

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.004

电梯曳引钢丝绳力学分析及实验研究^{*}

尤光辉¹, 张 宪^{2*}, 钟 江², 俞思源³

(1. 浙江省特种设备检验研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江工业大学 特种设备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014; 3. 杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要:针对电梯曳引钢丝绳内部受力及寿命问题,对电梯曳引钢丝绳 1×19 结构和 8×19 结构进行了力学研究。首先考虑单股钢丝绳受力情况并得到钢丝绳的应变;并分析了整根钢丝绳的力学性能,在 Matlab/Simulink 中通过求解力学方程建立模型,计算了电梯钢丝绳内部应力,分析了单股各层钢丝半径对其接触应力的影响,同时进行了钢丝绳拉伸及拆股实验来间接验证其受力情况。研究表明,芯股与侧股之间接触应力最大,芯层与内层钢丝接触应力次之,内层与外层之间的钢丝最小,拆股实验结果与仿真结果基本一致,同时随着芯层、内层、外层钢丝半径增加,单股钢丝内部接触应力下降或趋于均匀,为电梯钢丝绳后续研究奠定了基础。

关键词:电梯钢丝绳;力学分析;实验研究

中图分类号:TH111;TH114

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)11-1412-06

Mechanical analysis and experimental research of elevator traction rope

YOU Guang-hui¹, ZHANG Xian², ZHONG Jiang², YU Si-yuan³

(1. Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

3. Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the life and the forces inside of elevator traction rope, a strand of 1×19 structure and 8×19 structure of elevator traction rope were researched for mechanical. The force of a single strand of wire rope was analyzed and the strain was got first. Then the mechanical performance of entire rope was analyzed and the model was established by solving the equation of mechanical in Matlab/Simulink. The internal stress of the rope was calculated. Influence of the radius of the single stand wire on contact stress was researched. It also was analyzed and verified by stretch and splits of rope test indirectly. The results indicate that the contact stress of the core stand and the side stand is max, followed by the core-inner layers wire of stand, the inner-outer wire of strand is min; Experimental result is consistent with the simulation; Contact stress decrease and more uniform as radius of core/ inner/outer wire layers increase which are basis for the after study of the elevator rope.

Key words: elevator rope; mechanical analysis; experimental research

0 引 言

随着电梯曳引钢丝绳广泛使用,其断丝断股现象

时有发生,由于钢丝绳的原因引发的电梯事故也不时见诸媒体,电梯钢丝绳的断丝断股等情况给使用单位和乘客带来了极大的安全隐患,其质量和寿命引起了

收稿日期:2015-07-06

基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技计划资助项目(2013zjjg106)

作者简介:尤光辉(1989-),男,浙江临海人,硕士,主要从事电梯性能及检测技术方面的研究. E-mail:yough@163.com

通信联系人:张 宪,男,教授级高级工程师,硕士生导师. E-mail:zjtzhangx@163.com

广大学者关注。通过对电梯曳引钢丝绳内部进行受力分析,给电梯曳引钢丝绳设计单位来改善其性能依据,对提高全国电梯整体安全水平和保障人民群众乘梯安全和经济性有重要意义。国外学者 Erdonmez 等^[1]针对钢丝绳复杂的几何形状,提出了用几何方程来确定钢丝绳芯的模型。Usabiaga 等^[2]和 E. Stanova 等^[3]建立分别建立受力模型和数学几何模型,并对其进行分析钢丝绳损伤。王晓宇等^[4]总结了钢丝绳几何特征及分析钢丝绳在拉压、弯曲和局部接触等载荷的情况下非线性力学现象,对钢丝绳结构和相关力学分析进行了探讨。孙建芳^[5]通过对钢丝绳几何模型的建立,对钢丝绳力学强度及简单直股、独立绳芯进行了应力分析。刘玉辉等^[6]和许波波等^[7]提升绳进行研究,分析了其受力情况及其寿命影响进行了探讨。由于电梯曳引钢丝绳的磨损直接影响电梯安全,对其进行力学分析十分必要。

