

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.202

引用格式:徐承军,王超宇,吉雨奇. 12×37 WS 多层股钢丝绳恒张力状态受力与磨损分析[J]. 重庆大学学报, 2025,48(5): 66-75.



12×37 WS 多层股钢丝绳恒张力状态受力与磨损分析

徐承军^a,王超宇^a,吉雨奇^b

(武汉理工大学 a. 交通与物流工程学院, 武汉 430063; b. 三亚科教创新园, 海南 三亚 572024)

摘要:在重载长行程工况下,多层股钢丝绳因复杂的空间结构而具有良好的性能,但也增加了对其受力与磨损分析的难度。为探究多层股钢丝绳的受力情况,基于Frenet标架建立了12×37 WS 多层股钢丝绳在直线与弯曲状态的数学模型,并根据钢丝绳参数计算了其受到6 t拉力时不同层股间钢丝的接触应力与弯曲应力。分别以内层股、中层股与外层股的捻距为变量,探究其对钢丝接触应力的影响规律,为多层股钢丝绳结构参数的优化提供了指导。通过SolidWorks建立钢丝绳有限元模型,并用workbench软件的仿真对其力学性能进行了验证。综合理论计算与有限元分析的结果表明:多层股钢丝绳受恒张力作用时,绳股的最外层钢丝更易因磨损而发生断丝失效,并且越靠近芯股的层股应力越大;可以通过适当增大芯股直径,减小外层股直径来降低钢丝绳断丝几率。

关键词:多层股钢丝绳;接触应力;弯曲应力;Frenet标架;磨损

中图分类号: TG356.45; TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)05-066-10

Analysis of constant tension stress and wear of 12×37 WS multi-strand wire rope

XU Chengjun^a, WANG Chaoyu^a, JI Yuke^b

(a. College of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan 430063, P. R. China; b. Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya, Hainan 572024, P. R. China)

Abstract: Under heavy-duty and long-stroke operating conditions, multi-strand wire ropes demonstrate excellent performance due to their complex spatial structure; however, this complexity also presents challenges in analyzing their stress distribution and wear behavior. In this study, a mathematical model of a 12×37 WS multi-strand steel wire rope under both straight and bending state is established based on the Frenet frame. Using this model, the contact and bending stresses between strands are calculated under a tensile load of 6 t. Next, the lay lengths of the inner, middle and outer strands are treated as variables, and their influence on the contact stress is studied, providing guidance for optimizing the structural parameters of multi-strand wire ropes. A finite element model of the rope is then established in SolidWorks, and its mechanical performance is verified through simulation using ANSYS Workbench. Finally, based on theoretical calculations and finite element analysis, it is concluded that the

收稿日期: 2023-09-16 网络出版日期: 2024-04-16

基金项目: 三峡工程后续专项科研资助项目(SXHXGZ-2021-2)。

Supported by Three Gorges Follow-up Work Research Project(SXHXGZ-2021-2).

作者简介: 徐承军(1973—),男,副教授,博士,主要从事状态监测、信号分析及处理、机械故障诊断研究,(E-mail) 172396398@qq.com。

outermost wires are more susceptible to breakage due to wear under constant tension. Additionally, stress levels increase in strands closer to the core. Therefore, a design recommendation is proposed: increasing the diameter of the core strands and reducing that of the outer strands can effectively reduce the breakage rate and enhance rope durability.

Keywords: multi-strand wire rope; contact stress; bending stress; Frenet frame; wear

钢丝绳因其强度高、弹性和伸展性好、重量轻、抗冲击性能良好等特点,被广泛应用于工业、交通、建筑等领域^[1]。钢丝绳在工作过程中,不仅会与滑轮、卷筒绳槽产生摩擦磨损,同时其内部相互接触的钢丝会因受载后应变不同步而产生摩擦磨损,进而造成断丝破坏^[2],断丝数增加会使余下钢丝绳 Von-Mises 应力增加,使应力集中更明显,加速钢丝绳损坏^[3]。在多层股钢丝绳工作时,芯股之外的钢丝间接触应力远大于所受拉应力,其失效首先从内部磨损开始,进而扩展为裂纹^[4]。随着循环次数增加,钢丝绳微动磨损面积会增大,导致安全系数降低^[5],且变载弯曲疲劳的钢丝绳比定载的疲劳寿命短,更易报废^[6]。

提高疲劳寿命和内部损伤探测是钢丝绳研究的重点内容。单股钢丝疲劳寿命随侧丝直径、捻角及钢丝弹性模量增大而减小,并与泊松比呈正相关^[7]。同时,良好的润滑工艺有利于减少钢丝绳股丝间的摩擦^[8],压实与涂塑工艺也可以抑制磨损^[9],压实工艺在低载荷下表现较好,涂塑工艺在高载荷下通过限制微动磨损更有利于提高疲劳寿命^[10]。在生产过程中,通常以目测、游标卡尺测量、图像识别等方式对钢丝绳外部损伤进行检测^[11],也会以超声波、电磁检测等方式对内部进行探伤,从而对钢丝绳使用状况进行判定^[12]。

