

高性能合成纤维绳索的编织结构优化与力学性能增强机制研究

陈宏 徐元仙

浙江飞豹工贸有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：高性能合成纤维绳索的力学性能与编织结构关联紧密。本文从纤维材料特性出发，系统分析了编绞角、编绞距、纱线张力及绳芯结构对绳索断裂强度、模量、伸长率及疲劳寿命的影响。基于加捻力学理论与纤维束受力模型，建立了编织结构参数与载荷分布均匀性的理论关系，揭示了纤维断裂不同时性与应力集中之间的内在矛盾。研究表明，存在最优编绞角区间，在此区间内纤维受力协同性最佳，强度利用率达到最大。提出了梯度编绞结构设计方案，通过沿绳长方向调控编绞参数实现载荷渐进传递，有效缓解端部应力集中。最终给出了面向不同服役条件的编织结构优化准则，为高性能绳索的工程设计提供了理论依据。

【关键词】：合成纤维绳索；编织结构；编绞角；力学性能；强度利用率

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.034

1 引言

合成纤维绳索自二十世纪中叶逐步替代传统天然纤维绳索以来，凭借其比强度高、耐腐蚀、柔韧性好及重量轻等突出优势，在船舶系泊、深海锚泊、大件吊装、登山救援及电力牵引等众多领域获得广泛应用。超高分子量聚乙烯纤维、芳纶纤维及聚酯纤维等高性能纤维材料的不断涌现，进一步推动绳索产品的性能边界持续拓展。然而，工程实践表明，相同纤维材料在不同编织结构下所呈现的宏观力学性能存在显著差异，纤维自身的高强度特性在绳索制品中往往未能得到充分发挥，纤维强度利用率普遍在百分之六十至百分之八十之间浮动，这意味着约百分之二十至四十的纤维强度在编织成绳过程中被损耗。

造成上述强度损耗的根本原因在于绳索编织结构对各股绳纱之间载荷分配的调控作用。理想条件下，每根纤维应按照其刚度比例承担相应份额的外部载荷，直至所有纤维同步达到断裂极限。但实际状况远非如此，由于编绞过程中引入了螺旋几何形态，各股绳纱以及股绳内部各层纤维的实际受力方向与绳索轴线存在夹角，导致载荷在分解为沿纤维轴向的有效分量和垂直于纤维轴向的挤压分量时产生显著差异。与此同时，在加捻和编织过程中纤维之间存在不同程度的相互挤压与摩擦，这会引入侧向压应力并加剧磨损，从而进一步降低承载能力。加之外部载荷作用下绳索内部应变的非均匀分布特征，使得处于不同径向位置的纤维承受的应变各不相同，当外层纤维达到断裂应变时，内层纤维可能仅承载了其断裂载荷的很小一部分。

上述编织结构与力学性能之间的复杂关系，构成了当前高性能合成纤维绳索设计与制造中的核心科学问题。本文立足于经典纤维力学与绳索编织工艺学的基本理论，试图通过系统的理论分析，阐明编织结构参数影响绳索力学性能的内在机制，并提出结构优化的明确方向，以为高性能绳索的工程设计和制造工艺改进提供有价值的理论指导。

2 绳索编织结构的基本几何模型

高性能合成纤维绳索的编织结构虽品种繁多，但均可抽象为若干股绳围绕绳芯或围绕共同轴线按照一定螺旋角排列的几何构型。螺旋几何的基本描述参数包括编绞角、编绞距、绳纱直径和绳体直径。编绞角定义为股绳轴线与绳索轴线之间的夹角，是决定绳索力学行为最为核心的结构参数。

设绳索半径为 R ，股绳中心距离绳索轴线的距离为 r ，编绞角为 α ，则编绞距 L 与编绞角 α 之间的关系可表述为 L 等于 $2\pi r$ 乘以 $\tan \alpha$ 。从上述关系可以明显看出，编绞角越大，单位绳长内股绳绕行的圈数越多，绳索表现出更高的伸长率和更好的柔顺性。反之编绞角越小，股绳更趋近于平行排列，绳索的轴向刚度更大，断裂强度理论上更高。然而编绞角趋于零时，股绳之间缺乏足够的抱合力，绳索的整体性和抗松散能力将严重下降。因此编绞角的选择实际上是在强度效率与结构稳定性之间进行权衡。

将绳索的宏观应变与股绳中纤维的局部应变建立联系是分析问题的关键环节。当绳索承受轴向拉力时，股绳中纤维的应变等于宏观绳索应变除以编绞角的余弦平方。该几何关系的物理含义相当明确：由于纤维倾斜排列，相同绳索伸长量对应更大的纤维拉伸量，纤维的有效应变被几何放大。相应地，股绳中的纤维张力在绳索轴向的投影分量仅占总张力的余弦 α 倍。综合以上两种效应，外部载荷与纤维张力之间的转换效率由编绞角的余弦平方所决定。当编绞角为二十度时，转换效率约为零点八八。当编绞角增大至三十度时，转换效率下降至零点七五。这意味着在较大编绞角条件下，纤维强度的有效利用率不可避免地降低。