本研究对电梯曳引钢丝绳 1×19 结构和 8×19 结构进行力学研究。

1 电梯曳引钢丝绳力学分析

1.1 单根钢丝的受力分析

假定电梯曳引钢丝绳股中芯丝直径足够大,根据同层钢丝不接触的理论判断,同层钢丝之间不接触而只与芯丝接触,同层钢丝之间的摩擦力远小于外部载荷,不考虑摩擦力影响。钢丝变形前、后及载荷示意图如图 1 所示。

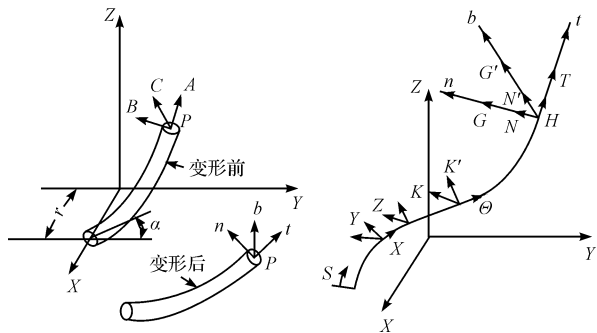


图 1 钢丝变形前、后及载荷示意图

N, N' —钢丝截面沿方向 n, b 的剪力; G, G' —钢丝截面沿 n 和 b 方向的力矩; T, H —钢丝的轴向拉力和扭转力矩; X, Y, Z —沿着钢丝的 t, n, b 方向上单位长度的外部载荷分量; K, K', Θ —沿钢丝的 t, n, b 方向上单位长度的外部力矩; k, k' —沿 n, b 的曲率; τ —挠率

根据 Costello 的弹性理论^[8],笔者建立电梯曳引钢丝绳的力学模型,单根钢丝的受力情况如图 1 所示,

根据力学平衡知识可以得到下列平衡方程:

$$\begin{cases} X + \frac{dN}{ds} + Tk' - N'\tau = 0 \\ Y + \frac{dN'}{ds} - Tk + N\tau = 0 \\ Z + \frac{dT}{ds} + N'k - Nk' = 0 \\ \frac{dG}{ds} - G'\tau + Hk' - N' + K = 0 \\ \frac{dG'}{ds} + G\tau' - Hk + N + K' = 0 \\ \frac{dH}{ds} - Gk' + G'k + \Theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

1.2 单股电梯曳引钢丝绳的受力分析

单股电梯曳引钢丝绳 (1×19) 结构由 1 根芯层钢丝, 6 根内层钢丝和 12 根外层钢丝组成, 是以一定螺旋角相互缠绕在一起的。单股电梯钢丝绳结构图及受力图如图 2 所示。

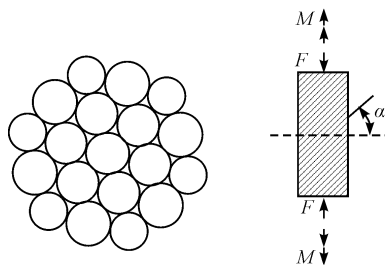


图 2 单股钢丝结构及受力情况

单股中芯层、内层、外层的半径分别为 R_0, R_1, R_2 , F, M 分别为单股钢丝绳所受的轴向力和轴向力矩, 受力后钢丝的螺旋结构发生改变, 钢丝在不受力状态下以及受轴向力后的曲率和挠率分别为:

$$\begin{cases} k'_1 = \cos^2 \alpha'_1 / r'_1 \\ \tau'_1 = \sin \alpha'_1 \cos \alpha'_1 / r \\ r'_1 = r_1 - \nu(R_0 \varepsilon_0 + R_1 \varepsilon_1) \\ k'_2 = \cos^2 \alpha'_2 / r'_2 \\ \tau'_2 = \sin \alpha'_2 \cos \alpha'_2 / r'_2 \\ r'_2 = r_2 - \nu(R_1 \varepsilon_1 + R_2 \varepsilon_2) - \nu R_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_1, α_2 —内层和外层钢丝的初始捻角; r_1, r_2 —内层和外层钢丝的螺旋半径; k_1, k'_1 —内层钢丝变形前后的曲率; k_2, k'_2 —外层钢丝变形前后的曲率; τ_1, τ'_1 —内层钢丝变形前后的挠率; τ_2, τ'_2 —外层钢丝变形前后的挠率; $\alpha'_1, \alpha'_2, r'_1, r'_2$ —内层、外层钢丝变形后的捻距和螺旋半径; ν —钢丝的泊松比; $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ —芯层、内层、外层钢丝的轴向应变(下标为 0—钢丝芯层, 1—钢丝内层, 2—钢丝外层, 下同)。