以往对多层股钢丝绳的计算与仿真研究多以 3 层股钢丝绳为例,并且绳股中的钢丝层数也较少,在实际长期重载作业中的钢丝绳层股数并不止于此。以直径为 28 mm 的 12×37 WS 多层股钢丝绳为研究对象,其由内到外共有 4 层绳股,最外层绳股中有 4 层钢丝,结构复杂,分析结果能够反映多层股钢丝绳受载情况。文中通过理论计算与有限元分析的方式探究了钢丝绳在直线与弯曲状态受恒拉力的力学性能,以此分析了钢丝绳受力时易于发生磨损与断丝的位置,并探究了不同层股捻距对层股间接触应力的影响,为提高钢丝绳疲劳寿命与降低钢丝绳内部断丝几率提供了一定的理论基础。

1 Φ28 mm 钢丝绳数学模型

钢丝绳是由钢丝捻制成股,再由绳股捻制而成的,从直钢丝绳结构上看,其中心轴为一条直线,芯股的外层钢丝与其余绳股的股芯均为一次螺旋线,而其余绳股的股丝为二次螺旋线,如图 1 中所示的 Z1 为中心钢丝, Z2 为外层绳股中某一股的股芯,为一次螺旋线, Z3 为外层绳股中某一股的股丝,为二次螺旋线;而弯曲钢丝绳的中心钢丝为一段圆弧,如图 2 中的 W1 所示, W2 为外层绳股某一股的股芯, W3 为外层绳股某一股的股丝。

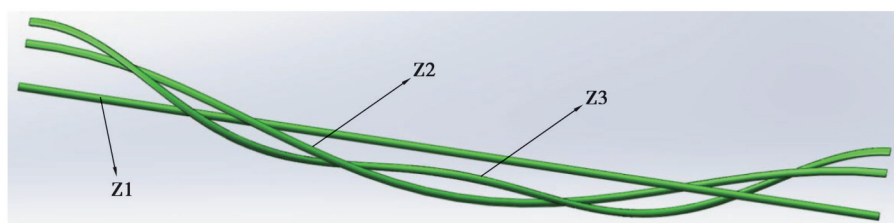


图 1 直钢丝绳缠绕示意图

Fig. 1 Straight wire rope winding diagram

文中采用直径为 28 mm 的 12×37 WS 等捻距钢丝绳进行分析计算,绳内钢丝均为右同向捻,捻向字母表示为 zZ,具有接触应力小,易于弯折的优点。Φ28 mm 钢丝绳几何参数如表 1 所示,横截面示意图如图 3 所示。

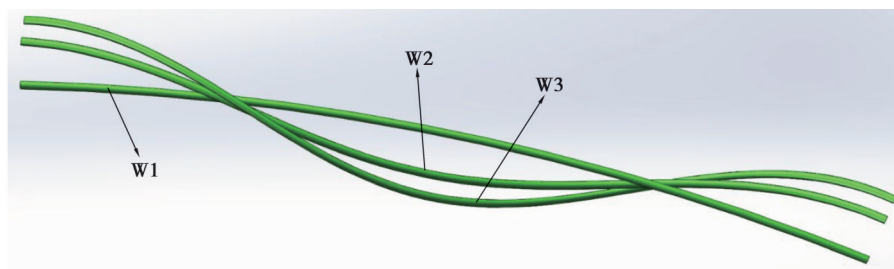


图2 弯曲钢丝绳缠绕示意图

Fig. 2 Bending wire rope winding

表1 28 mm 钢丝绳几何参数

Table 1 Geometrical parameters of 28 mm wire rope

几何参数		直径/mm	捻距/mm	螺旋半径/mm	钢丝数量/根	初始角度/rad
芯股	芯丝	2.00	137	0	1	0
	第一层股丝	0.89	137	1.445	10	0
内层股	芯丝	0.58	137	2.760	10	0
	第一层股丝	0.58	137	0.580	6	0
中层股	芯丝	0.88	137	5.870	8	0
	第一层股丝	0.88	137	0.880	6	0
	第二层股丝	0.92	137	1.790	12	0
外层股	芯丝	0.78	137	10.750	12	0
	第一层股丝	0.78	137	0.780	6	0.061 26
	第二层股丝	0.82	137	1.580	12	0.078 02
	第三层股丝	0.83	137	2.380	18	0.339 82

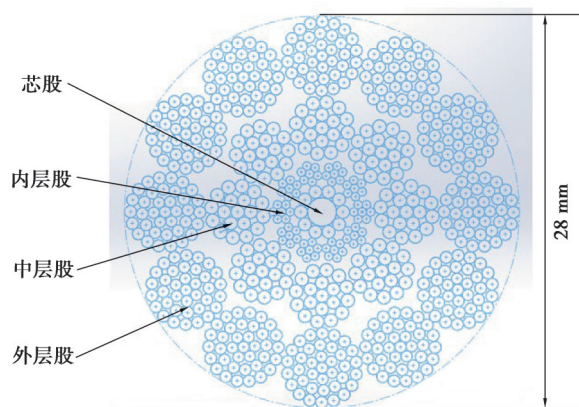


图3 钢丝绳横截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross-section of the wire rope

钢丝绳的数学模型会因捻向不同而有差异,根据微分几何学等数学知识推导出右同向捻钢丝绳的一次螺旋线与二次螺旋线数学模型^[13]如下。

直钢丝绳一次螺旋线为:

$$\begin{cases} x = R_0 \times \cos(w + w_H), \\ y = R_0 \times \sin(w + w_H), \\ z = n \times w / (2\pi). \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_0 为钢丝螺旋半径,mm; w 为钢丝螺旋线转过的角度,为自变量,rad; n 为钢丝绳捻距,mm; w_H 为螺旋线的起始点与原点的连线关于 x 轴的夹角,rad; $w_H = w_0 + (2\pi)/N \times (H - 1)$, N 为同层的股丝数量, $1 \leq H \leq N$ 。