进一步考察绳索内部不同径向位置的应变分布，可以发现更为复杂的规律。处于绳索外层的股绳在受载时具有更大的螺旋半径，其实际长度大于内层股绳，在相同的宏观伸长量下外层股绳的应变增量大于内层。这种径向应变差在绳索受载时导致外层纤维优先承担载荷，形成逐层失效的链式反应。当外层

股绳中的纤维达到断裂伸长率而断裂后,原来由外层承担的载荷瞬间转移到内层,内层纤维在突增载荷下迅速达到断裂条件,整个失效过程在极短时间内完成,宏观表现为脆性断裂。

在绳索承受循环载荷的条件下,股绳之间以及股绳内部纤维之间的相对运动是导致磨损和疲劳破坏的主要因素。编绞角越大,股绳之间的接触压力与摩擦路径长度随之增加,这降低了绳索的疲劳寿命,这与深海系泊等承受长期动载工况的使用需求形成矛盾。同时较大的编绞角使绳索在受载时产生更大的扭转变形,这会引起悬挂重物旋转等工程问题并导致额外风险。基于上述分析可以认为,编绞角的选择既需要满足强度要求,又需要考虑服役条件下的疲劳寿命和结构稳定性,这构成了绳索结构优化的基本矛盾。

3 纤维束受力模型与强度利用率分析

将绳索视为由多根螺旋缠绕的纤维束组成的复合体,是建立受力模型的基本前提。单根纤维沿股绳螺旋线方向排列,外部轴向载荷作用于绳索时,各纤维承受的应力状态并非一致。从力学角度看,纤维所承受的实际应力可分解为轴向拉应力、弯曲应力和接触压应力三个分量。在理想拉伸条件下,弯曲应力和接触压应力所占比例很小,可以忽略不计。但实际编织结构中纤维的螺旋形态决定了弯曲和接触效应不可避免。

纤维断裂准则的确定还需要考虑多轴应力状态的影响。通常采用最大主应力准则或等效冯·米塞斯应力准则进行判断。对于有机高分子纤维材料,其横向抗压强度远低于纵向抗拉强度,当侧向接触压应力超过纤维横向强度时,纤维在未达到轴向断裂载荷前就可能因局部压溃而失效。这种现象在高编绞角绳索中尤为突出。同时纤维之间存在摩擦磨损,在循环载荷条件下,摩擦导致的表面损伤会形成应力集中点,成为疲劳裂纹的萌生位置。

将上述因素综合起来可以建立纤维强度利用率的理论表达式。强度利用率 η 等于绳索宏观断裂强度除以纤维原料强度乘以纤维体积分数的商。理论分析表明, η 由三项因素决定:编绞角效率因子,来源于纤维偏转造成的轴向投影损失;弯曲损伤因子,反映了纤维在编织过程中因弯曲而发生的强度折减;以及载荷不均匀因子,与不同纤维之间的应变分布离散程度相关。

4 编织参数对力学性能的影响规律

不同编织参数对绳索拉伸性能的具体影响已通过大量实验得到了充分验证。在最优编绞角条件下,纤维强度利用率可达到百分之八十五以上。这一编绞角通常是二十度至三十度区间的某个中间值。

编绞距本身由编绞角与绳体直径共同确定。对于给定绳索直径,编绞距越小意味着编绞角越大。编绞距的调整实际上是改变股绳绕行的螺距。较小的编绞距导致股绳更紧密地缠绕,

绳索的柔顺性提高但强度下降。较大的编绞距有利于提高轴向刚度但绳索的抗松散能力降低。

纱线张力是另一个影响绳索力学性能的关键工艺参数。在编织过程中,各股绳之间的张力应当尽量保持一致。张力不均会导致绳索在受载初期即出现载荷分布失衡,部分股绳过早承担了超出其比例的载荷并提前断裂,随后剩余股绳因载荷突增而发生连锁断裂。这种逐根失效模式严重降低了绳索的整体强度。研究数据表明,张力偏差控制在百分之五以内时,绳索断裂强度的离散系数最小,表现出最优的可靠性。

绳芯结构对于多层编织绳索的性能影响更为复杂。有绳芯结构的绳索在受载初期绳芯与外层股绳的应变协调性直接影响整体的载荷分担。如果绳芯的模量低于外层股绳,绳芯所承担的载荷比例较小,主要起到支撑和定位外层股绳的作用。如果绳芯的模量与股绳模量相当,则绳芯本身就参与了主要承载。后一种情况对于提高绳索的断裂强度较为有利,但对绳芯材料的质量和均匀性提出了较高要求。

5 梯度编绞结构的设计原理

传统的均匀编织结构沿绳长方向保持编绞角和编绞距恒定。这种结构存在一处固有弱点:绳索与连接件接触的区域或绳扣弯曲部位存在显著的应力集中,局部应力峰值往往达到平均应力的数倍。在循环载荷条件下,端部应力集中是导致绳索过早失效的主要因素之一。

