

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.04.005

芳纶编织物在高载荷下的使用寿命预测

宋俊¹, 石宇飞¹, 章琳玲², 李传盟¹, 王林锋¹, 王梦蝶¹

(1. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387; 2. 中国航空工业集团有限公司, 航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 针对预测芳纶绳带在降落伞上的使用寿命常采用半经验的方法, 缺乏理论依据。通过研究高载荷下 25-600 型芳纶 1414 绳带蠕变行为和抗冲击性能, 分别得到芳纶 1414 绳带载荷大小与蠕变断裂时间之间的拟合曲线和冲击强度与冲击次数之间的拟合曲线, 用于预测其在高载荷下的使用寿命, 并测定绳带试验前后的取向度和结晶度。结果表明: 在蠕变过程中载荷大小与蠕变时间对数呈函数关系, 其中单层和单圈两层绳带的拟合方程分别为 $\ln t = 33.65 - 0.33\sigma$ 和 $\ln t = 32.45 - 0.31\sigma$; 冲击模型的斜率与截距均与蠕变模型呈 2 倍的关系, 当样品承受相同载荷时, 蠕变断裂时间对数与冲击次数之间的关系为 $\ln t = An - B$, 即可用冲击次数预测绳带的蠕变断裂时间, 反之亦然。芳纶 1414 绳带蠕变和冲击前后的取向度与结晶度表明, 在相同载荷下, 蠕变和冲击对绳带的损伤效果相同, 这进一步证明 25-600 型芳纶 1414 绳带蠕变性能与冲击性能之间高度联系。

关键词: 芳纶编织物; 芳纶绳带; 蠕变; 高载荷; 拟合模型

中图分类号: TQ342.72

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)04-0024-06

Prediction of service life of aramid woven fabric under high load

SONG Jun¹, SHI Yufei¹, ZHANG Linling², LI Chuanmeng¹, WANG Linfeng¹, WANG Mengdie¹

(1. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Hangyu Life-Saving Equipment Co., Ltd., AVIC, Xiangyang 441003, Hubei Province, China)

Abstract: The semi-empirical method is used to predict the service life of aramid tape in parachute, but lacks of theoretical basis. In this paper, the creep behavior and impact resistance of type 25-600 Aramid 1414 tape under high loads were used to fit the curve of the load size and creep breaking time and the curve of the impact strength and the number of impact tests, respectively, which can be used to predict the service life of aramid tape under high load, and the orientation and crystallinity of the tape before and after the test were measured. The results show that there is a functional relationship between the load and the logarithm of creep time during the creep process, and the fitting equations of single-layer and single-loop two-layer tapes are $\ln t = 33.65 - 0.33\sigma$ and $\ln t = 32.45 - 0.31\sigma$, respectively. The slope and intercept of the impact model are twice those of the creep model. When the sample is under the same load, the relation between the logarithm of creep breaking time and the number of impact tests is $\ln t = An - B$, and the number of impact tests can be used to predict the creep breaking time of the tape, and vice versa. The creep and orientation and crystallinity of Aramid 1414 tape before and after impact tests indicate that under the same load, creep and impact have the same damage effect on the tape, which further proves that there is a high correlation between the creep and impact properties of type 25-600 Aramid 1414 tape.

Key words: aramid woven fabric; aramid tape belt; creep; high load; fitting model

由于芳纶纤维具有优异的物理性能, 自问世以来便受到广泛的关注。在 20 世纪 60 年代进行产业化生产之后, 芳纶纤维便逐渐应用于各个行业^[1-3]。目前芳

纶纤维生产技术成熟的企业有美国的杜邦公司、日本的帝人公司以及俄罗斯的卡明斯克化纤股份公司^[4]。为满足各个行业对高性能材料需求, 我国近年来在芳

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 航空科学基金项目(201929010003)

通信作者: 宋俊(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生态环境纤维材料和功能纤维材料。E-mail: sjhb2000@163.com

纶纤维研发方面投入大量的资金。同时,随着航空领域的快速发展,对降落伞及减速伞等材料的要求也越来越高,由于关系到使用者的生命安全,因此对材料的性能要求极高。芳纶绳带凭借其模量大、强度高、质量轻的优点,成为降落伞绳带的最佳选择之一^[5-8]。

