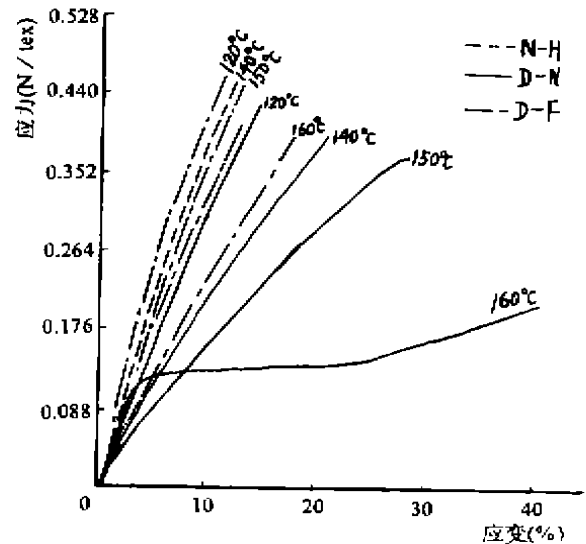


图4 综丝的应力—应变曲线

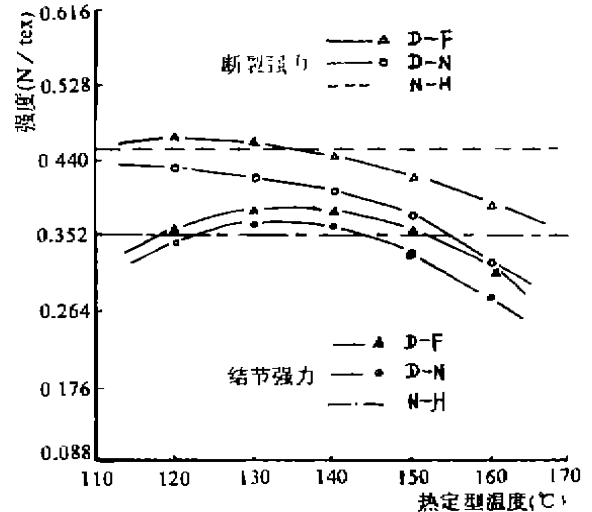


图5 热定型温度与综丝强度的关系

图5为热定型综丝试样的强度与热定型温度之间的变化情况，由图可知，在实验温

度范围内，定型综丝试样的强度大多低于原丝，且随定型温度的提高呈下降趋势。图5也给出了定型综丝结节强力的变化曲线，定型综丝的结节强力在一定的定型温度区域内一般都超过原丝。

图6为热定型综丝试样的断裂伸长及断裂功的变化情况，由图6可知，定型试样的断裂伸长、结节断裂伸长随定型温度的升高而增大；松弛定型试样的断裂功随定型温度的升高而明显增大，但定长定型试样的断裂功变化不大。由此可知，综丝的韧性可以通过松弛定型而得到很好的改善。

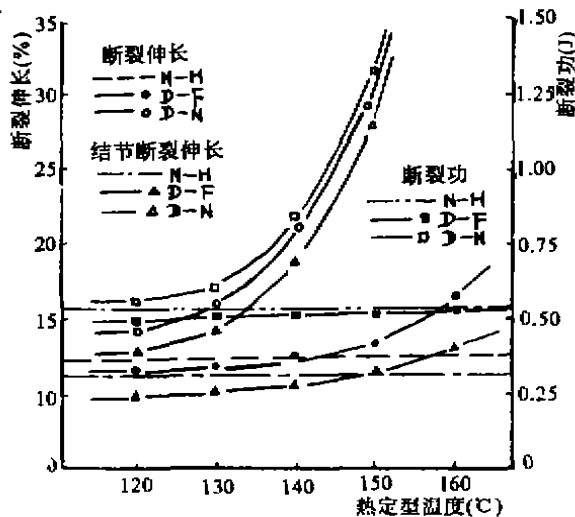


图6 热定型温度与综丝断裂伸长、断裂功的关系

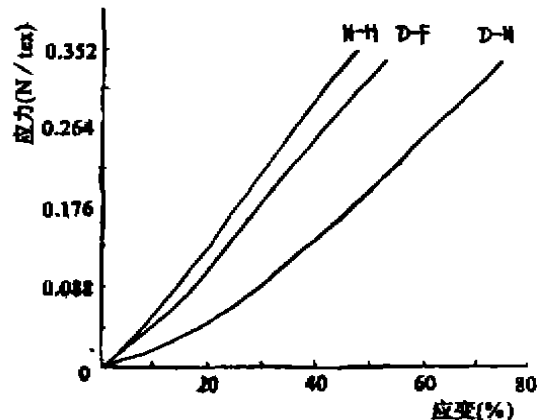


图7 绳索的应力—应变曲线

图7为各绳索试样的应力—应变曲线。由图7可以看出，热定型绳索试样与原丝相比，强力的差异是非常小的（各种试样强力值见表1），几乎没有下降。此结果与热定型综丝（尤其是松弛热定型综丝）的强力变化有明显的区别。其原因可认为是由于热定型导致绳索结构均匀化的结果。我们知道，绳索的几何结构较之单纱、股线更为复杂，由此而造成内部各纤维之间所处的状态（如被拉伸或压缩等）存在着较大的差异。经热定型的绳索，由于热定型作用使处在紧张状态的综丝应力得到松弛，长度变化，从而使绳索结构得到调整而趋于均匀，在受外力拉伸时，各根综丝承受负荷的同时性及断裂的同时性得到改善，绳索内综丝的强度利用率得以提高。