假设单股电梯曳引钢丝绳的侧线钢丝单位长度不受外力矩,即 $k_1 = 0$ 和 $k'_1 = 0$,而单股钢丝所受的轴向力是常数,故 $dN = 0$ 。笔者认为芯层、内层和外层钢丝泊松比均为 ν ,则由式(1)可得:

$$\begin{cases} X_1 + T_1 k_1 - N'_1 \tau'_1 = 0 \\ Y_1 = 0 \\ Z_1 = 0 \\ -G'_1 \tau'_1 + H_1 k'_1 - N'_1 = 0 \\ N_1 = 0 \\ I_1 = 0_2 \end{cases} \quad \begin{cases} X_2 + T_2 k_2 - N'_2 \tau'_2 = 0 \\ Y_2 = 0 \\ Z_2 = 0 \\ -G'_2 \tau'_2 + H_2 k'_2 - N'_2 = 0 \\ N_2 = 0 \\ I_2 = 0_2 \end{cases} \quad (3)$$

根据弹性力学知识,可得单股侧线内层和外层钢丝受力方程和力矩方程如下关系:

$$\begin{cases} G'_1 = E\pi R_1^4 \Delta k_1 / 4 \\ H_1 = C\pi R_1^4 \Delta \tau_1 / 2 \\ T_1 = E\pi R_1^2 \varepsilon_1 \\ N'_1 = H_1 k_1 - G'_1 \tau'_1 \\ X_1 = N'_1 \tau'_1 - T_1 k_1 \end{cases} \quad \begin{cases} G'_2 = E\pi R_2^4 \Delta k_2 / 4 \\ H_2 = C\pi R_2^4 \Delta \tau_2 / 2 \\ T_2 = E\pi R_2^2 \varepsilon_2 \\ N'_2 = H_2 k_2 - G'_2 \tau'_2 \\ X_2 = N'_2 \tau'_2 - T_2 k_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta \tau_1, \Delta \tau_2$ —内外层钢丝变形前后曲率和挠度的变化; E —弹性模量; C —剪切模量。

根据图 2 和式(4),可得单股侧线内外层钢丝的力及力矩平衡方程:

$$\begin{cases} F_1 = n_1 (T_1 \sin \alpha_1 + N'_1 \cos \alpha_1) \\ F_2 = n_2 (T_2 \sin \alpha_2 + N'_2 \cos \alpha_2) \\ F_0 = E\pi R_0^2 \varepsilon_0 \\ M_0 = C\varphi \pi R_0^4 / 2 \\ M_1 = n_1 (H_1 \sin \alpha_1 + G'_1 \cos \alpha_1 + T_1 r_1 \cos \alpha_1 - N'_1 r_1 \sin \alpha_1) \\ M_2 = n_2 (H_2 \sin \alpha_2 + G'_2 \cos \alpha_2 + T_2 r_2 \cos \alpha_2 - N'_2 r_2 \sin \alpha_2) \\ F_{\text{总}} = F_0 + F_1 + F_2 \\ M_{\text{总}} = M_0 + M_1 + M_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_0, F_1, F_2, F_{\text{总}}$ —单股钢丝绳芯层、内层、外层及单股钢丝绳的轴向力; $M_0, M_1, M_2, M_{\text{总}}$ —单股钢丝绳芯层、内层、外层钢丝及单股钢丝绳的轴向力矩; n_1, n_2 —单股钢丝绳内层、外层钢丝的总数目; ψ —单位长度扭转角。