弯曲钢丝绳一次螺旋线为

$$\begin{cases} x = R_0 \times \sin(w + w_H), \\ y = R_s \times \cos(w_s) - R_0 \times \cos(w_s) \times \cos(w + w_H), \\ z = R_s \times \sin(w_s) - R_0 \times \sin(w_s) \times \cos(w + w_H), \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_s 为钢丝绳折弯半径,mm,取525 mm; w_s 为钢丝绳中心轴经过的角度,为自变量,rad。

直钢丝绳二次螺旋线为

$$\begin{cases} x = R_1 \cos(w_1 + w_{K0}) + R_2 [-\cos(w_1 + w_{K0}) \cos(w_{11} + w_{KL0}) + \\ \quad \cos(\beta_1) \sin(w_1 + w_{K0}) \sin(w_{11} + w_{KL0})], \\ y = R_1 \sin(w_1 + w_{K0}) + R_2 [-\sin(w_1 + w_{K0}) \cos(w_{11} + w_{KL0}) - \\ \quad \cos(\beta_1) \cos(w_1 + w_{K0}) \sin(w_{11} + w_{KL0})], \\ z = n_1 \times w_1 / (2\pi) + R_2 \sin(\beta_1) \sin(w_{11} + w_{KL0}) \circ \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_1 为外层绳股中第 K 根绳股股芯到钢丝绳中心的距离,mm; R_2 为外层绳股中第 K 根绳股中同层的股丝到该绳股股芯的距离,mm; w_1 为外层绳股中第 K 根绳股股芯螺旋线转过的角度,为自变量,rad; w_{K0} 为外层绳股中第 K 根绳股股芯螺旋线起始点与原点的连线与 x 轴的夹角,rad, $w_{K0} = w_{10} + (2\pi)/N_1 \times (K - 1)$, N_1 为该层绳股数,即股芯数, $1 \leq K \leq N_1$; w_{11} 为外层绳股中第 K 根绳股股丝螺旋线转过的角度,为自变量,rad; w_{KL0} 为外层绳股中第 K 根绳股第 L 根股丝螺旋线起始点与该绳股的股芯螺旋线起始点的连线关于 x 轴的夹角,rad, $w_{KL0} = w_{K10} + (2\pi)/N_2 \times (L - 1)$, N_2 为该绳股中同层的股丝数, $1 \leq L \leq N_2$; β_1 为外层绳股的股芯捻角,rad, $\beta_1 = \arctan(2\pi R_1/n_1)$; n_1 为外层绳股股芯螺旋线捻距,mm。

弯曲钢丝绳二次螺旋线为:

$$\begin{cases} x = R_1 \sin(w_1 + w_{K0}) - R_2 \cos(w_{11} + w_{KL0}) \sin(w_1 + w_{K0}) - \\ \quad R_2 \sin(w_{11} + w_{KL0}) \cos(\beta_1) \cos(w_1 + w_{K0}), \\ y = R_s \cos(w_s) - R_1 \cos(w_s) \cos(w_1 + w_{K0}) + \\ \quad R_2 \cos(w_{11} + w_{KL0}) \cos(w_s) \cos(w_1 + w_{K0}) - \\ \quad R_2 \sin(w_{11} + w_{KL0}) [\cos(w_s) \cos(\beta_1) \sin(w_1 + w_{K0}) + \sin(w_s) \sin(\beta_1)], \\ z = R_s \cos(w_s) - R_1 \sin(w_s) \cos(w_1 + w_{K0}) + \\ \quad R_2 \cos(w_{11} + w_{KL0}) \sin(w_s) \cos(w_1 + w_{K0}) - \\ \quad R_2 \sin(w_{11} + w_{KL0}) [\sin(w_s) \cos(\beta_1) \sin(w_1 + w_{K0}) - \cos(w_s) \sin(\beta_1)] \circ \end{cases} \quad (4)$$

2 钢丝绳的应力计算

2.1 拉应力

钢丝绳在工作过程中,可将整根绳的受力状态看作为一端固定,另一端受拉力,多层股钢丝绳整体所受拉力为所有绳股拉力在绳受拉方向的分量总和,而绳股拉力为股内钢丝沿股轴线方向的分量总和^[14]。计算时忽略泊松比影响,因其对计算结果影响很小,则第 k 层单根钢丝拉应力为

$$\sigma_k = \frac{\cos^2 \beta_l \cos^2 \beta_{kl} \cdot E_{kl}}{\sum_{j=0}^{n_s} \left(m_j \cdot \cos^3 \beta_j \cdot \sum_{i=0}^{n_g} [m_{ij} \cdot \cos^3 \beta_{ij} \cdot E_{ij} \cdot A_{ij}] \right)} \cdot F, \quad (5)$$

