

弯曲直径对高模量聚乙烯纤维绳 吊索断裂强力的影响

侯兵兵 李航宇 李彦希

浙江四兄绳业有限公司, 浙江 台州 317016

摘要:针对高模量聚乙烯(HMPE)纤维绳吊索在不同弯曲比(D/d)下的强力损失问题,以公称直径 24 mm、12 股结构的 HMPE 纤维绳为对象,制备单肢和环形吊索,开展直拉式与吊篮式提升试验,系统分析不同弯曲比对吊索断裂强力的影响。结果表明:单肢吊索吊篮式提升时,强力保持率随吊起处弯曲比($D_{\text{吊}}/d$)增大,呈幂函数增长,抗弯曲性能显著优于钢丝绳;环形吊索直拉式提升时,强力保持率随端部弯曲比($D_{\text{端}}/d$)增大而增加并趋于稳定;环形吊索吊篮式提升时,其断裂强力由直拉式断裂强力与弯曲位置的强力保持率共同决定。单肢与环形吊索吊篮式提升时的强力保持率差异随 $D_{\text{吊}}/d$ 比增大可达 10% 以上,二者的强力保持率与 $D_{\text{吊}}/d$ 比的幂函数拟合相关系数 R^2 均超过 0.900。研究揭示了 HMPE 纤维绳吊索结构形式对断裂强力的影响机制,研究结果可为工程设计中吊索选型及弯曲强力计算提供量化依据,修正了 ISO 标准中统一折减计算的局限性。

关键词: HMPE 纤维绳吊索; D/d 比; 弯曲强力; 环形吊索; 单肢吊索; 吊篮式提升; 直拉式提升; 强力保持率

中图分类号: TS 15

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)02-0028-07

Influence of bending diameters on the breaking strength of HMPE fiber rope slings

Hou Bingbing, Li Hangyu, Li Yanxi

Zhejiang Four Brothers Rope Co., Ltd., Taizhou 317016, Zhejiang, China

Abstract: In view of the problem of strength loss of high modulus polyethylene (HMPE) fiber rope slings under different bend ratio (D/d), taking the HMPE fiber rope slings with a nominal diameter of 24 mm and a 12-strand structure as the object, prepared single-leg and grommet slings, and conducted vertical hitch and basket hitch tests. The influence of different bend ratios on the breaking strength of slings were systematically analyzed. The results showed that when single-leg sling basket hitch, the strength retention rate increased in a power-function with the increase of lifting point bend ratio (D_{bend}/d), and its bending resistance was significantly better than that of steel wire ropes. When the grommet sling vertical hitch, the strength retention rate increased and tended to be stable with the increase of end bend ratio (D_{end}/d). When the grommet sling basket hitch, its bending strength was jointly determined by the vertical pulling breaking strength and the strength retention

收稿日期: 2025-08-09

作者简介: 侯兵兵, 男, 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要从事高性能纤维绳索的设计和开发, bingbing.hou@fbrope.com

rate at the bending position. The difference in the strength retention rate between the single-leg and grommet slings during basket-hitch lifting could reach more than 10% with the increase of D_{bend}/d ratio, and the correlation coefficients of power-function fitting between their strength retention rates and D_{bend}/d ratio were all above 0.900. This study revealed the influence mechanism of the structure type of HMPE fiber slings on the breaking strength. The results can provide a quantitative basis for sling selection, and bending strength calculation in engineering design, and corrected the limitation of unified reduction calculation in the ISO standard.

Keywords: HMPE fiber rope sling; D/d ratio; bending strength; grommet sling; single-leg sling; basket hitch; vertical hitch; strength retention rate

在船舶、港口、海陆运输、矿山、铁路桥梁以及航空航天等众多领域的吊装作业中,钢丝绳吊索长期以来占据着重要地位。然而,其存在诸多不可忽视的缺点,如因其自身质量较大,安装操作不便,在拆卸时也需要耗费大量人力物力^[1-2]。尤其是当钢丝绳吊索的长度较大时,其必须克服自身质量,这会导致钢丝绳承载效率降低,难以充分发挥额定载荷能力,影响吊装作业的效率与安全。