芳纶作为降落伞及减速伞绳带,在使用过程中不可避免地要面临蠕变与冲击。目前有许多学者对该问题进行了研究,并提出许多物理模型来模拟芳纶绳带在实际中的使用情况。Huang等^[9]假设纤维的总应变由黏弹性应变以及黏塑性应变组成,并采用Schapery的单积分本构模型描述黏弹性行为,采用一维阻尼器-滑块-弹簧模型描述黏弹性行为。Lian等^[10]则根据纤维材料中裂纹的应力增长现象提出了纤维材料失效的理论模型,该模型主要针对未加捻的纱线在应力与失效时间之间建立函数关系,该模型适用于理想分布为韦伯分布且断裂强度恒定的长丝,并根据长丝蠕变时的行为,提出了数学模型来模拟这一过程。然而大部分学者研究的是芳纶绳带在低载荷(70%断裂强度以下)的使用情况,对高载荷情况下的蠕变研究较少^[11]。

本文将研究芳纶绳带在高载荷状态下的蠕变情况以及绳带的冲击性能,建立两者之间的模拟方程,使用冲击次数来预测芳纶的蠕变使用寿命,为芳纶绳带的实际使用寿命预测提供理论基础。

1 实验及测试

1.1 主要实验材料与仪器

芳纶 1414 绳带(25-600),航宇救生装备有限公司;场发射扫描电子显微镜(Gemini nsen500),卡尔·蔡司股份公司;X射线衍射仪(D8 DISCOVER with GA-DOS),德国 Bruker 公司;声速取向测量仪(SCY-III),东华大学提供;称重传感器(GJBLY),蚌埠高精传感系统工程有限公司;万能强力机(SANS CMT5205),美特斯工业系统有限公司。

1.2 蠕变实验

分别对单层以及单圈两层的芳纶纤维绳带进行蠕变断裂实验,并观察单层芳纶绳带与双层芳纶绳带之间的差异。其中单层绳带是将绳带的两端各自对折而后缝制,单圈两层绳带是将绳带的两端进行缝合,如图1所示。

使用规格为 25-600 的芳纶 1414 绳带作为原材料,在恒温恒湿的条件下采用拉伸实验测试绳带蠕变性能。实验装置和受力分析如图2所示。由图2可见,

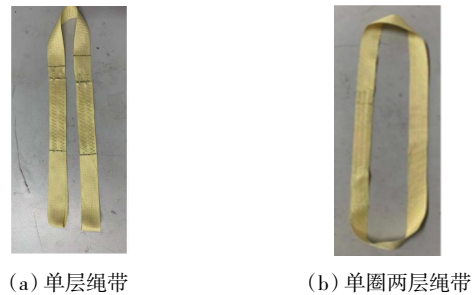


图1 芳纶绳带缝制成品

Fig.1 Aramid tape strap sewn finished product

通过液压装置对槽钢施加向上的力,转换成螺栓对绳带施加拉力,并由拉力传感器记录相应数值。当施加的拉力达到预设载荷时,保持拉力不变,并记录蠕变情况与断裂时间。测试单层与单圈两层芳纶带的断裂强力,分别是 7.57 kN 和 13.24 kN。计算单层和单圈两层芳纶带不同断裂强力百分比(70%、75%、80%、85%、90%)下的所需要的载荷,并测试不同载荷下的蠕变断裂时间,每组实验重复 5 次。

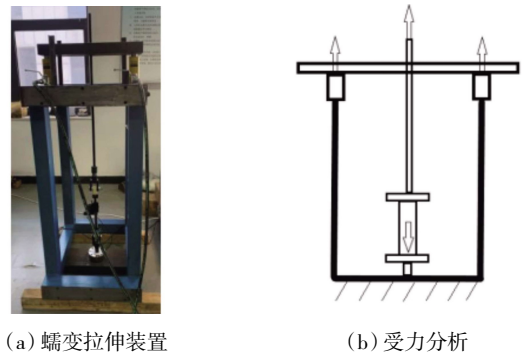


图2 蠕变拉伸装置及受力分析

Fig.2 Creep stretching device and stress analysis

1.3 冲击实验测试

同样使用 25-600 的芳纶 1414 绳带为冲击实验的原料,通过高度为 3 m 的冲击装置测试绳带的抗冲击性能。实验装置及受力分析如图3所示。

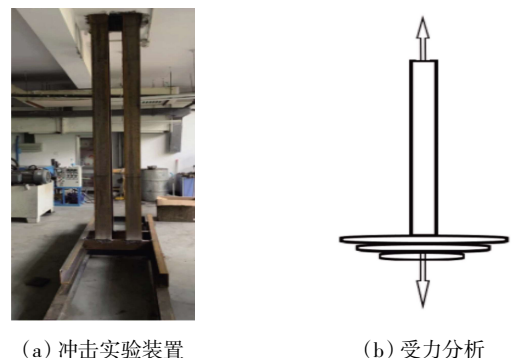


图3 冲击实验装置及受力分析

Fig.3 Impact test device and stress analysis

由图 3 可见,绳带两端分别与传感器和重物连接,通过控制重物的质量来控制绳带承受冲击力的大小,并由拉力传感器记录。单层绳带冲击断裂强力为 7.67 kN,单圈双层绳带的冲击断裂强力为 14.81 kN,并计算不同断裂强力百分比(70%、75%、80%、85%、90%)的冲击力,换算成相应的重物质量,测试每个绳带冲击的数据,每组实验重复 5 次。