表1 绳索的综丝强度利用率

绳索试样	综丝强度 (cN/dtex)	绳索强度 (cN/dtex)	强度利用率 (%)	综丝结节强度 (cN/dtex)	绳索结节强度 (cN/dtex)	结节强度利用率 (%)
N-H	4.46	3.39	76.0	3.52	1.56	44.3
D-F	4.40	3.37	76.6	3.74	1.69	45.2
D-N	3.96	3.33	84.1	3.56	1.59	44.7

由表1也可看出，热定型同样可提高绳索的结节强度及其利用率。然而绳索的结节强度与其断裂强度相比，降低的幅度是较大的，这一结果告诉我们，从绳索使用时承受

负荷能力来看，应尽量避免打结和扭结是非常重要的。

此外，由图7还可看出，无论松弛定型还是定长定型的绳索，断裂功都将增大，它

反映了热定型对提高绳索韧性具有良好效果。

### 2、回弹性

由各综丝试样的应力、应变与弹性回复率的关系可知，在相同应力或应变条件下，定型综丝的弹性回复率均大于原丝。其中，应力回弹性在定长定型综丝方面较为突出，而松弛定型综丝则在大应变条件下显现出良好的弹性回复性能。

绳索试样的弹性回复率与应力、应变的关系表明，热定型使绳索弹性回复率提高，这很容易从前述的定型综丝弹性回复性能的变化规律中获得解释。

### 3、耐磨性

图 8 为热定型温度对耐磨性能的影响，由图中可知，定型试样的耐磨性能均较原丝提高，且随定型温度的上升，耐磨强度的增大更为显著；在相同定型温度下，松弛定型试样较定长定型试样的耐磨性能为好。

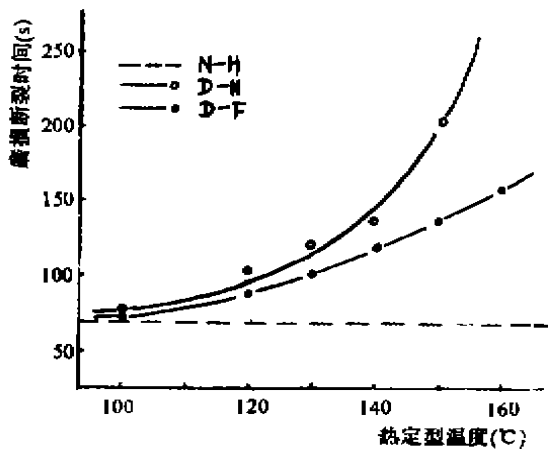


图 8 热定型温度对耐磨性能的影响

图 9 为用密度法测得的各定型试样的结晶度与其耐磨性的关系。由该图可以看出，随定型温度提高，结晶度显著增大，与此相对应的磨损断裂时间也明显延长。因此可知，定型综丝耐磨性能的提高与其结晶度的增加有着密切的关系。

此外，从综丝的性能来看，回弹性和断

裂比功等也都会影响其耐磨性能。定型综丝耐磨性能好与其断裂比功和伸长弹性回复率高有关。

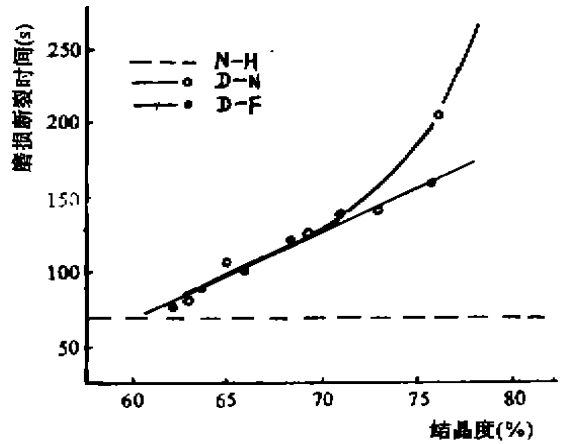


图 9 结晶度与耐磨性能的关系

图 10 为各绳索试样的耐磨曲线，绳索经磨损后的剩余强力随磨损时间的增加而降低。由图中可以看出，热定型绳索的耐磨曲线均在未定型试样之上，其中以松弛定型绳索的耐磨曲线为最高。