相比之下,高模量聚乙烯纤维绳吊索(HMPE吊索)在工程吊装作业中展现出独特的优势。它具有高强、轻质的特点,相同断裂强力下其质量仅为钢丝绳的 $1/7$ ^[3-6],同时具有质地柔软、表面光滑、无毛刺的优势,操作安全便捷,能够有效避免损伤设备及其表面油漆,减少操作时间,是吊装作业的理想材料^[7]。

不论是钢丝绳吊索还是纤维绳吊索,弯曲状态下断裂强力均可能下降。主要原因是吊索弯曲时,弯曲位置的内外侧应力分布不均匀,弯曲会导致结构变形,纤维协同受力能力下降。

实际应用中,起重设备吊钩、卸扣、吊环等金属连接件直径(D)与吊索公称直径(d)的比,即弯曲比(D/d)是影响吊索断裂强力的关键因素。对于钢丝绳吊索,在不同弯曲比下的断裂强力损失已经有了相对明确的折减计算方法^[8-9]。然而,对于HMPE吊索而言,由于其具有更大的柔性,行业普遍认为在相同弯曲比下,其断裂强力损失应小于钢丝绳,但目前不同机构对于HMPE吊索在弯曲时断裂强力损失的计算存在较大差异。例如,挪威船级社(DNV)明确提出^[8],环形HMPE吊索直拉时的断裂强力应基于实际的弯曲比,而吊篮式提升的断裂强力损失则依照制造商的规定;国际海事承包商协会(IMCA)认为^[9],HMPE吊索的断裂强力损失取决

于吊索的结构,且不同吊索制造商的规定也可能不同;ISO 18264标准提出^[10],不同弯曲比下HMPE吊索的断裂强力损失折减系数可与钢丝绳相同;而TB/T 3123标准则提出^[11],HMPE吊索的断裂强力在吊篮式提升时不需要考虑折减。不同的标准使用户在进行吊索设计和作业时,无法选择合适、统一的折减计算方法进行评判。因此,系统研究HMPE吊索在不同弯曲比下的强力保持率具有重要的现实意义。

本文将聚焦HMPE吊索在吊装时断裂强力折减计算方法,深入探究不同弯曲比对单肢和环形HMPE吊索在直拉式和吊篮式提升下的断裂强力的影响,特别是单肢和环形HMPE吊索在采用吊篮式提升时断裂强力的变化,旨在为未来吊索的设计及现场使用提供有力的参考和可靠的数据支撑。

1 试验

1.1 测试样品

HMPE吊索样品的公称直径为24 mm,结构为12股。单肢和环形样品如图1所示,长度约为5.5 m,所有测试样品均由浙江四兄绳业有限公司生产制造。

1.2 方案设计

单肢HMPE吊索采用直拉式提升时[图2a)],其端部连接件直径 $D_{\text{端}}$ 与 d 的比值应不小于1。

单肢HMPE吊索吊篮式提升时[图2b)], $D_{\text{端}}/d$ 比应不小于1,吊起处弯曲连接件直径 $D_{\text{弯}}$ 与 $D_{\text{弯}}/d$ 比试验参数如表1所示。