1.4 测试与表征

(1) 扫描电镜测试:使用卡尔·蔡司股份公司制造的 Gemini nsen500 型扫描电子显微镜(SEM)来观察芳纶绳带经蠕变拉伸后以及冲击后的微观结构变化。

(2) 取向度测试:采用东华大学制造的 SCY—Ⅲ 型声速取向测量仪测试绳带拉伸前后的取向度,测试声波通过不同长度纤维所需的时间从而得出声速 C ,再根据模量计算公式计算出模量:

$$E = 10^{-9} \rho C^2 \quad (1)$$

式中: E 为模量(GPa); C 为声速(km/s); ρ 为纤维密度,取值为 $1.44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

(3) XRD 测试:采用德国 Bruber 公司生产的 D8 DISCOVER with GADOS 型 X-射线衍射仪分析绳带蠕变后以及冲击后的结晶情况,Cu $K\alpha$ 射线,加速电压和电流分别为 40 kV 和 150 mA,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$,扫描范围为 $2\theta = 5^\circ \sim 45^\circ$ 。计算绳带的结晶百分比 X_c 如式(2):

$$X_c = \frac{A_c}{A_a + A_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_c 为结晶百分比(%); A_c 为结晶区域的面积; A_a 为无定形区域的面积。

2 结果与讨论

2.1 蠕变性能

图 4 为绳带在不同断裂强力百分比下单层和单圈两层芳纶 1414 绳带的伸长率-蠕变时间曲线。

由图 4 可知,试样伸长率在起始阶段随着蠕变时间变化出现急剧升高,然后趋于平稳且不同载荷下的伸长率-蠕变时间曲线是相似的。本次实验中蠕变分为 2 个阶段^[12],绳带的伸长源于弹性应变与塑性变形,第 1 阶段由于高分子聚合物之间的黏弹性剪切的作用,伸长率随时间的增加快速增长,对应高分子蠕变过程中的高弹形变,链段间发生相对滑移,导致绳带的伸长;第 2 阶段主要对应塑性形变,分子间发生相对滑移,不随时间的增加而快速增长,绳带的损伤主要是这一阶段产生的。

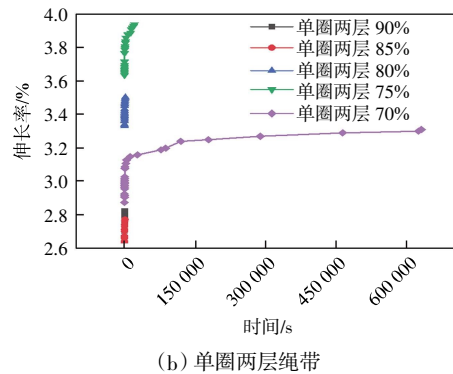
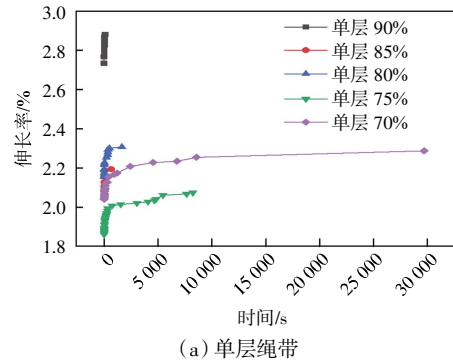


图 4 芳纶绳带各比例下的蠕变曲线

Fig.4 Creep curves of aramid tape belt under each proportion

2.2 蠕变断裂时间与方程拟合

为观察蠕变断裂时间与载荷之间的关系,计算芳纶绳带在各载荷条件下的平均断裂时间,并绘制载荷-蠕变断裂时间曲线图,如图 5 所示。从图 5 中可以观察到,单层绳带与单圈两层绳带的曲线就有相似性,从 80%到 90%,两者的蠕变断裂时间相差不大,在 75%和 70%条件下,蠕变断裂时间有一定的差异,因此可以合理猜测在相同比例的载荷条件下,即使绳带的层数存在差异,但是绳带的蠕变行为具有相似性。