式中: F 为钢丝绳整绳所受拉力,N,取58 800 N; n_s 为钢丝绳中绳股的总层数; j 为钢丝绳单个绳股所在层数, $j = 0$ 时表示芯股; m_j 为钢丝绳第 j 层绳股的绳股总根数; β_j 为钢丝绳第 j 层绳股的捻角,rad; n_g 为钢丝绳第 j 层单个绳股中钢丝的总层数; i 为钢丝绳绳股单根绳丝所在层数, $i = 0$ 时表示芯丝; m_{ij} 为钢丝绳第 j 层绳股中第 i 层钢丝的钢丝总根数; β_{ij} 为钢丝绳第 j 层绳股中第 i 层钢丝的捻角,rad; A_{ij} 为钢丝绳第 j 层绳股中第 i 层钢丝的横截面积,mm²。

根据式(5)可得各绳股中单根钢丝绳拉应力如表2所示。

表2 各绳股单根钢丝绳拉应力计算值

Table 2 Calculation value of tensile stress of a single wire rope for each strand Mpa

单根钢丝绳拉应力	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
$i=0$	154.61	152.17	144.16	124.38
$i=1$	153.93	151.25	143.93	124.22
$i=2$			143.20	123.73
$i=3$				122.91

由表2可知,钢丝拉应力随*i*与*j*的增大而减小,最大拉应力出现在绳芯处。

2.2 接触应力

直钢丝绳根据 Costello 接触理论,忽略接触点变形,可推导出文中多层股钢丝绳中不同层股之间的接触均布载荷计算公式。

芯股与内层股

$$F'_{C1} = -X_{C1} \cdot \sqrt{\frac{p_n^2 + [2\pi(R_x + R_n)]^2}{p_n^2 + (2\pi R_x)^2}}; \quad (6)$$

式中: p 为侧丝捻距; R 代表绳股半径;角标中*x*、*n*、*z*、*w*分别代表芯股、内层股、中层股、外层股; X_c 是相关论文中根据 Costello 理论推导出的股丝的分力。

内层股与中层股

$$F'_{C2} = -X_{C2} \cdot \sqrt{\frac{p_z^2 + [2\pi(R_x + 2R_n + R_z)]^2}{p_z^2 + [2\pi(R_x + 2R_n)]^2}}; \quad (7)$$

中层股与外层股

$$F'_{C3} = -X_{C3} \cdot \sqrt{\frac{p_w^2 + [2\pi(R_x + 2R_n + 2R_z + R_w)]^2}{p_w^2 + [2\pi(R_x + 2R_n + 2R_z)]^2}}。 \quad (8)$$

其最大接触应力为 $\sigma_c = \frac{b}{\Delta}$,其中 $b = \sqrt{\frac{2F'_c \Delta}{\pi}}$,芯股与内层股 $\Delta = \frac{4(1 - \nu^2)}{E \left(\frac{\sin^2 \alpha_2}{R_x} + \frac{1}{R_n} \right)}$,

内层股与中层股 $\Delta = \frac{4(1 - \nu^2)}{E \left(\frac{\sin^2 \alpha_3}{R_x + 2R_n} + \frac{1}{R_z} \right)}$,中层股与外层股 $\Delta = \frac{4(1 - \nu^2)}{E \left(\frac{\sin^2 \alpha_4}{R_x + 2R_n + 2R_z} + \frac{1}{R_w} \right)}$ 。

根据钢丝绳几何参数,代入上述公式后可计算出芯股与内层股的接触应力为 -496.34 MPa,内层股与中层股的接触应力为 -470.63 MPa,中层股与外层股的接触应力为 -420.56 MPa。

根据计算结果分析,钢丝之间的接触应力在钢丝绳所受的各类应力中占比较大,且层股之间的接触应力越靠近芯股就越大,可知在钢丝绳受载时,其内部因较大的接触应力而更易于发生接触磨损。

从钢丝绳结构上看,不同层股间的接触应力与其绳股的捻距相关^[15],分别改变内层股、中层股、外层股的外侧钢丝捻距,其接触应力变化情况如图4所示。

根据图4数据可知,内层股捻距增大时,芯股与内层股接触应力增大,其余层股之间接触应力减小,且对其余层股之间接触应力的影响程度较低;中层股捻距增大时,内层股与中层股接触应力增大,其余层股之间接触应力减小,且对其余层股之间接触应力的影响程度较高;外层股捻距增大时,中层股与外层股接触应力增大,其余层股之间接触应力减小,且对其余层股之间接触应力的影响程度很高。