本文提出梯度编绞结构的基本构想是在绳索的不同区段采用不同的编绞参数。具体而言,绳索端部连接区采用较小的编绞角,使股绳更贴近轴向排列,该部位刚度较高且轴向承载效率高,适合承受连接件产生的局部高应力。绳索中段主体区域采用最优编绞角,兼顾强度与柔顺性的综合平衡。从端部到主体的过渡区域采用渐变的编绞角,以避免因结构突变造成的应力集中。

梯度编绞结构的力学优势体现在载荷传递的渐进性上。端部小编绞角区域具有较高的轴向刚度,能够将外部载荷迅速引入绳索内部并均匀扩散至各股绳。随着进入过渡区域,编绞角逐步增大,载荷以渐进方式从外层股绳传递至内层纤维,避免了在单一截面上产生过大的应力梯度。这种设计理念与复合材料中的模量渐变设计异曲同工,最终目标都是实现载荷在各承载单元之间的均衡分配。

梯度编绞结构的实现需要解决工艺上的若干技术问题。变编绞角编织要求编绞设备的编绞点位置能够在绳索行进过程中动态调整,这对现有编织设备的控制系统提出了升级要求。但考虑到高性能绳索的高附加值特性,这种工艺调整所带来的成本增加相对于性能提升而言是可以接受的。

6 面向不同服役条件的结构优化策略

不同工程领域对绳索力学性能的侧重各不相同,因此并不

存在一种普适最优的编织结构。结构优化应当以服役工况为导向，有针对性地选择编织参数组合。

对于静态吊装和系泊工况，载荷以恒定静载为主，疲劳不是主要失效模式。在此类工况下，结构优化的重点应放在获得最大断裂强度上。建议采用较小编绞角即约二十度至二十二度以及较高编绞质量，同时严格控制纱线张力一致性。绳芯结构宜采用模量匹配设计，使绳芯参与主要承载。

对于深海系泊和拖曳等承受长期动载的工况，疲劳寿命是首要关注指标。在此类工况下，应优先考虑减小股绳之间的摩擦和磨损。建议采用较大编绞角即约二十八度至三十度以改善绳索的柔顺性和弯曲疲劳性能，同时采用润滑处理以减少摩擦系数。绳索端部应采用梯度编绞结构以缓解应力集中。

对于起重吊装等对绳索伸长率有严格限制的工况，结构优化应以高模量为目标。建议采用较小的编绞角即十六度至十八度甚至更小，但必须配合端部固结加强措施以防止松散。纤维材料方面宜选择高模量品种，超高分子量聚乙烯纤维是较优选择。

对于消防救援和登山等以轻量化和便携性为首要要求的工况，绳索的柔顺性和卷绕性能尤为重要。建议采用无绳芯的

多股编织结构，适当增大编绞角至三十二度以上以保证良好的弯曲性能，但需接受一定程度的断裂强度损失。

7 结论

高性能合成纤维绳索的编织结构对其宏观力学性能具有决定性的影响，这种影响通过编绞角、编绞距、纱线张力及绳芯结构等参数的综合作用得以实现。纤维在螺旋排列下的几何偏转效应和应力不均匀分布是导致纤维强度利用率无法达到百分之百的根本原因，而最优编绞角的存在则是强度效率与结构稳定性之间权衡的结果。

梯度编绞结构作为一种新型设计思路，通过沿绳长方向调制编织参数实现了载荷的渐进传递，在改善端部应力集中方面展现出显著潜力。面向不同服役条件的结构优化策略进一步表明，绳索设计应当遵循工况导向的原则，在断裂强度、疲劳寿命、轴向刚度和柔顺性等多重指标之间寻求合理平衡。

本文的理论分析为高性能合成纤维绳索的工程设计和制造工艺改进提供了较为系统的理论框架和量化依据。后续研究可进一步将理论模型推广至三维编织结构和异形截面绳索，并探索编织工艺参数在线监测与自适应控制技术，从而推动高性能绳索制造技术向更加精确可控的方向发展。

参考文献：

- [1] 董春晖,徐青华,孙颖,等.聚芳酯纤维编织绳的拉伸性能[J].上海纺织科技,2022,50(3):15-18.
- [2] 江璇,王龙生,黄华云,等.编织角及防污涂层对芳纶编织绳拉伸性能的影响研究[J].产业用纺织品,2023,41(4):33-40.
- [3] 黄伟,丁金友,陈功林,等.超高分子量聚乙烯纤维制备技术研究进展[J].塑料科技,2025,53(3):161-167.
- [4] 李磊.农用复合绳编制及其耐候性分析[D].塔里木大学,2024.
- [5] 孔磊,王连超.Vectran 纤维系留缆绳强度失效分析[J].合成纤维工业,2023,46(2):84-88.