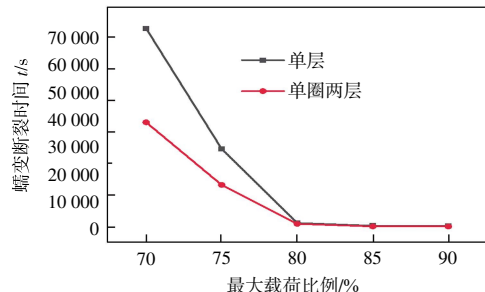


图 5 载荷-蠕变断裂时间

Fig.5 Relationship of load-creep break time

为进一步分析绳带不同层数的绳带的蠕变性能,参考简化后的 K 模型^[13],绘制单层与单圈两层的载荷-时间自然对数曲线,并对曲线进行拟合,如图 6 所示。

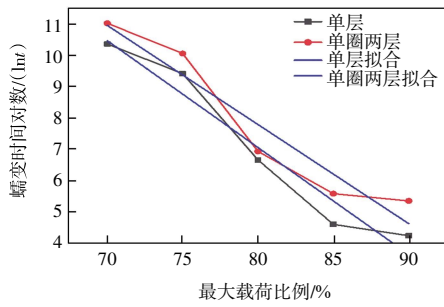


图 6 载荷-时间自然对数拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of load-time natural logarithmic

对拟合结果进行整理,得到单层与单圈两层的模拟方程分别为式(3)和式(4):

$$\ln t = 33.65 - 0.33\sigma \quad R^2 = 0.95 \quad (3)$$

$$\ln t = 32.45 - 0.31\sigma \quad R^2 = 0.92 \quad (4)$$

式中: σ 为绳带承受的拉力。从图 6 中可以观察到,拟合方程的斜率相近,而截距相差不大,根据上文对蠕变断裂的分析可以推测,斜率与纤维自身性能相关,而截距与层数相关。与简化后的 K 模型进行对比可知,在高载荷状态下,两者取自然对数,更加符合实际情况。

2.3 冲击性能

绳带冲击过程如图 7 所示。

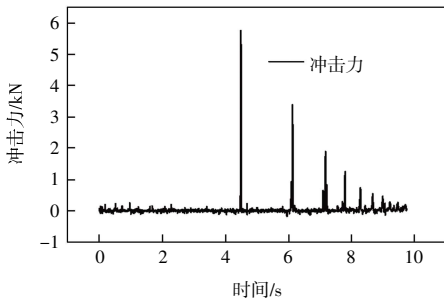


图 7 绳带冲击曲线

Fig.7 Impact curve of tape belt

由图 7 可以观察到,绳带在经历最大冲击力之后还会继续承受数次较小的冲击力,同时冲击力是逐渐衰弱的,这是因为在冲击过程中存在空气阻力,并且芳纶绳带存在一定的弹性^[4]。当绳带到达最低点时,一部分重力势能会被绳带吸收,造成绳带内部结构的损伤,但未完全破坏;另一部分重力势能转化为绳带的弹性势能,使得重物上升至一定的高度,从而对绳带进行第 2 次冲击,如此反复,直至能量完全被绳带消耗。

绳带冲击次数与重物质量有直接关系,统计出在不同载荷下绳带所能承受的最大冲击次数,结果如表 1 所示。由表 1 可见,随着载荷的增加冲击次数逐渐减

少,这与实际情况相符,为绳带在实际中的使用提供理论基础。

表 1 不同载荷下绳带的最大冲击次数

Tab.1 Maximum impact counts of tape belt under different loads

绳带规格	载荷比例/%				
	70	75	80	85	90
单层	20	16	11	9	5
单圈两层	21	17	13	10	5

观察表 1,绳带的冲击次数与载荷之间存在函数关系,对此,绘制载荷与冲击次数之间的曲线,并对曲线进行拟合,如图 8 所示。

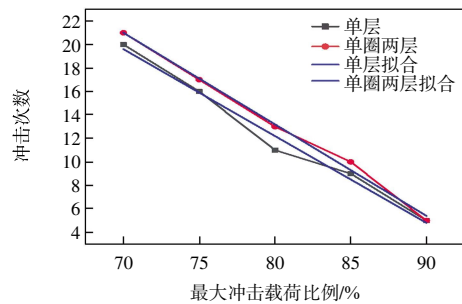


图 8 载荷-冲击次数拟合曲线

Fig.8 Fitting curves of load-impact counts

对拟合数据进行整理,得到单层与单圈两层的拟合方程分别如式(5)和式(6):

$$n = 71.4 - 0.74\sigma \quad R^2 = 0.98 \quad (5)$$

$$n = 75.6 - 0.78\sigma \quad R^2 = 0.99 \quad (6)$$

式中: n 为冲击次数。由图 8 和式(5)、式(6)可以观察到,单层与单圈两层拟合直线的截距与斜率相差不大,同时拟合直线的 R^2 均大于 0.98,表明数据具有极大的可信度^[15]。由此可见,在高载荷状态下,绳带的冲击次数与载荷成正比,绳带的层数对其影响不大。