综上,外层股捻距对多层股钢丝绳的钢丝接触应力影响很大,在合理范围内,较大的外层股捻距有利于

缓解钢丝绳内部的接触磨损程度。

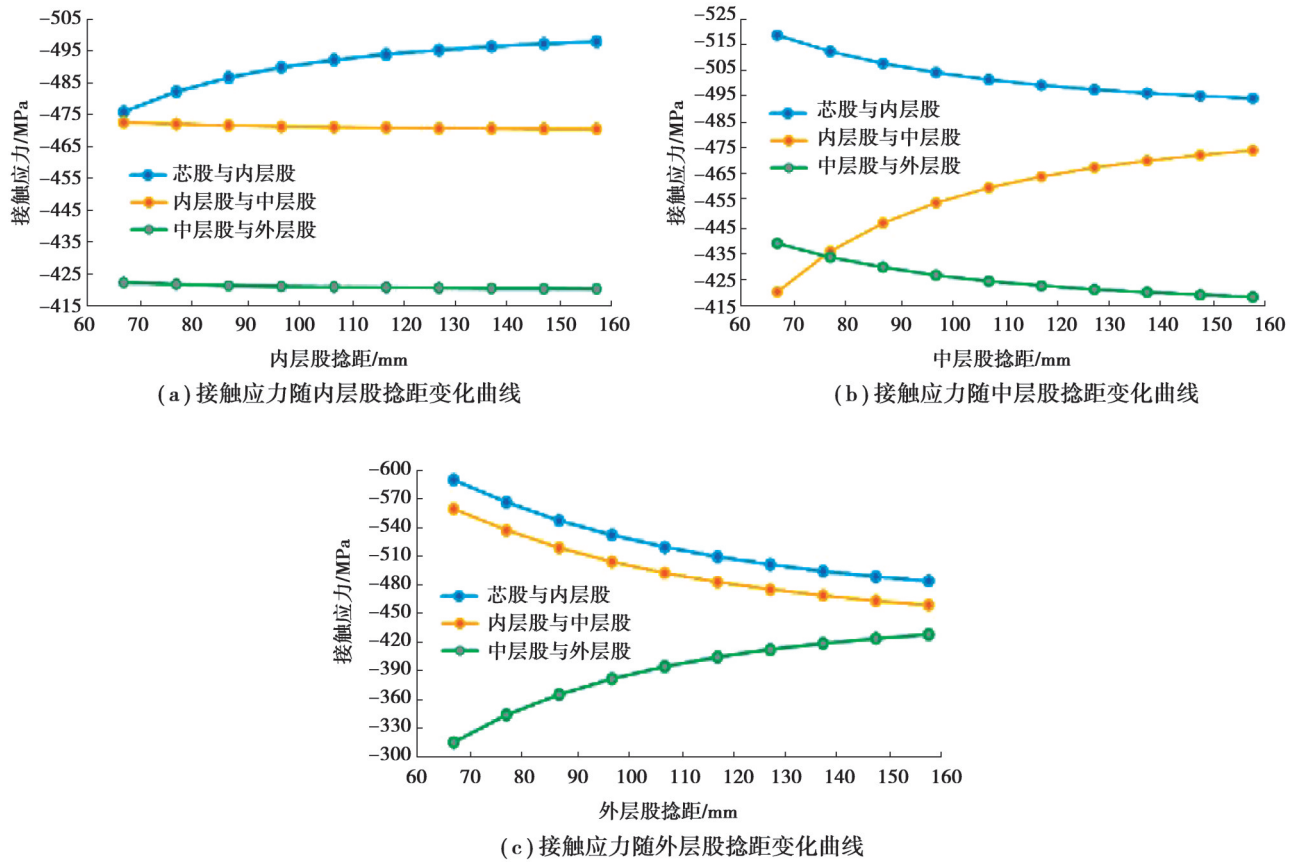


图4 12×37 WS 钢丝绳不同层股接触应力随捻距变化曲线

Fig. 4 Curve of contact stress of 12×37 WS steel wire rope with lay distance

2.3 相当应力

对钢丝绳而言,切应力对钢丝破坏的影响较小,因此采用第四强度理论计算不同层股接触钢丝接触点位置的相当应力。其计算公式为

$$\sigma_{r4} = \sqrt{(\sigma_m - \sigma_c)^2 + 3\sigma_H^2} \quad (9)$$

式中: σ_m 为钢丝的最大正应力; σ_H 为外侧钢丝因扭矩 H 产生最大的剪切应力。

通过计算可得,芯股与内层股之间接触点的相当应力为648.58 MPa,内层股与中层股之间接触点的相当应力为614.70 MPa,中层股与外层股之间接触点的相当应力为543.23 MPa。

根据上述数据可知,直钢丝绳受恒拉力作用时,芯股与内层股的相当应力最大,随着层股越向外层,其相当应力数值越小。

2.4 因弯曲产生的弯曲应力

钢丝绳在绕过滑轮或卷筒时,绳股因弯曲而产生的弯曲应力的最大处位于距中性层的最远处^[16],其计算公式为

$$\sigma_{w\max} = (\kappa_2 - \kappa_1) \cdot \frac{d}{2} \cdot E = \Delta\kappa \cdot \frac{d}{2} \cdot E, \quad (10)$$

式中: κ_1 为直线状态时的曲率; κ_2 为弯曲状态时的曲率; $\Delta\kappa$ 为曲率变化量; d 为钢丝绳直径,即28 mm。

经计算,钢丝绳内层股、中层股与外层股的最大弯曲应力分别为-507.38、-477.77、-426.11 MPa。

根据上述数据可知,直径28 mm的12×37 WS钢丝绳的不同层股钢丝所受的最大弯曲应力值由内向外逐渐减小。

2.5 附加弯曲应力

弯曲钢丝绳在受拉状态下,其内部钢丝会因空间曲线形状的变化而产生附加弯曲应力,其计算公式为:

$$\sigma_f = E \cdot R \cdot \left\{ -\frac{2\sin\alpha_j \cos\alpha_j}{r_j} \Delta\alpha_j + \frac{v \cdot \left[\sum_{n=0}^j (R_0 \zeta_0 + 2 \cdot \sum_{n=1}^i R_n \zeta_n) \right] \cos^2 \alpha_j}{r_j^2} \right\}, j=1;$$

$$\sigma_f = E \cdot R \cdot \left\{ -\frac{2\sin\alpha_j \cos\alpha_j}{r_j} \Delta\alpha_j + \frac{v \cdot \left[\sum_{n=0}^j (R_0 \zeta_0 + 2 \cdot \sum_{n=1}^i R_n \zeta_n) + \sum_{n=1}^{j-1} (R_0 \zeta_0 + 2 \cdot \sum_{n=1}^i R_n \zeta_n) \right] \cos^2 \alpha_j}{r_j^2} \right\}, j \geq 2. \quad (11)$$