环形HMPE吊索采用直拉式提升时[图2c)],影响吊索断裂强力的因素主要是 $D_{\text{端}}$,试验参数如表2所示。

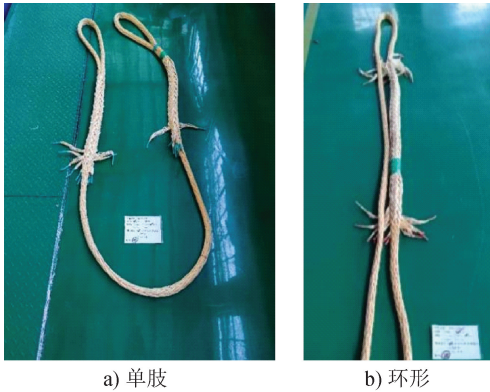


图1 HMPE吊索实物图

Fig. 1 Photos of the HMPE sling samples

环形 HMPE 吊索采用吊篮式提升时[图 2d)], 影响吊索断裂强力的因素有 2 个, 即 $D_{端}$ 和 $D_{弯}$, 试验参数如表 3 所示。

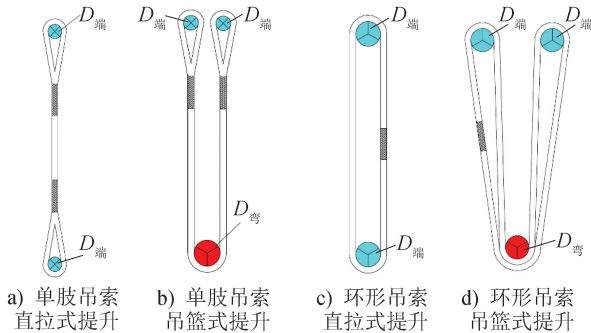


图2 样品测试示意

Fig. 2 Samples test schematic

表1 单肢吊索直拉式和吊篮式提升试验参数

Tab. 1 Test parameter for single-leg sling vertical hitch and basket hitch

序号	吊索形式	d/mm	$D_{弯}/mm$	$D_{弯}/d$	$D_{端}/mm$	样品数量/根
S00	单肢	24	—	—	150	2
S01	单肢	24	32	1.33	150	2
S02	单肢	24	48	2.00	150	2
S03	单肢	24	72	3.00	150	2
S04	单肢	24	120	5.00	150	2
S05	单肢	24	150	6.25	150	2
S06	单肢	24	200	8.33	150	2
S07	单肢	24	240	10.00	150	2

1.3 试验方法

所有试验均在浙江四兄绳业有限公司进行。采用的试验设备为 300 t 卧式拉力试验机, 销柱直径为 150 mm, 设备长度约为 20 m, 油缸行程为 3 m, 负荷

表2 环形吊索直拉式提升试验参数

Tab. 2 Test parameters for grommet sling vertical hitch

序号	吊索形式	d/mm	$D_{端}/mm$	$D_{端}/d$	样品数量/根
H01	环形	24	32	1.33	2
H02	环形	24	48	2.00	2
H03	环形	24	72	3.00	2
H04	环形	24	150	6.25	2
H05	环形	24	200	8.33	2
H06	环形	24	240	10.00	2

表3 环形吊索吊篮式提升试验参数

Tab. 3 Test parameters for grommet sling basket hitch

序号	吊索形式	$D_{端}/mm$	d/mm	$D_{端}/d$	$D_{弯}/mm$	$D_{弯}/d$	样品数量/根
G01	环形	72	24	3.00	32	1.33	2
G02	环形	72	24	3.00	48	2.00	2
G03	环形	72	24	3.00	150	6.25	2
G04	环形	72	24	3.00	200	8.30	2
G05	环形	72	24	3.00	240	10.00	2
G06	环形	150	24	6.25	32	1.33	2
G07	环形	150	24	6.25	48	2.00	2
G08	环形	150	24	6.25	150	6.25	2

误差为 0.5%。配套辅助销柱直径有 32、48、72、120、200 和 240 mm 共 6 种规格, 用于改变吊索端部或吊起处弯曲连接件直径。依据 ISO 2307:2019 标准对单肢和环形 HMPE 吊索进行直拉式断裂强力测试, 其中两端销柱直径按照表 1 和表 2 要求配置。

对于吊篮式提升的断裂强力的测试, 具体试验步骤如下: 首先如图 3 所示, 将吊索安装至 300 t 卧式拉力试验机上, 其中两端销柱直径配置按照表 1 和表 3 中 $D_{端}$ 要求; 随后将设备加载至预加张力 ($F_p = 1.25d^2, N$) 状态, 以 100 mm/min 的拉伸速率拉伸至 10% 最低断裂强力 (minimum break strength, MBS) 后将负荷降至预加张力状态, 并循环 3 次; 接着保持该拉伸速率, 从预加张力拉伸至 50% MBS; 之后将负荷降至预加张力状态保载 1 min, 但不超过 2 min; 最后按照上述拉伸速率将吊索拉伸至断裂, 记录吊索断裂强力及断裂位置。

1.4 测试指标

单肢 HMPE 吊索吊篮式提升的强力保持率 ($S_{SB}, \%$) 按照式 (1) 进行计算。

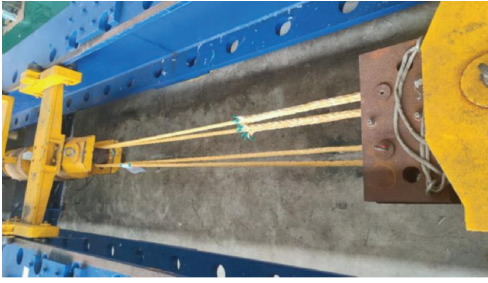


图 3 环形吊索吊篮式提升测试
Fig. 3 Grommet sling basket hitch test

$$S_{SB} = \frac{F_{SB}}{2 \times F_{SS}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： F_{SB} 为单肢吊索吊篮式提升时的断裂强力，kN； F_{SS} 为当 $D_{端}/d \geq 1.00$ 时，单肢吊索直拉式提升时的断裂强力，kN。