螺旋股钢丝绳的扭转轴向力矩的公式为:

$$M = C \times d \times F \quad (6)$$

式中: M —钢丝绳扭矩; C —常数,在此取 $0.82^{[9]}$; d —钢丝绳直径; F —钢丝绳轴向力。

1.3 电梯曳引钢丝绳的受力分析

本研究采用电梯常用的 8×19 结构的钢丝绳建立

数学模型并进行力学分析。该类的电梯曳引钢丝绳是 8 个侧股以一定的螺旋角缠绕在芯股上形成的。

为了便于电梯曳引钢丝绳建立数学模型和力学分析,笔者将 8×19 类结构电梯曳引钢丝绳的每一股看成整体,芯股及侧股分别等效看成芯层钢丝和内层钢丝,就等效为单股电梯曳引钢丝绳的受力情况,由式(5)可得整根电梯曳引钢丝绳的受力方程,有如下的关系:

$$\begin{cases} F_c = n_c (T_c \sin \alpha_c + N'_c \cos \alpha_c) \\ F_x = E_x \pi R_x^2 \varepsilon_x \\ M_x = X C_x \gamma \pi R_x^4 / 2 \\ M_c = n_c (H_c \sin \alpha_c + G'_c \cos \alpha_c + T_c r_c \cos \alpha_c - N'_c r_c \sin \alpha_c) \\ F_{\text{总}} = F_x + F_c \\ M_{\text{总}} = M_x + M_c \end{cases} \quad (7)$$

式中:下标 x —芯股, c —侧股; γ —钢丝绳的旋转应变,对于钢芯 $X = 1$,对于麻芯,认为麻芯和钢芯一样承受载荷作用,取 $X = 1$,认为(麻芯)不承受载荷 $X = 0$ 。若是电梯曳引钢丝绳的芯股为钢芯层时,则 $\nu_c = \nu$ 。钢丝绳(麻芯)的弹性模量取麻芯的弹性模量和泊松比分别为 $E_x = 0.08 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\nu_x = 0.4$ 。

2 仿真结果分析

为研究各个钢丝的受力及应力情况,笔者利用 Matlab/Simulink 对 8×19 结构,芯股为麻芯,直径为 10 mm,侧股钢丝捻距 $p = 130 \text{ mm}$ 的电梯曳引钢丝绳受力过程进行编程建模,不考虑绳麻芯受力。

该模型的输入变量为钢丝绳的结构参数和受力值,输出结果为各个钢丝的轴向应力和接触应力值。在计算过程中使用的参数如表 1 所示。

表 1 电梯曳引钢丝绳结构参数

单股	R_0	R_1	R_2	P_1	P_2	E/MPa	ν	F/N
芯股	0.6	0.5	0.5	54	54	8 000	0.4	10 000
侧股	0.3	0.25	0.2	54	54	200 000	0.3	

在 Simulink 仿真计算中,将钢丝应变计算程序以 s 函数的形式^[10]封装在模块中。钢丝绳受力分析的 Simulink 仿真模型如图 3、图 4 所示。