式中, ζ 为应变。

经计算,钢丝绳内层股、中层股与外层股的附加弯曲应力分别为 -22.80 、 -19.49 、 -9.30 MPa。

由此可知,弯曲钢丝绳因受拉伸载荷而产生的附加弯曲应力数值大小会随着层股由内向外的变化而减小。

2.6 最大弯曲应力

弯曲钢丝绳的钢丝因受拉伸载荷作用产生的最大弯曲应力为因弯曲产生的弯曲应力与因拉伸产生的附加弯曲应力之和,即 $\sigma_{\max} = \sigma_{w\max} + \sigma_{f0}$ 。根据上述计算,钢丝绳内层股、中层股与外层股钢丝中的最大弯曲应力分别为 -530.18 、 -497.26 、 -435.41 MPa。

2.7 钢丝绳与滑轮的正应力

钢丝绳与滑轮配合时,可将钢丝绳整体看作圆柱体,滑轮槽看作圆弧槽,则在二者接触长度上可视为赫兹接触理论中的圆柱体的二维接触问题^[17],其接触截面如图5所示。

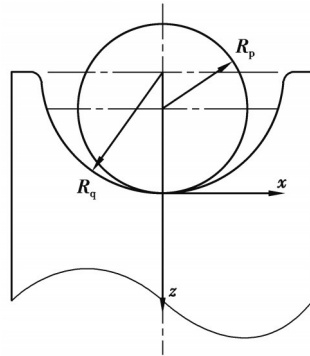


图5 钢丝绳与滑轮接触截面图

Fig. 5 Wire rope and pulley contact interface

在接触宽度上, z 轴方向上的正应力为

$$\sigma_z(x) = \frac{E^* \sum \frac{1}{R^*}}{2} \sqrt{\left[\frac{4F(e^{u\theta} - 1)}{\pi \mu E^* \sum \frac{1}{R^*}} - x^2 \right]}, \quad (12)$$

式中: E^* 为综合弹性模量,Pa, $1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$,其中 ν_1 为钢丝绳的泊松比, E_1 为钢丝绳的弹性模量, ν_2 为滑轮的泊松比, E_2 为滑轮的弹性模量; $\sum(1/R^*)$ 为综合曲率, $\sum(1/R^*) = 1/R_p - 1/R_q$,其中 R_p 为钢丝绳半径, R_q 为滑轮的轮槽半径, $R_q = 20$ mm; μ 为摩擦系数,取0.1; θ 为接触圆弧的角度,取一个捻距的圆弧,rad,其角度为0.13 rad;当 $x=0$ 时,正应力最大,即 $\sigma_{z\max} = 76.08$ MPa。

3 钢丝绳三维物理模型及有限元分析

3.1 钢丝绳三维模型的建立

钢丝绳在空间结构上为复杂的螺旋结构,在直钢丝绳建模过程中,根据钢丝绳截面草图,以每根钢丝圆的中心为起点,围绕钢丝绳的中心线扫描出所需的一次螺旋线路径,围绕一次螺旋线扫描出所需的二次螺旋线路径,使钢丝绳的钢丝截面根据所建立的螺旋线路径扫描出钢丝实体。弯曲钢丝绳的中心线为一段圆弧,其余建模步骤与直钢丝绳相同。文中所建立的直径 28 mm 的 12×37 WS 直、弯曲钢丝绳模型如图 6 和图 7 所示。

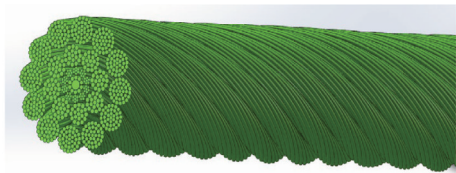


图 6 28 mm 直钢丝绳三维模型
Fig. 6 28 mm straight wire rope 3D model

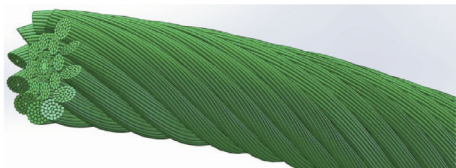


图 7 28 mm 弯曲钢丝绳三维模型
Fig. 7 28 mm bending wire rope 3D model

3.2 有限元分析结果

将钢丝绳三维模型导入到 workbench 中进行有限元分析计算,在钢丝绳一端设置固定约束,另一端施加 58 800 N 的拉力(即 6 t),并在受力一端设置在 y 轴方向上为 0°的 Remote Displacement 约束。弯曲钢丝绳需与滑轮槽配合,在上述约束条件的基础上,在滑轮底部施加一个固定约束^[18]。材料属性按密度为 7 850 kg/m³、泊松比为 0.3、弹性模量为 2.0×10¹¹ Pa 设置^[19]。经计算,钢丝绳变形量、应力、应变结果如图 8 和图 9 所示。