环形 HMPE 吊索直拉式提升的强力保持率 (S_{GS} , %) 按照式(2)进行计算。

$$S_{GS} = \frac{F_{GS}}{F_{GS3}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： F_{GS} 为环形吊索直拉式提升时的断裂强力，kN； F_{GS3} 为当 $D_{端}/d=3.00$ 时，环形吊索直拉式提升时的断裂强力，kN。

环形 HMPE 吊索吊篮式提升的强力保持率 (S_{GB} , %) 按照式(3)进行计算。

$$S_{GB} = \frac{F_{GB}}{2 \times F_{GS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： F_{GB} 为环形吊索采用吊篮式提升时的断裂强力，kN。

2 结果与讨论

2.1 单肢 HMPE 吊索吊篮式提升的强力保持率

单肢 HMPE 吊索吊篮式提升时，不同 $D_{端}/d$ 比下的强力保持率，如图 4 所示。图 4 表明，随着 $D_{端}/d$ 比的不断增加，吊索的强力保持率呈现明显的上升趋势。当 $D_{端}/d \geq 8.00$ 时，吊索强力保持率能够达到 90% 左右，并开始趋于平缓。

将 HMPE 吊索和钢丝绳模型^[8]的强力保持率进行比较，可以发现 2 种材料在采用吊篮式提升时的强力保持率变化趋势具有一定的相似性。然而，在相同的 $D_{端}/d$ 比条件下，HMPE 吊索的强力保持率明显优于钢丝绳，表现为更好的抗弯曲特

性。这一优势使得 HMPE 吊索在重型吊装作业中具有更大的应用潜力，其为实际工程中选择单肢吊索提供了重要的参考。在设计和使用时，应充分考虑 $D_{端}/d$ 比对强力保持率的影响，以确保吊装作业的安全和高效。

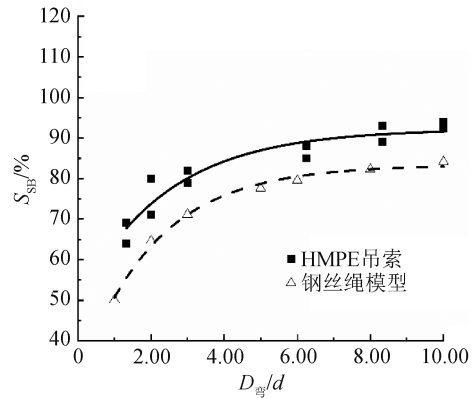


图 4 单肢吊索吊篮式提升的强力保持率
Fig. 4 Strength retention rate of single-leg sling basket hitch

2.2 环形 HMPE 吊索直拉式提升的强力保持率

实际应用中，通常将 $D_{端}/d = 3.00$ 时环形 HMPE 吊索直拉式提升的断裂强力作为计算强力保持率的基准值。环形 HMPE 吊索在不同 $D_{端}/d$ 比下直拉式提升的强力保持率如图 5 所示。图 5 表明，随着 $D_{端}/d$ 比的增加，环形 HMPE 吊索强力逐渐增加，当 $D_{端}/d$ 比达到 6.00 及以上时，环形 HMPE 吊索强力保持率在 120% 左右，且增加逐渐趋于平缓。

