

改善牵引绞盘绳槽减张力性能 的超声辅助电镀方法

赖贞华¹, 舒欣¹, 葛攀², 朱鹏程², 赵忠^{2*}

(1. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门, 448035;
2. 江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: **目的** 改善牵引绞盘绳槽摩擦力, 优化牵引绞盘绳槽对缆绳张力的释放性能, 防止其断裂磨损。**方法** 采用超声辅助电镀改性方法, 在绞盘绳槽表面镀覆纳米晶镍涂层, 设计多级变摩擦系数绳槽, 改善绞盘绳槽缆绳张力释放效果。采用超声辅助电镀方法改善纳米晶镍镀层的晶体结构, 明晰镀层晶体结构对绳槽摩擦系数的影响规律, 在绳槽表面镀覆不同摩擦系数的镀层, 均化缆绳张力衰减率。**结果** 超声辅助电镀方法能够优化镀层晶粒尺寸, 改善绳槽摩擦系数, 避免缆绳张力集中。研究表明, 超声功率从 0 W 增大到 300 W 时, 镀层晶粒尺寸从 19.1 nm 增大到 35.1 nm。绳槽与缆绳摩擦系数从 0.09 增大到 0.23。负载为 20 kN、摩擦包角为 3π 时, 定摩擦系数绳槽缆绳张力为 7.6 kN, 缆绳张力衰减率为 62%; 变摩擦系数绳槽缆绳张力为 11.6 kN, 缆绳张力衰减率为 41%。与定摩擦系数绳槽相对比, 变摩擦系数绳槽前 3 道绳槽张力衰减率减小 21%, 缆绳张力衰减均匀。**结论** 超声辅助电镀改性方法能够改善绞盘绳槽减张力性能, 避免缆绳张力突变, 有效保护缆绳, 防止其断裂磨损。

关键词: 牵引绞车; 缆绳张力; 超声辅助电镀; 摩擦系数; 绞盘绳槽

中图分类号: TG174.441 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2025)11-0074-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.11.006

Ultrasonic Assisted Electroplating Method for Improving Tension Reduction Performance of Drive Traction Winch Cable Groove

LAI Zhenhua¹, SHU Xin¹, GE Pan², ZHU Pengcheng², ZHAO Zhong^{2*}

(1. China Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen 448035, China;

2. Jiangsu University of Science and Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangsu Zhenjiang 212100, China)

ABSTRACT: The cable-dragging winch serves as a pivotal component in deep-sea exploration. Given the harsh and demanding conditions encountered in deep-sea environments, the materials and design of the winch, particularly the cable grooves, play a crucial role in ensuring the integrity and longevity of the cables used. Currently, many winch cable grooves are constructed from stainless steel, which is favored for its strength and resistance to corrosion. However, a

收稿日期: 2024-10-11; 修订日期: 2025-05-06

Received: 2024-10-11; Revised: 2025-05-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1802300)

Fund: National Key R&D Program of China (2018YFB1802300)

引文格式: 赖贞华, 舒欣, 葛攀, 等. 改善牵引绞盘绳槽减张力性能的超声辅助电镀方法[J]. 表面技术, 2025, 54(11): 74-82.

LAI Zhenhua, SHU Xin, GE Pan, et al. Ultrasonic Assisted Electroplating Method for Improving Tension Reduction Performance of Drive Traction Winch Cable Groove[J]. Surface Technology, 2025, 54(11): 74-82.

*通信作者 (Corresponding author)

significant challenge arises due to the uniform friction coefficients present across multiple cable grooves. This uniformity can lead to uneven distribution of frictional forces when the cable is subject to tension, which ultimately contributes to premature wear and breakage at the interface between the cable and the winch. This research addresses the pressing issue of uneven frictional force distribution that results in the degradation of cables during operation. Specifically, the paper presents a novel approach utilizing ultrasonic-assisted electroplating to modify the surface properties of the winch cable grooves, and create a variable friction coefficient across the cable grooves, thereby reducing the overall tension experienced by the cable during deployment and retrieval processes. By minimizing sudden fluctuations in cable tension, this innovative approach aims to significantly enhance the operational reliability of deep-sea exploration equipment. The methodology involves conducting a series of ultrasonic-assisted electroplating experiments to apply nickel (Ni) coatings to the stainless-steel surfaces of the winch. The process begins with meticulous preparation of the winch surfaces to ensure optimal adhesion and uniformity of the electroplated layer. After the plating process, XRD is employed to analyze the crystal size of the nickel coating. This microstructural analysis is critical as it provides insights into the mechanical properties of the coating, which directly influence the frictional behavior at the interface with the cable.

Following the characterization of the coatings, friction tests are performed to measure the friction coefficients at the interface between the modified winch cable grooves and the cable. These tests are vital in assessing how the modifications affect the interaction between the winch and the cable during practical operating conditions. Additionally, load-bearing experiments are conducted to evaluate the tension-reducing effects of the modified winch under controlled conditions. The experimental results reveal a significant correlation between the ultrasonic power applied during electroplating and the resulting properties of the nickel coating. Specifically, as the ultrasonic power increases from 0 W to 300 W, the grain size of the nickel coating grows substantially from 19.1 nm to 35.1 nm. This change in grain size is associated with a marked increase in the friction coefficient between the modified groove and the cable, rising from 0.09 to 0.23. Furthermore, at a load of 20 kN, the modified winch demonstrates a 21% reduction in the tension decay rate of the cable within the first three grooves compared with the unmodified version.