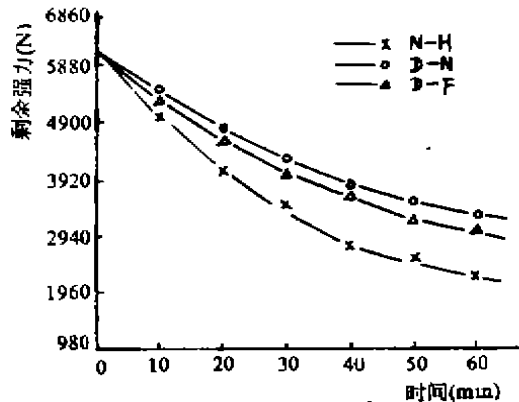


图 10 绳索的耐磨曲线

### 4、蠕变

观察各定型综丝试样蠕变至断裂的整个过程，定长定型试样显示出与原试样相近似的粘性蠕变特性，而松弛定型试样随定型温度提高，粘性蠕变的比例增加较大，并且在 150℃ 的定型情况下，蠕变断裂时间有较显著的减少。

纤维蠕变的主要原因是大分子之间的滑移。由于热定型导致纤维内部结构的变化,影响了大分子之间的作用力,从而在连续恒定负荷作用下,各定型试样大分子从伸直、逐渐被抽拔、滑移直到断裂这一过程不同。定型试样对静负荷的耐久性比原丝降低,但只要热定型条件适当,这种降低可控制得很小。

考虑绳索在小负荷条件下的蠕变断裂时间较长,故实验在断裂强度75%的大负荷条件下测试30分钟的蠕变情况。从各绳索试样的蠕变曲线看,在大负荷条件下,各试样在蠕变初期就显示出明显的区别。以前5分钟为例,未定型试样蠕变率小于7%,而定长定型及松弛定型试样则分别为16%与20%左右。因此,从蠕变性能看,热定型产生的影响是不利的。

#### 5、耐疲劳性

热定型温度对综丝耐疲劳性能的影响表明,热定型综丝的断裂循环数均低于原丝,且随定型温度的提高,断裂循环数下降。松弛定型试样相对定长定型试样来说,断裂循环数的下降更为明显。

从各绳索试样疲劳导致的剩余强力变化曲线看,曲线的倾斜程度表明了强力下降速度,也即疲劳进行的速度,热定型绳索的耐疲劳性能是下降的。

热定型丙纶综丝及其绳索耐疲劳性能下降的原因,可认为是热定型使综丝动态损耗模量增大的缘故。根据粘弹体的动态力学特性,在一定的交变应力的频率和振幅下,单位时间内粘弹体的发热量取决于动态损耗模量的大小。热定型试样动态损耗模量的增大,使得试样在受交变负荷作用时,由热量积蓄引起温升加快,从而导致热定型试样疲劳过程更快的发展。

#### 6、热定型绳索的柔软性

众所周知,柔软度与硬度是一个相对应的概念,从一定意义上说,可认为是反映抵抗弯曲变形能力的大小,它与材料本身的抗

弯刚度等因素有关。从这一点出发,才建立了绳索弯曲状态下的压缩实验方法及对热定型绳索柔软性的评价。根据我们测试的各绳索试样的压缩曲线可知,各试样压缩曲线具有明显的区别,若以最大压缩力作为评价绳索柔软性时,则各试样的柔软性次序是,未定型试样最不柔软,定长定型试样次之,松弛定型试样最柔软。

## 结 论

1、丙纶综丝经热定型后,内部结构趋于完整、稳定,热收缩率减小,热应力降低;热定型绳索在热机械性能方面表现出同样的倾向,这表明绳索经热定型后热稳定性提高。

2、丙纶综丝经热定型后其强度是降低的,但热定型绳索的强度却不降低,由于热定型对绳索结构产生均匀调整作用,从而提高了绳索内综丝强度的利用率。此外,热定型也提高了绳索的结节强度及其利用率。

3、热定型能显著提高绳索的韧性、回弹性、耐磨性。

4、绳索在弯曲状态下压缩实验所得的压缩曲线,能很好地反映热定型绳索柔软性的变化,以最大压缩力为指标的评价结果表明:热定型能显著改善绳索的柔软性。

5、丙纶综丝及其绳索经热定型后,蠕变有所增加,但耐疲劳性下降,只要热定型条件适当,这些变化可以控制得很小。

## 参考文献

- (1) 朱吉平,《丙纶综丝及其绳索的热定型》,中国纺织大学硕士学位论文,1990
- (2) 赵书经、朱吉平,《绳索柔软性的评价方法》,《产业用纺织品》1990,(6)
- (3) (日)产业用纤维研究会,《产业用纤维材料手册》,纺织工业出版社,1986
- (4) 《纤维学会志》,1979,35(2),59