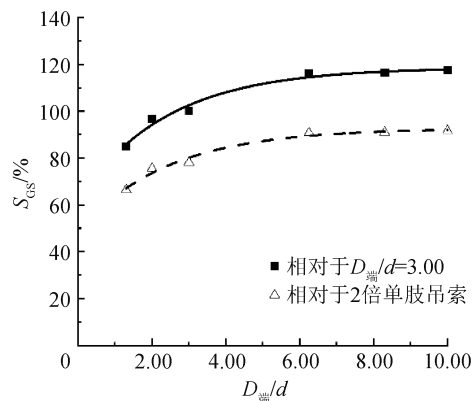


图 5 环形吊索直拉式提升的强力保持率
Fig. 5 Strength retention rate of grommet sling basket hitch

理论上，环形吊索的最大拉力值为 2 根同直径的单肢吊索断裂强力之和。进一步分析环形吊索的

强力相对于 2 倍单肢吊索的强力保持率(图 5)可以发现,环形吊索断裂强力虽然随着 $D_{\text{端}}/d$ 比的增加而上升,但最大强力保持率仅约为 90%。这一现象充分表明,吊索断裂强力并不会随着 $D_{\text{端}}/d$ 比的增大而持续增加,而是存在一个相对稳定的上限。这一结论对于环形吊索在实际工程中应用具有一定的指导意义。设计和选择环形吊索时,需要综合考虑 $D_{\text{端}}/d$ 比,以达到最佳的使用效果并确保吊装作业的安全性。

2.3 环形 HMPE 吊索吊篮式提升的强力保持率

在重型吊装作业中,环形 HMPE 吊索采用吊篮式提升的情况较为常见。环形 HMPE 吊索吊篮式提升的强力保持率主要取决于 $D_{\text{弯}}$ 和 $D_{\text{端}}$ 这 2 个关键影响因素,因此,深入研究不同位置弯曲直径对吊索断裂强力的影响具有重要的现实意义。

当 $D_{\text{端}}/d=3.00$ 时,不同 $D_{\text{弯}}/d$ 比下环形 HMPE 吊索采用吊篮式提升时的强力保持率如图 6 所示。可以发现,随着 $D_{\text{弯}}/d$ 比的增加,环形吊索的强力保持率呈现上升趋势。当 $D_{\text{弯}}/d \geq 8.00$ 时,环形吊索的强力保持率基本可以达到 100%,此时断裂强力基本不发生折减。研究结果表明,在环形 HMPE 吊索吊篮式提升的过程中,适当增大 $D_{\text{弯}}$ 可以有效提高吊索的断裂强力。

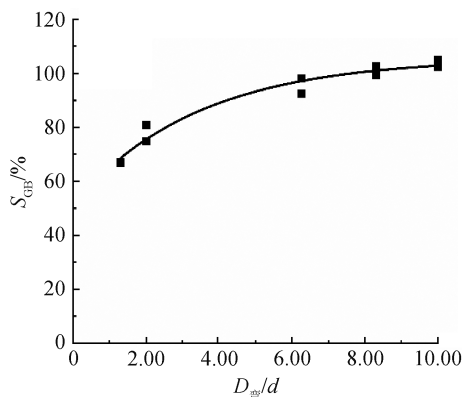


图 6 环形吊索吊篮式提升的强力保持率

Fig. 6 Strength retention rate of grommet sling basket hitch

进一步对比分析环形 HMPE 吊索在 $D_{\text{端}}/d=6.25$ 和 3.00 时吊篮式提升的强力保持率(图 7),可以发现两段曲线基本吻合。研究结果表明,环形 HMPE 吊索吊篮式提升的断裂强力由环形 HMPE 吊索直拉式断裂强力以及弯曲位置的强力保持率共同决定。这一规律为环形 HMPE 吊索在