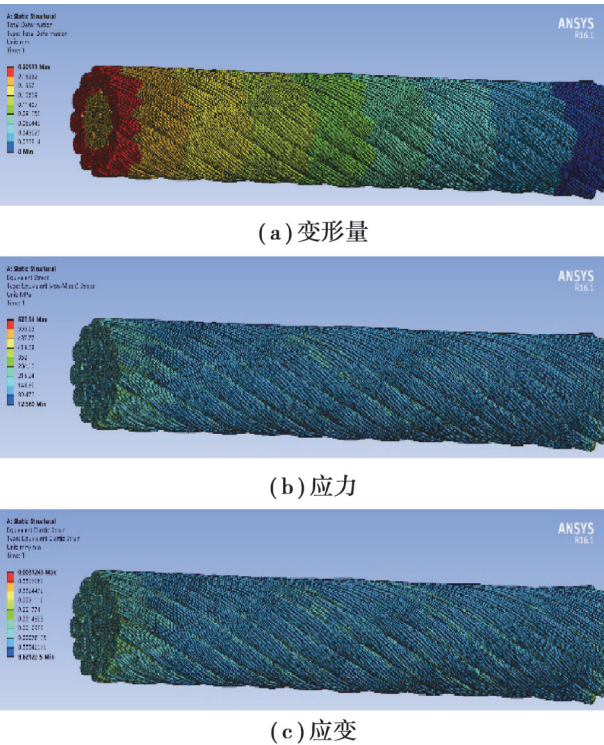


图 8 直钢丝绳有限元分析结果
Fig. 8 Results of finite element analysis of straight wire rope

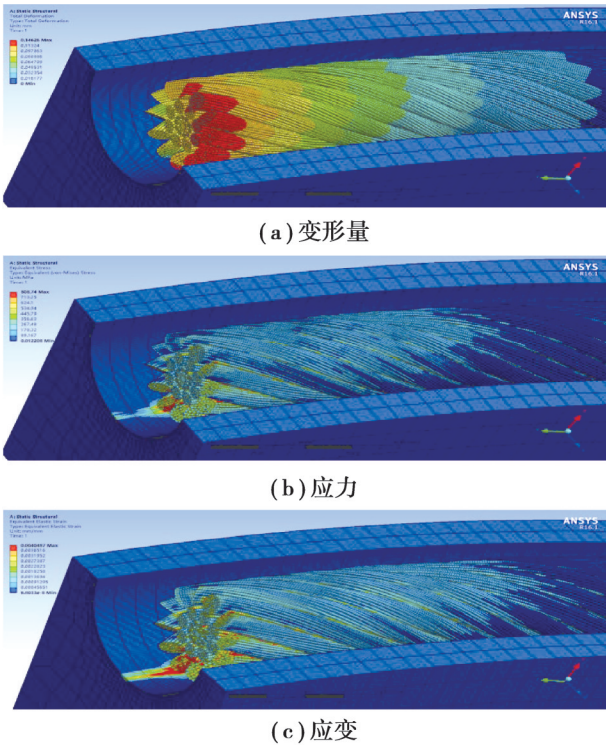


图 9 弯曲钢丝绳有限元分析结果
Fig. 9 Results of finite element analysis of bending wire rope

有限元分析结果如表3所示。

表3 有限元分析结果
Table 3 Results of finite element analysis

有限元分析结果	变形量/mm	应力/MPa	应变
直钢丝绳(最大值)	0.205 33	623.54	0.003 124 3
弯曲钢丝绳(最大值)	0.146 26	808.74	0.004 048 7

由仿真结果可知,弯曲钢丝绳与直钢丝绳在层股接触部位与层股内不同绳股的接触部位均产生了较大的应力值,且在弯曲钢丝绳中,外层股与滑轮接触部位也有明显的应力集中现象。钢丝绳中的单根绳股内部应力普遍不高,可知钢丝绳受载后,绳股的外侧钢丝更易因摩擦磨损而产生断丝现象。从仿真的整体结果看,直钢丝绳应力值约为216.24 MPa,弯曲钢丝绳应力值约为267.48 MPa,整体的应力值不高。

第二部分计算所得的直钢丝绳最大接触应力分布情况和弯曲钢丝绳应力情况与有限元分析结果相差较大,可能是钢丝绳模型中的钢丝数量较多,使有限元仿真中的接触面设置不准确导致。

4 结 论

1)根据对28 mm直径的12×37 WS多层钢丝绳不同层股钢丝间的接触应力的计算,当某一层股的捻距增大时,该层股与其内一层股间的接触应力增大,其余层股间的接触应力减小,并且外层股捻距变化产生的影响最大,其次为中层股,内层股的影响程度较小。因此,合理配置不同层股捻距,尤其是外层股捻距,有利于钢丝绳不同层股间接触应力的均匀分布。

2)钢丝绳受载后因不同层股钢丝间的相对错动位移而导致应力增大,以钢丝绳受到6 t拉力为载荷条件,通过理论计算表明,钢丝绳不同层股的最大应力由内层股向外层股递减,钢丝绳更容易在内层股丝中产生断丝破坏。仿真计算结果显示,钢丝绳的整体应力水平不高,只有绳股外侧钢丝局部接触位置应力较大,且对于弯曲钢丝绳而言,受载一端与滑轮接触的钢丝应力也较大,易于磨损失效。