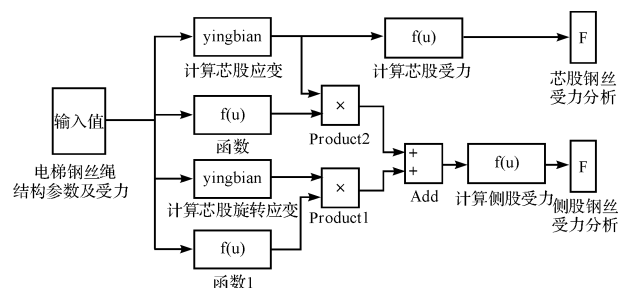


图 3 电梯曳引钢丝绳受力模型

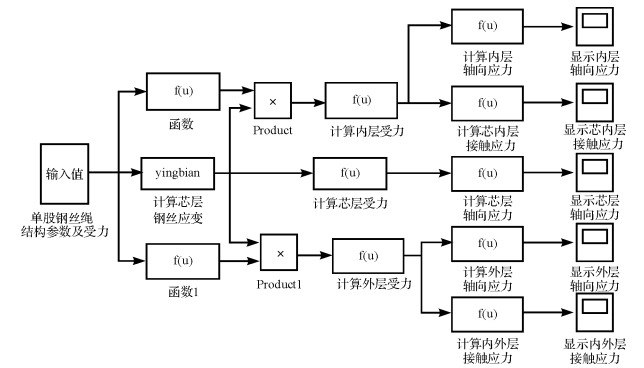


图 4 单股电梯曳引钢丝绳受力模型

2.1 单股电梯曳引钢丝绳应力

根据电梯曳引钢丝绳的受力模型,得到结果如表 2、表 3 所示。

表 2 单股(侧股)电梯曳引钢丝绳计算结果	
计算项目	侧股
芯层轴向力/N	111.724 9
内层轴向力/N	96.751 5
外层轴向力/N	48.748 3
芯层与内层接触应力/(N·mm ⁻²)	427.187 6
内层与外层接触应力/(N·mm ⁻²)	385.331 4

表 3 电梯曳引钢丝绳计算结果			
参数	侧股轴 向力/N	接触应力 /(N·mm ⁻²)	第四强度 /(N·mm ⁻²)
计算值	1 271.3	-600.546 6	823.311 5

由表 2 可知,对于侧股电梯曳引钢丝绳来说,芯层钢丝的轴向力最大,其次是内层钢丝的轴向力,外层钢丝绳的轴向力最小。对于接触应力来说芯层与内层钢丝的接触应力要大于内层与外层之间的钢丝,所以单股电梯曳引钢丝绳中,芯层钢丝应力集中,也最容易发生磨损,最易失效。其余股(芯股和侧股)各个钢丝轴向力、接触应力的规律与该股钢丝是一致的。

2.2 整根电梯曳引钢丝绳应力

从表 2 和表 3 的计算结果可知,对整根电梯曳引钢丝绳来说,接触应力大小的顺序:芯股与侧股之间最大,股内芯层与内层之间次之,股内内层与外层之间的最小,发现电梯曳引钢丝绳股与股之间的钢丝磨损最为严重。

2.3 不同的芯层半径对接触应力的影响

本研究对受轴向力 4 500 N,内层和外层钢丝半径分别为 0.6 mm、0.5 mm,芯层钢丝半径为 0.7 mm ~ 1.4 mm 的单股钢丝绳进行分析,得到的结果如图 5 所示,两条曲线分别为芯层—内层及内层—外层钢丝的接触应力情况随芯层钢丝半径变化的情况。

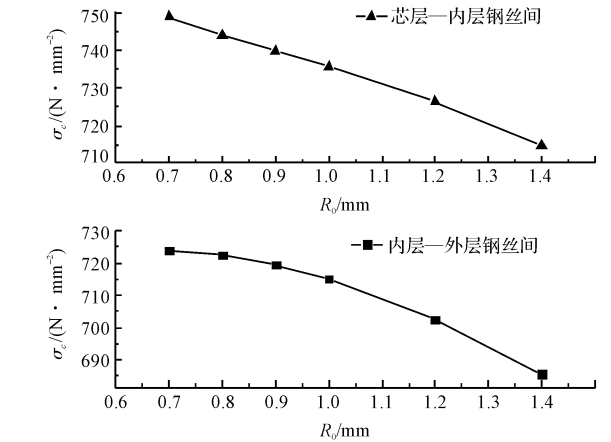


图 5 芯层钢丝半径对接触应力的影响

当芯层钢丝半径从 0.7 mm 变到 1.4 mm,从图 5 可知芯层钢丝与内层钢丝、内层钢丝与外层钢丝的接触应力随芯层钢丝半径增大而减少。

因此,在设计电梯曳引钢丝绳时采用的芯层钢丝半径比侧线钢丝的半径要大,这可改善内部应力的分布,增强其强度和大大延长其寿命,也可防止在磨损过程中由于芯层钢丝半径变小而引起破坏。

2.4 不同的内层半径分析对接触应力的影响

本研究对受轴向力 4 500 N,芯层和外层钢丝半径分别为 0.8 mm、0.5 mm,内层钢丝半径为 0.4 mm ~ 0.75 mm 的单股钢丝绳进行分析,得到的结果如图 6 所示。