吊篮式提升过程中断裂强力的评估提供了有效参考方案,有助于提高工程设计和现场使用的准确性和可靠性。

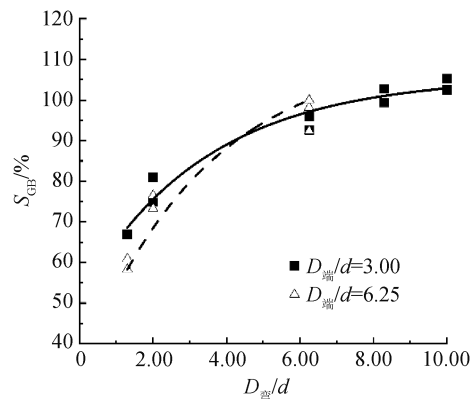


图 7 2 种 $D_{\text{端}}/d$ 比下,环形吊索吊篮式提升时的强力保持率

Fig. 7 Strength of grommet sling basket hitch under two $D_{\text{端}}/d$

2.4 单肢和环形吊索吊篮式提升的强力保持率比较

如图 8 所示,将单肢和环形吊索吊篮式提升的强力保持率变化曲线进行对比,可以发现:当 $D_{\text{弯}}/d \leq 3.00$ 时,2 种吊索的强力保持率差异较小;然而,当 $D_{\text{弯}}/d > 3.00$ 时,强力保持率的差异性逐渐增大,甚至可以达到 10% 以上,这与 ISO 18264:2022 标准中提出的单肢和环形吊索吊篮式提升的强力保持率相同的说法相矛盾。因此,在工程应用中,单肢和环形吊索吊篮式提升的强力保持率不能简单地采用同一折减方法。工程人员进行吊索设计时,需要根据具体的吊索结构和使用条件,选择合适的折减方法和设计参数,以确保吊装作业的安全性和可靠性。

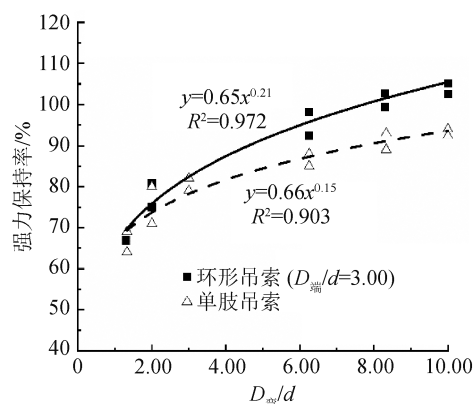


图 8 2 种形式吊索吊篮式提升的强力保持率

Fig. 8 Strength retention rate of two types of sling basket hitch

利用 Origin 软件对试验数据进行拟合分析,结果如表 4 所示,表明单肢和环形吊索的强力保持率与 $D_{\text{弯}}/d$ 比呈幂函数关系,相关系数 R^2 均在 0.900 以上,拟合度良好,这一规律与钢丝绳的情况一致。

表 4 2 种形式吊索吊篮式提升的强力保持率拟合分析
Tab.4 Fitting analysis of strength retention rate of two types of sling basket hitch

吊索形式	强力保持率拟合方程
单肢吊索	$S_{\text{SB}}=0.66 \times (D_{\text{弯}}/d)^{0.15}, R^2=0.903$
环形吊索	$S_{\text{GB}}=0.65 \times (D_{\text{弯}}/d)^{0.21}, R^2=0.972$

3 结论

本文系统地探究了不同弯曲比对 HMPE 吊索断裂强力的影响,得出以下结论:

(1)单肢吊索吊篮式提升时, $D_{\text{弯}}/d$ 比值的增大有助于提高强力保持率。当 $D_{\text{弯}}/d \geq 8.00$ 时,强力保持率可达 90% 左右。与钢丝绳模型^[8]相比, HMPE 吊索在相同 $D_{\text{弯}}/d$ 比下采用吊篮式提升展现出更好的抗弯曲特性,这为重型吊装作业中选择单肢吊索提供了重要参考。

(2)环形吊索直拉式提升时,随着 $D_{\text{端}}/d$ 比增加,强力逐渐上升。当 $D_{\text{端}}/d$ 比达到 6.00 及以上时,强力保持率在较高水平且趋于稳定,这表明在实际应用中,适当增大端部连接件直径可有效提升环形吊索直拉式提升的断裂强力,但存在上限。

(3)环形吊索吊篮式提升时, $D_{\text{弯}}/d$ 比和 $D_{\text{端}}/d$ 比均对断裂强力产生影响。 $D_{\text{弯}}/d$ 比增加会使强力保持率上升。当 $D_{\text{弯}}/d \geq 8.00$ 时,强力保持率基本可达 100%。同时,对比不同弯曲情况发现,环形吊索吊篮式提升的断裂强力是由环形吊索直拉式提升的断裂强力及弯曲位置的强力保持率共同决定的。

(4)综合单肢和环形吊索吊篮式提升的研究结果发现,两者强力保持率随 $D_{\text{弯}}/d$ 比值变化存在差异,尤其是当 $D_{\text{弯}}/d > 3.00$ 后,差异可达 10% 以上,因此在工程应用中断裂强力计算不能简单采用同一折减方法。通过数据拟合发现,单肢和环

形吊索吊篮式提升的强力保持率与 $D_{\text{弯}}/d$ 比均呈幂函数关系且拟合度良好,这为实际工程设计和现场使用提供了可靠的量化参考,有助于更精准地进行吊索的选型和应用,保障吊装作业安全高效。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] LIAN Y S, ZHANG B, JI J X, et al. Experimental investigation on service safety and reliability of full-scale HMPE fiber slings for offshore lifting operations [J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115447.