2.4 蠕变与冲击的关系

从上述实验中,得到了不同层数下绳带的蠕变断裂时间与载荷的拟合方程以及冲击次数与载荷的拟合方程,观察 2 组方程可以发现,绳带在相同层数并且施加载荷比例一致条件下,冲击拟合方程的截距与斜率均接近蠕变断裂时间拟合方程的 2 倍,对此,以样品承受的载荷为连接点,得到蠕变断裂时间与冲击次数的方程。对 2 组方程进行分析得到冲击次数与蠕变断裂时间之间的拟合方程:

单层:

$$\ln t = 0.45n - 1.81 \quad (7)$$

单圈两层:

$$\ln t = 0.40n - 2.60 \quad (8)$$

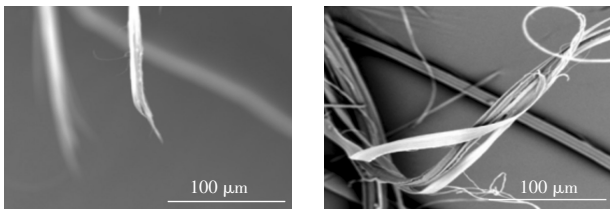
通过以上 2 组方程,进而推测蠕变断裂时间对数与冲击次数之前的通式为:

$$\ln t = An - B \quad (9)$$

式中: A 和 B 为材料常数。在高载荷的条件下,通过冲击次数可以预测芳纶绳带的蠕变断裂时间,接着对蠕变断裂以及冲击断裂后的绳带进行结构的测试,从而判断两者对绳带的破坏状态。

2.5 绳带结构与性能分析

使用电子显微镜观察通过蠕变断裂以及冲击断裂的芳纶减速伞绳,如图 9 所示。由图 9 观察到两者结构上的微观变化,蠕变断裂与冲击断裂后纤维被拉伸,明显在端口处出现撕裂的现象,并且纤维的伸长量也不尽相同,形态不再规整,断口处截面不规则,纤维出现四处发散趋势。这说明不同方式产生的拉力对于芳纶带纤维的断裂形貌有着极大的影响^[16-17]。



(a) 绳带蠕变断裂截面 (b) 绳带冲击断裂截面

图 9 芳纶绳带断口

Fig.9 Fracture of aramid tape belt

为了进一步了解绳带微观结构的变化,使用声速取向法测量蠕变断裂以及冲击断裂后的芳纶减速伞绳,测试减速伞绳的取向度变化^[18],结果如图 10 所示。

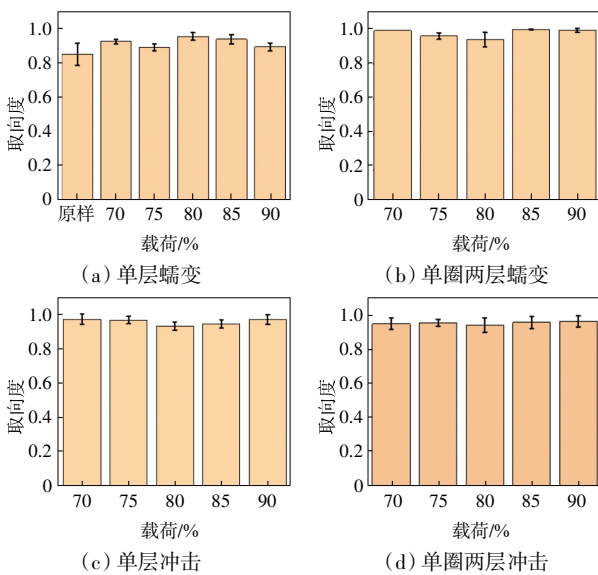


图 10 不同样品承受多种重冲击条件后的取向度

Fig.10 Orientation degree of different samples after being subjected to various heavy impact conditions

由图 10 可以观察到纤维原样的取向度为 0.86,而

经不同载荷(断裂强力分别为 70%、75%、80%、85%及 90%)条件下蠕变断裂后的芳纶减速伞绳纤维样品取向度普遍高于未进行拉伸蠕变的芳纶减速伞绳原丝,同时经蠕变拉伸后,样品取向度趋于一个固定值为 0.95,单层与单圈两层的取向度相差不大,说明当绳带发生断裂时,取向度具有统一性^[9]。而冲击断裂后的芳纶减速伞绳与蠕变伞绳类似,伞绳在经历冲击后,取向度与原样相比,由原来的 0.86 提升到 0.98,均有较大的提升,说明绳带短时间的冲击与长时间的蠕变拉伸都使得伞绳在纵向的排列更加紧密,两者的作用效果相似。