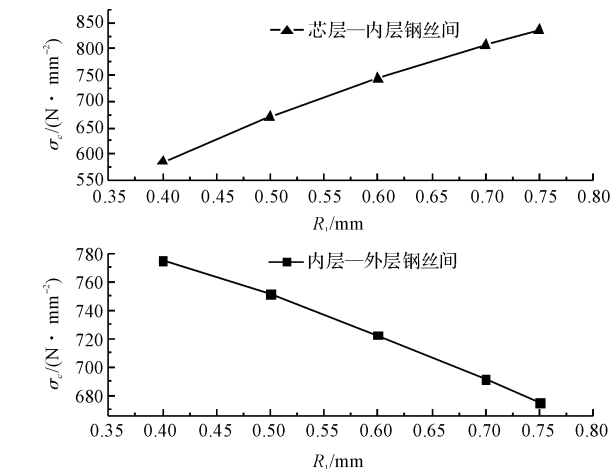


图 6 内层钢丝半径对接触应力的影响

当内层钢丝半径从 0.4 mm 变到 0.75 mm,从图 6 可知芯层钢丝与内层钢丝的接触应力随着内层钢丝半径增大而增大,内层钢丝与外层钢丝的接触应力随着内层钢丝半径增大而减少。

因此在设计绳股时,通过在一定范围内选较大的内层钢丝半径,可使内、外层钢丝的接触应力减少,同时使各层钢丝的接触应力趋于均匀,延长使用寿命。

2.5 不同的外层半径对接触应力的影响

本研究对受轴向力 4 500 N, 芯层和内层钢丝半径分别为 0.8 mm、0.6 mm, 外层钢丝半径为 0.2 mm ~ 0.6 mm, 的单股钢丝绳进行分析, 得到的结果如图 7 所示。

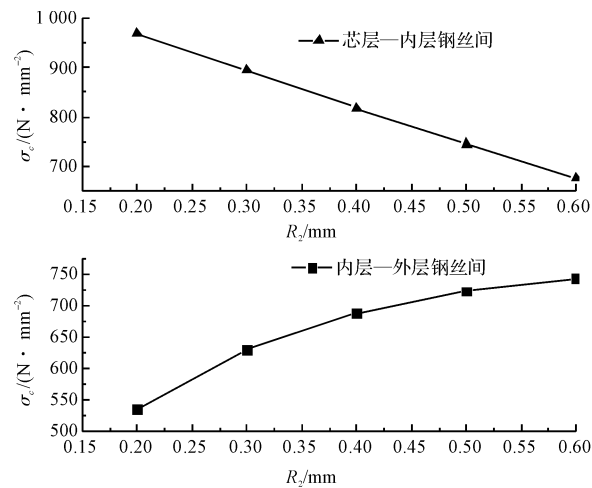


图 7 外层钢丝半径对接触应力的影响

当外层钢丝半径从 0.2 mm 变到 0.6 mm, 从图 7 可知芯层钢丝与内层钢丝的接触应力随外层钢丝半径增大而减少, 而内层钢丝与外层钢丝的接触应力随外层钢丝半径增大而增大。

因此, 在一定范围内选择较大的外层钢丝半径, 这样可以使得芯内层钢丝的接触应力减少, 同时使各层钢丝之间接触应力趋于均匀, 从而大大延长了电梯曳引钢丝绳的寿命。

3 电梯曳引钢丝绳拉伸实验

3.1 拉伸实验

拉伸实验主要是用来考核钢丝的抗拉强度。该实验采用 SHT4 型微机控制电液伺服万能试验机 (如图 8 (a) 所示) 对钢丝绳进行静态拉伸实验。该试验机主要由主机、液压源、DCS 控制器、计算机数据处理系统部分组成。