3)分析结果表明,增大芯股的结构直径,适当降低外层股的结构直径有利于减少钢丝绳断丝几率,为重载长行程工况下多层股钢丝绳的设计、制造优化提供理论指导。

参考文献

- [1] 万园. 超深矿井提升机钢丝绳在拉伸载荷作用下的力学特性及寿命预测[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Wan Y. Mechanical characteristics and life prediction of steel wire rope under tensile load in super deep mine hoist[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [2] 徐承军, 罗会超, 卢茹利. 18×7+IWS多层股阻旋转钢丝绳弯曲特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(2): 66-71.
Xu C J, Luo H C, Lu R L. Research on bending characteristics of 18×7+IWS multi-layer strand resistance rotary wire rope [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39(2): 66-71. (in Chinese)
- [3] 马保珠, 杜文正, 孟亮, 等. 1×7+IWS钢丝绳断丝规律有限元仿真分析[J]. 机械设计, 2022, 39(S2): 168-172.
Ma B Z, Du W Z, Meng L, et al. Finite element simulation analysis of breaking law of 1×7+IWS wire rope [J]. Machine Design, 2022, 39(S2):168-172. (in Chinese)
- [4] 李俊朋, 徐承军, 徐坤, 等. 多层股钢丝绳直线张拉状态下接触磨损机理研究[J]. 起重运输机械, 2020(9): 32-37.
Li J P, Xu C J, Xu K, et al. Research on contact wear mechanism of multi-strand wire rope under linear tension [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2020(9): 32-37. (in Chinese)
- [5] 张俊, 葛世荣, 王大刚, 等. 基于微动磨损预测矿井提升钢丝绳安全系数[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 110-118.
Zhang J, Ge S R, Wang D G, et al. Prediction of safety factor of mine hoisting rope based on fretting wear [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 110-118. (in Chinese)
- [6] 王大刚, 张俊, 朱辉龙, 等. 定、变载弯曲疲劳钢丝绳失效机理对比研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(6): 762-773.

- Wang D G, Zhang J, Zhu H L, et al. Fixed, variable load bending fatigue contrast research [J]. Journal of Wire Rope Failure Mechanism of Friction, 2020, 40(6): 762-773. (in Chinese)
- [7] 陈原培, 张余. 计入丝间非线性接触的单股钢丝绳疲劳特性研究[J]. 振动与冲击, 2021,40(22): 112-120.
- Chen Y P, Zhang Y. Study on fatigue characteristics of single strand wire rope with nonlinear contact between wires [J]. Vibration and Shock, 2021, 40(22): 112-120. (in Chinese)
- [8] Battini D, Solazzi L, Lezzi A, et al. Prediction of steel wire rope fatigue life based on thermal measurements[J]. Journal of Technology, 2020, 182(1):1-13.
- [9] Qing Z, Xing Y P, Cai Z Z, et al. Influence of longitudinal vibration on the friction and wear characteristics of multi-layer winding hoisting wire rope[J]. Wear: an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wea, 2022(492/493): 204211.
- [10] 束晨阳, 程渊, 陶建春, 等. 绳芯工艺对钢丝绳弯曲疲劳性能影响[J]. 金属制品, 2021, 47(3): 11-14.
- Shu C Y, Cheng Y, Tao J C, et al. Effect of core technology on bending fatigue performance of wire rope [J]. Metal Products, 2021, 47(3): 11-14. (in Chinese)
- [11] 黄剑坤, 周新年, 周成军, 等. 钢丝绳无损检测及其驱动技术研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(2): 15-21.
- Huang J K, Zhou X N, Zhou C J, et al. Wire rope nondestructive testing and drive technology research progress [J]. Journal of Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2023, 51(2): 15-21.(in Chinese)
- [12] Zhang Z G, Zhang J W. Quantitative nondestructive testing of broken wires for wire rope based on multi-image fusion[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2022, 58(7): 643-656.
- [13] 陈德斌. 多层股阻旋转钢丝绳受力特性与疲劳失效机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- Chen D B. Research on mechanical characteristics and fatigue failure mechanism of multi-layer strand resistance rotary wire rope[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Gai J B, Yan K, Deng Q, et al. A finite element model for a $6 \times K_{31}$ WS + FC wire rope and a study on its mechanical responses with or without wire breakage[J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8407.
- [15] Cui W H, Song B, Fu C, et al. Effect of pitch on mechanical properties of braided wire rope under winding and traction condition[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2355(1): 012080.
- [16] Chang X D, Peng Y X, Zhu Z C, et al. Sliding friction and wear characteristics of wire rope contact with sheave under long-distance transmission conditions[J]. Materials, 2022, 15(20): 7092.
- [17] 孙冠, 沈志军, 张东昱. 钢丝绳与滑轮间接触应力计算[J]. 广东第二师范学院学报, 2019, 39(5): 74-78.
- Sun G, Shen Z J, Zhang D Y. Calculation of contact stress between steel wire rope and pulley [J]. Journal of Guangdong Second Normal University, 2019, 39(5): 74-78. (in Chinese)
- [18] Hu Z, Wang E Y, Jia F Y, et al. Comparison between mechanical behaviors of wire ropes with distinct contact modes based on the finite element method[J]. Sādhanā, 2022, 47(2): 64.
- [19] 吴娟, 寇子明, 刘玉辉, 等. 弯曲钢丝绳股内钢丝应力应变数值模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1463-1468.
- Wu J, Kou Z M, Liu Y H, et al. Bend the wire strands wire stress and strain in the numerical simulation [J]. Journal of Coal, 2015, 40(6): 1463-1468. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)