长时间拉伸后的蠕变会造成纤维结晶度的变化,为确定纤维的结晶度的变化,对不同条件下断裂的绳带进行 XRD 的测试,结果如图 11 所示。对各组进行分峰拟合,其中芳纶绳带原样的结晶度为 66.43%,其他条件下的结晶度如表 2 所示。

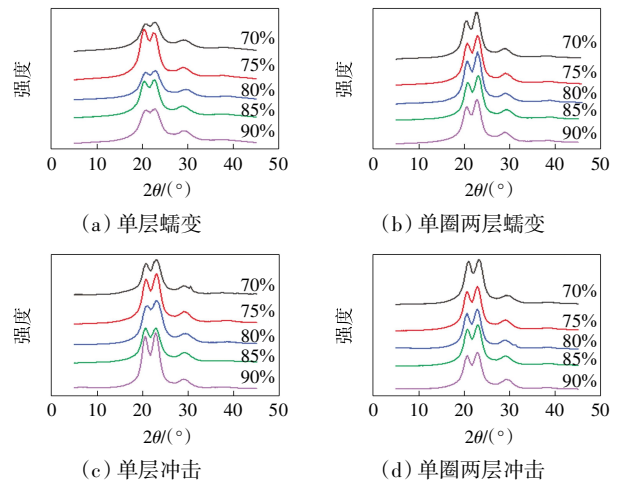


图 11 不同条件下断裂后绳带的 XRD

Fig.11 XRD of tape belt after fracture under different conditions

表 2 不同载荷下绳带的结晶度

Tab.2 Crystallinity of tape belt under different loads

绳带规格	载荷比例/%				
	70	75	80	85	90
单层蠕变	87.42	83.07	88.26	81.92	89.89
单圈两层蠕变	86.20	80.88	87.26	81.91	83.46
单层冲击	81.85	84.70	83.68	85.14	82.51
单圈两层冲击	84.73	85.14	85.60	88.72	86.08

由图 11 和表 2 不难观察到,与原样相比,蠕变断裂与冲击断裂后绳带的结晶度都得到提升,结晶度均在 80%,经 2 种方式断裂后绳带的结晶度相差不大,表明经过两者造成的损伤是相似的,这与取向度的结果相对应。由图 10 和图 11 可知,经过蠕变过程或者冲击过程的芳纶绳带内部的结晶度和取向度都比原

绳带要高。绳带在经历蠕变拉伸或者瞬时冲击时,受到纵向的拉力,导致该方向上的高分子链段进一步排列,在高取向度的状态下,折叠链结晶变为串晶结构,进而使得绳带的结晶度也得到提升^[20]。绳带在冲击时受到的瞬间冲击力与蠕变时受到的恒定拉力,两者作用形式虽然有所差异,但对绳带的损伤是相似的。

3 结 论

(1) 对绳带数据进行拟合分析,分别得到载荷-蠕变断裂时间对数的拟合方程以及载荷-冲击次数的拟合方程,其中单层和单圈两层绳带的蠕变拟合方程分别为 $\ln t = 33.65 - 0.33\sigma$ 与 $\ln t = 32.45 - 0.31\sigma$, 冲击次数的拟合方程分别是 $n = 71.4 - 0.74\sigma$ 与 $n = 75.6 - 0.78\sigma$,用以预测绳带在高载荷状态下的使用寿命以及绳带在高强度冲击下的使用次数。

(2) 将2组拟合方程进行对比,发现冲击拟合方程的截距与斜率和蠕变拟合方程呈2倍的关系,以载荷为节点,得到蠕变断裂时间对数与冲击次数的关系式 $\ln t = An - B$,对此可以使用冲击次数来预测在高载荷状态下绳带的蠕变使用寿命。

(3) 芳纶绳带在经历蠕变拉伸和瞬时冲击后,结晶度与取向度的变化相似,相同载荷下蠕变和冲击对绳带的损伤效果相同。

参考文献:

[1] 王文才,李楠,杨福江,等.芳纶纤维蠕变性能测试与分析[C]/中国核学会2017年学术年会论文集.北京:中国原子能出版社,2017:25-29.
WANG W C, LI N, YANG F J, et al. Creep performance test and analysis of aramid fibers[C]/2017 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society. Beijing: Atomic Energy Press, 2017: 25-29(in Chinese).

[2] 邹振高,王西亭,施楣梧.芳纶1313纤维技术现状与进展[J].纺织导报,2006(6):49-52,94.
ZOU Z G, WANG X T, SHI M W. Technical development of aramid fiber 1313[J]. China Textile Leader, 2006(6): 49-52, 94(in Chinese).