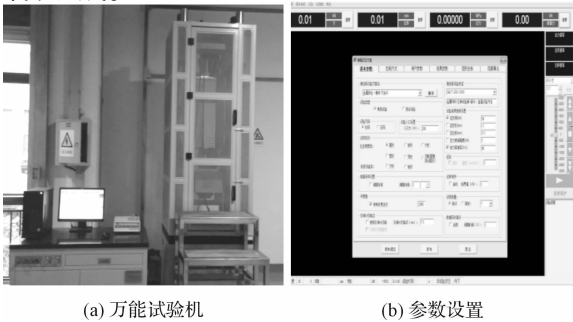


图 8 微机控制电液伺服万能试验机及基本参数设置

主运动驱动是由电机供电驱动液压泵通过伺服阀推动主油缸及活塞运动, 从而拉压夹具。

电梯钢丝绳的绳头组合是采用自锁紧楔型, 安装好钢丝绳后, 进入试验窗口, 设计试验参数, 给钢丝绳加载, 拉伸一段时间之后, 拆下钢丝绳, 先对钢丝绳进行拆股并观察分析。

该试验采用位移控制方式, 按照位移速度 30 mm/min, 加载力到 58 000 N, 引伸计的切换采用手动形式, 试验入口力前将采用开度运行, 其开度值为 200 N, 参数设置界面如图 8 (b) 所示。本研究按上述实验要求对直径 10 mm 8 × 19 麻芯钢丝绳进行拉伸实验。

从图 9 反映了钢丝在拉伸过程中弹性阶段和上、下屈服点, 由实验得知其拉破断力是 45.838 kN。

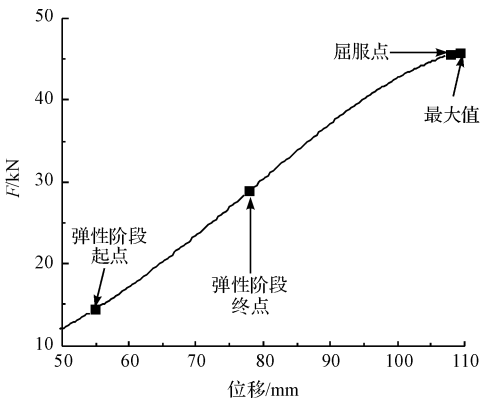


图 9 力随位移的变化 (特征点说明)

3.2 实验结果分析

从电梯钢丝绳拉伸试验的过程中看, 本研究在最后将要拉断的时候, 有力值下降的过程, 停机观察钢丝绳, 刚开始力有下降, 说明有断丝, 发现外层表面钢丝未断裂, 可以断定有内部有钢丝断裂, 但随着时间推移, 钢丝表面出现断裂, 最后整股钢丝断裂。钢丝某一阶段以及拉断后情况如图 10 所示。从断裂的顺序可以间接验证前面理论的接触应力大小顺序的正确性。

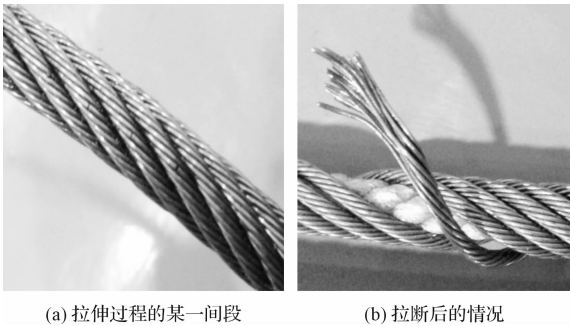


图 10 钢丝某一阶段以及拉断后情况

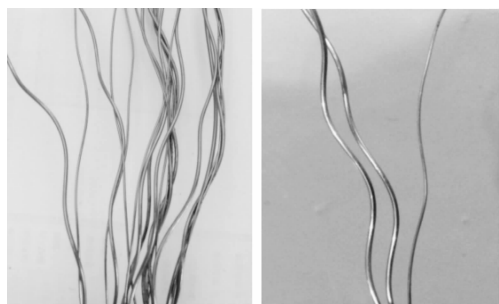
从前面分析可知, 电梯曳引钢丝绳受力作用时, 由于其各层受力不均, 芯股 (麻芯) 与侧股间的钢丝接触