[2] CHOI H S, KIM D K, KIM S, et al. Subsea equipment decommissioning using fiber rope [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 203: 01014.

[3] VLASBLOM M P, BOSMAN R L M. Predicting the creep lifetime of HMPE mooring rope applications [C]// OCEANS, 2006: 1-10.

[4] VLASBLOM M, ENGELS T, HUMEAU C. Tension endurance of HMPE fiber ropes [C]// OCEANS, 2017: 1-8.

[5] 张海永, 韩冀川, 郜阿旺, 等. 帆船用缆绳的应用现状 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(3): 39-42.

[6] 李亮, 郜阿旺, 宋炳涛, 等. 帆船用纤维绳索简介及其发展现状 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40(8): 1-6.

[7] 侯兵兵, 周家德, 李航宇, 等. 合成纤维吊索的特性及应用 [J]. 合成纤维, 2023, 52(10): 9-13.

[8] DNV-ST-N001 Marine operations and marine warranty [S].

[9] IMCA M 237-2017 Guidance on the selection, safe use and inspection of high performance fibre slings used for engineered lifts [S].

[10] ISO 18264:2022 Textile slings-lifting slings for general purpose lifting operations made from fiber ropes-high modulus polyethylene (HMPE) [S].

[11] TB/T 3123. 11—2009. 铁路行车事故救援设备 第 11

部分:高性能合成纤维起重吊索[S].

(上接第 21 页)

[51] JU J G, HUANG Y T, LIU M Y, et al. Construction of electrospinning Janus nanofiber membranes for efficient solar-driven membrane distillation [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 305: 122348.

[52] YAN T, LI Y Y, SU J, et al. Charge transfer metal-organic framework containing redox-active TTF/NDI units for highly efficient near-infrared photothermal conversion[J]. Chemistry-A European Journal, 2021, 27(43): 11050-11055.

[53] TAO P, NI G, SONG C Y, et al. Solar-driven interfacial evaporation [J]. Nature Energy, 2018, 3 (12): 1031-1041.

[54] WAN L H, YAN S T, FANG L, et al. Liquefied-chitin polyurethane foam construction of high-efficiency solar evaporator for seawater purification [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(21): e53879.

[55] KANG H S, ZOU J W, LIU Y, et al. Synergistic effect of photothermal conversion in MXene/Au@Cu₂S hybrids for efficient solar water evaporation [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(44): 2303911.

[56] HU J J, SUN Y, LIU Z X, et al. Photothermal fabrics for solar-driven seawater desalination [J]. Progress in Materials Science, 2025, 150: 101407.

[57] CHAULE S, KANG J H, JANG J H. Optimizing solar evaporation efficiency: integrating controllable water supply and efficient salt collection methods [J]. Materials Today Energy, 2024, 43: 101588.

[58] WANG J C, CHEN Z Y, FENG L, et al. Plants transpiration-inspired antibacterial evaporator with multiscale structure and low vaporization enthalpy for solar steam generation [J]. Nano Energy, 2023, 114: 108631.

[59] BU Y M, ZHOU Y H, LEI W W, et al. A bioinspired 3D solar evaporator with balanced water supply and evaporation for highly efficient photothermal steam generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(6): 2856-2866.

[60] LE T D, YANG D, NAM H K, et al. Low-cost, eco-friendly, and high-performance 3D laser-induced graphene evaporator for continuous solar-powered water desalination [J]. ACS Nano, 2024, 18 (48): 33220-33231.

[61] GAO T, WU X, WANG Y D, et al. A hollow and compressible 3D photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation without energy loss [J]. Solar RRL, 2021, 5(5): 2100053.

(上接第 27 页)

[12] EICHHORN S J, HEARLE J W S, JAFFE M, et al. Handbook of textile fibre structure: natural, regenerated, inorganic and specialist fibres [M]. Cambridge:

Woodhead Publishing, 2009: 382-428.

[13] OCV INTELLECTUAL CAPITAL, LLC. Glass composition for producing high strength and high modulus fibers: US20130225025A1 [P]. 2013-08-29.