[3] 王红红,孙润军,吴蓓,等.芳纶Ⅲ的结构与热学性能研究[J].上海纺织科技,2017,45(5):3-7.
WANG H H, SUN R J, WU B, et al. Structure and thermal properties of aramid fiber Ⅲ[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2017, 45(5): 3-7(in Chinese).

[4] 高启源.高性能芳纶纤维的国内外发展现状[J].化纤与纺织技术,2007,36(3):31-36.
GAO Q Y. Current developing situation of high performance aramid fibre at home and abroad[J]. Chemical Fiber & Textile

Technology, 2007, 36(3): 31-36(in Chinese).

[5] 黄碧霞.芳纶织物在超音速伞上应用概况[J].产业用纺织品,1988,6(S1):77-80.
HUANG B X. General situation of application of aramid fabric in supersonic parachute[J]. Technical Textiles, 1988, 6(S1): 77-80(in Chinese).

[6] 孔海娟,张蕊,周建军,等.芳纶纤维的研究现状与进展[J].中国材料进展,2013,32(11):676-684.
KONG H J, ZHANG R, ZHOU J J, et al. The research status and progress of aramid fibers[J]. Materials China, 2013, 32(11): 676-684(in Chinese).

[7] 曾瑶,万茜玥,张典堂,等.芳纶纤维复合材料低速冲击响应实验研究[J].塑料工业,2019,47(11):83-86,97.
ZENG Y, WAN X Y, ZHANG D T, et al. Experimental investigation on low-velocity impact response of aramid fiber composites[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(11): 83-86, 97 (in Chinese).

[8] 刘子甄,金欣,王闻宇,等.基于分子结构设计的高性能聚酰亚胺的研究进展[J].材料导报,2021,35(S2):600-611.
LIU Z Z, JIN X, WANG W Y, et al. Research progress of high performance polyimides based on molecular structure design[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 600-611(in Chinese).

[9] HUANG W, LIU H X, LIAN Y S, et al. Modeling nonlinear creep and recovery behaviors of synthetic fiber ropes for deepwater moorings[J]. Applied Ocean Research, 2013, 39: 113-120.

[10] LIAN Y S, LIU H X, HUANG W, et al. A creep-rupture model of synthetic fiber ropes for deepwater moorings based on thermodynamics[J]. Applied Ocean Research, 2015, 52: 234-244.

[11] ALWIS K G N C, BURGOYNE C J. Accelerated creep testing for aramid fibres using the stepped isothermal method[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(14): 4789-4800.

[12] 崔晓静,孙潜,张华川,等.中国芳纶1414纤维及其复合材料的发展[J].塑料工业,2017,45(9):12-14,23.
CUI X J, SUN Q, ZHANG H C, et al. The development of para-aramid fiber and its composites in China[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(9): 12-14, 23(in Chinese).

[13] KNOESTER H, DEN DECKER P, VAN DEN HEUVEL J, et al. Creep and failure time of aramid yarns subjected to constant load[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2012, 297(6): 559-575.

[14] GIANNOPOULOS I P, BURGOYNE C J. Accelerated and real-time creep and creep-rupture results for aramid fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(5): 3856-3870.

[15] FALLATAH G M, DODDS N, GIBSON A G. Long term creep and stress rupture of aramid fibre[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2007, 36(9): 403-412.

[16] 韩秋红,杨彩云.二维编织芳纶包芯绳的蠕变性能分析[J].
(下转第35页)