应力大,对于侧股来说,芯层与内层钢丝之间接触应力相对于内层与外层之间要大一些。理论上,由于电梯曳引钢丝绳股间的接触应力大,其内部润滑条件不好,电梯曳引钢丝绳在接触应力下,其将发生较大的磨损。为进一步验证理论分析钢丝绳内部磨损的正确性,本研究对试验后的电梯曳引钢丝绳样绳,将其进行拆股试验,以分析其内部磨损情况。笔者用螺丝刀拆开,电梯曳引钢丝绳解剖图如图 11 所示。



图 11 电梯曳引钢丝绳解剖图

单股钢丝绳解剖图如图 12 所示。



(a) 单股钢丝绳解剖图

(b) 局部钢丝表面

图 12 单股钢丝绳解剖图及局部钢丝表面情况

该电梯曳引钢丝绳为麻芯结构,工况试验后,本研究取一股未断裂的钢丝观察分析,其外表面有磨损;在侧股与芯股接触处,侧股外层表面不光滑,有较深磨损点,用手触摸有刺感比较粗糙(电梯曳引钢丝绳解剖图如图 11 所示);在侧股中芯层与内层钢丝接触处,芯层与内层钢丝接触处磨损较为严重,有磨损点(单股钢丝绳解剖图及局部钢丝表面情况如图 12 所示);内层与外层钢丝之间磨损量相对较小,外层钢丝只在与麻芯钢丝接触处存在磨痕,其磨痕深度较深,这磨损情况与计算的结果是一致的,进一步说明电梯曳引钢丝绳受力分析理论的正确性。

4 结束语

本研究对单股 1×19 结构和整根 8×19 结构的电梯曳引钢丝绳建立力学模型,并进行了力学分析。对于单股电梯钢丝绳(1×19):芯层钢丝的轴向力最大,其次是内层钢丝的轴向力,外层钢丝绳的轴向力最小;其芯层与内层钢丝的接触应力大于内层与外层之间的钢丝。对于 8×19 结构的电梯曳引钢丝绳(绳芯为麻芯):芯股与侧股之间最大,侧股内芯层与内层之间次之,侧股内内层与外层之间的最小;并且通过电梯曳引钢丝绳拉伸后拆股实验验证其理论的正确性,同时分析了单股各层钢丝半径对接触应力的影响,为后续的电电梯钢丝绳设计及研究奠定基础。

由于该研究未考虑同层钢丝之间接触情况,下一步将通过有限元等方法进行深入研究。

参考文献 (References):

- [1] ERDONMEZ C, IMRAK C E. A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads[J]. *Sadhana*, 2011, 36(6): 995-1008.
- [2] USABIAGA H, PAGALDAY J M. Analytical procedure for modelling recursively and wire by wire stranded ropes subjected to traction and torsion loads[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(21): 5503-5520.
- [3] STANOVA E, FEDORKO G, FABIAN M, et al. Computer modelling of wire strands and ropes Part I: Theory and computer implementation[J]. *Advances in engineering software*, 2011, 42(6): 305-315.
- [4] 王晓宇,王雷,孟祥宝. 圆股钢丝绳几何建模与力学分析的探讨[J]. *矿山机械*, 2013(9): 55-60.
- [5] 孙建芳. 钢丝绳捻制成形数值模拟与制品力学强度分析[D]. 武汉:华中科技大学塑性成形模拟与模具技术国家重点实验室, 2004.
- [6] 刘玉辉,寇子明,吴娟,等. 单捻钢丝绳股内钢丝应力分布研究[J]. *矿山机械*, 2014, 42(2): 45-48.
- [7] 许波波. 摩擦提升首绳力学分析[J]. *煤矿现代化*, 2013, (2): 81-83.
- [8] COSTELLO G A. *Theory of wire rope*[M]. Berlin: Springer, 1997.
- [9] FEYRER K. *Wire ropes*[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [10] 陈杰. *Matlab 宝典*[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

尤光辉,张宪,钟江,等. 电梯曳引钢丝绳力学分析及实验研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(11): 1412-1417.

YOU Guang-hui, ZHANG Xian, ZHONG Jiang, et al. Mechanical analysis and experimental research of elevator traction rope[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(11): 1412-1417.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>