- 8-13 (in Chinese).
- [12] LIU X, DANG R, DONG W J, et al. A sandwich-like heterostructure of TiO₂ nanosheets with MIL-100(Fe): A platform for efficient visible-light-driven photocatalysis[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 209: 506-513.
- [13] RAMASUBBU V, RAM KUMAR P, CHELLAPANDI T, et al. Zn(II) porphyrin sensitized (TiO₂@Cd-MOF) nanocomposite aerogel as novel photocatalyst for the effective degradation of methyl orange (MO) dye[J]. Optical Materials, 2022, 132: 112558.
- [14] 阮艳莉, 查煜澄, 张萌. 有机金属框架衍生物的制备及其在锂硫电池隔膜改性中的应用[J]. 天津工业大学学报, 2020, 39(5): 56-60.
RUAN Y L, ZHA Y C, ZHANG M. Preparation of organometallic framework derivatives and its application in separator modification of lithium-sulfur batteries[J]. Journal of Tiangong University, 2020, 39(5): 56-60 (in Chinese).
- [15] 阮艳莉, 王天宇, 顾祥顺. MnO@N-C 双功能氧电极催化剂的制备与电化学性能[J]. 天津工业大学学报, 2022, 41(5): 27-32.
RUAN Y L, WANG T Y, GU X S. Preparation and electrochemical performance of MnO@N-C bifunctional oxygen electrode catalysts[J]. Journal of Tiangong University, 2022, 41(5): 27-32 (in Chinese).
- [16] 周存, 马悦. 氮掺杂二氧化钛的制备及性能[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(4): 30-36.
ZHOU C, MA Y. Preparation and properties of nitrogen doped titanium dioxide[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2019, 38(4): 30-36 (in Chinese).
- [17] HUANG W, LIU W, YANG Z, et al. MIL-88A anchoring on different morphological g-C₃N₄ for enhanced Fenton performance [J]. Microporous Mesoporous Mat, 2022, 329: 111531.
- [18] DU X D, YI X H, WANG P, et al. Enhanced photocatalytic Cr(VI) reduction and diclofenac sodium degradation under simulated sunlight irradiation over MIL-100(Fe)/g-C₃N₄ heterojunctions[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2019, 40(1): 70-79.
- [19] WANG S B, LIN J L, WANG X C. Semiconductor-redox catalysis promoted by metal-organic frameworks for CO₂ reduction[J]. Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 2014, 16(28): 14656-14660.
- [20] WANG R, GU L N, ZHOU J J, et al. Quasi-polymeric metal-organic framework UiO-66/g-C₃N₄ heterojunctions for enhanced photocatalytic hydrogen evolution under visible light irradiation[J]. Advanced Materials Interfaces, 2015, 2(10): 1500037.
- [21] WANG C C, YI X H, WANG P. Powerful combination of MOFs and C₃N₄ for enhanced photocatalytic performance [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 247: 24-48.
- [22] GONG Y, ZHAO X, ZHANG H, et al. MOF-derived nitrogen doped carbon modified g-C₃N₄ heterostructure composite with enhanced photocatalytic activity for bisphenol a degradation with peroxy monosulfate under visible light irradiation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 233: 35-45.

本文引文格式:

李颖,丁竹,聂学童,等. g-C₃N₄@Zn₃O异质催化剂的制备与可见光催化活性[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(4): 30-35.
LI Y, DING Z, ZHU X T, et al. Preparation and visible light photocatalytic activity of g-C₃N₄@Zn₃O heterojunction catalyst[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(4): 30-35 (in Chinese).

(上接第 29 页)

- 产业用纺织品, 2015, 33(6): 25-28.
HAN Q H, YANG C Y. The creep performance analysis of two-dimensional braided aramid fiber cored rope[J]. Technical Textiles, 2015, 33(6): 25-28 (in Chinese).
- [17] 朱德举, 张晓彤, 张怀安. 动态拉伸载荷下应变率和温度对 Kevlar 49 芳纶纤维布增强环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 459-468.
ZHU D J, ZHANG X T, ZHANG H A. Effects of strain rate and temperature on mechanical properties of Kevlar 49 aramid fabric reinforced epoxy polymers under dynamic tensile loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3): 459-468 (in Chinese).
- [18] 钱咸彧, 吴清基, 阮毛娣. 芳纶 1414 无规取向声速值(Cu)的确定[J]. 纺织特品技术, 1985, 3(6): 28-30, 27.
QIAN X Y, WU Q J, RUAN M D. Determination of velocity of sound (Cu) in random orientation of aramid 1414[J]. Technical Textiles, 1985, 3(6): 28-30, 27 (in Chinese).
- [19] 闫荣江. 结晶聚合物的单轴拉伸和取向态结构 I 拉伸结晶聚合物的形变机理[J]. 高分子通报, 1993(4): 230-233.
YAN R J. Structure of crystalline polymers oriented by uniaxially drawing I. deformation mechanism of drawn crystalline polymers[J]. Polymer Bulletin, 1993(4): 230-233 (in Chinese).
- [20] 杨文良, 张长香, 彭涛, 等. 塑化拉伸对芳纶 III 结构性能的影响[J]. 合成纤维, 2016, 45(2): 45-47.
YANG W L, ZHANG C X, PENG T, et al. The influence of plasticizing stretch on the structure and performance of aramid III[J]. Synthetic Fiber in China, 2016, 45(2): 45-47 (in Chinese).

本文引文格式:

宋俊,石宇飞,章琳玲,等. 芳纶编织物在高载荷下的使用寿命预测[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(4): 24-29, 35.
SONG J, SHI Y F, ZHANG L L, et al. Prediction of service life of aramid woven fabric under high load[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(4): 24-29, 35 (in Chinese).