Based on the Bowden's friction theory, the study discusses the underlying friction mechanisms at play in the modified winch, providing a theoretical framework to understand how the modifications contribute to improved performance. The findings indicate that the proposed ultrasonic-assisted electroplating method not only enhances the friction characteristics of the winch cable grooves but also plays a critical role in preventing sudden changes in cable tension, thereby reducing the risk of cable breakage and wear. In conclusion, this research presents a significant advancement in the design and functionality of winch systems used in deep-sea exploration. By addressing the issues of frictional force distribution and cable tension fluctuations, the proposed method offers a promising pathway to enhance the reliability and durability of cables in demanding underwater environments. This work lays a ground for future innovations in winch design and deep-sea technology, ultimately contributing to the efficiency and safety of marine research operations.

KEY WORDS: winch; cable tension; ultrasonic assisted electroplating; friction coefficient; winch cable grooves

拖曳绞车收放有缆深潜器对于深海科考具有重要意义^[1-3]。其中, 牵引绞车将缆绳高张力转化为低张力, 是拖曳绞车的核心部件^[4-5]。然而, 牵引绞车绳槽中摩擦力分配不均问题容易导致缆绳断裂磨损。此问题严重制约了我国有缆深潜探测技术的发展。

为了解决缆绳断裂磨损问题, 研究者们从绞车控制、结构设计和表面处理等几方面进行了研究, 取得了一定的进展。在绞车控制方面, 西班牙科鲁纳大学 Luis 等^[6]通过电机同步控制改善了船舶系泊绞车缆绳的恒张力收放作业。挪威科技大学 Chu 等^[7]通过液压控制对船舶拖网缆绳进行恒张力控制实现了被动

补偿。韩国汉阳大学 Seo 等^[8]采用船舶位移控制对缆绳张力进行调节, 适用于带载悬停场合。中国石油大学喻开安等^[9]针对深海铺管绞车大牵引力设计了钢丝绳双滚筒绞车, 避免了缆绳的相互挤压。江苏科技大学赵忠等^[10]设计了双驱动牵引绞车, 改善了牵引绞车缆绳传动问题。

以上研究改善了牵引绞车缆绳传动过程, 但牵引绞车缆绳张力集中的问题依然存在。为了解决此问题, 研究者们针对绞盘结构做了进一步的研究。其中, 双绞盘偏斜角度安装方法^[11]能够避免绳槽侧壁有害摩擦。光槽与摩擦槽间隔设计法^[12]有效避免初级绳槽摩擦系数过大导致的大张力衰减率断绳问题, 但此方

法增加了缆绳弯曲次数,降低了其疲劳强度。张力线性衰减法^[13]能够将缆绳张力均布于绳槽中,但逐级绳槽摩擦系数设计不满足防滑要求。张力指数型衰减法^[14]逐级绳槽摩擦系数均相同,但亦存在初级绳槽缆绳张力衰减率较大的问题。此外,吉林大学连建设课题组^[15]和西南大学聂朝胤团队^[16]通过优化镍基合金镀层中钴合金含量(20%~80%),实现了0.8~1.3变摩擦系数镍钴合金镀层的制作,变摩擦系数纳米颗粒复合镀层成功应用于轴承表面性能的改善。普通低碳钢基体的摩擦系数高达0.7,掺杂MoS₂颗粒镍钨镀层能够使其摩擦系数降至0.14~0.27,进一步扩大了摩擦系数的可用范围^[17]。在船舶甲板防滑应用方面,Al₂O₃颗粒复合涂层能够在提高甲板摩擦系数的基础上减小钢缆的磨损,延长缆绳使用寿命^[18]。但是目前将镀层应用于绞盘表面绳槽改性,改善缆绳张力集中的研究较少。

目前,镀层的电镀方法包括调节电流密度法、添加剂法和超声辅助法等^[19-21]。增大电流密度能够细化晶粒,提高镀层表面质量。但较大的电流密度会提高镀层应力导致界面结合不牢,较小的电流密度虽然能够增大晶粒尺寸但电镀效率较低,且容易引起析氢反应导致镀层氢脆开裂。在溶液中加入添加剂能够改善电镀液的润湿性,但有些添加剂诸如氰化物会污染环境。因此,需要探寻新的方法来改善镀层质量和摩擦系数。以往的研究中发现,超声辅助方法能够提高电镀效率,促进氢元素的排出,降低镀层应力,调节晶粒尺寸从而改变摩擦系数^[22-23]。然而,目前采用超声辅助电镀方法改善绞盘绳槽的减张力性能研究还鲜有报道。因此本研究采用超声辅助电镀方法调节镀层晶粒尺寸的大小,制作变摩擦系数镀层,进而改善牵引绞车绳槽的减张力性能。

基于上述分析,本研究从调节绳槽与光电复合电缆之间的摩擦系数的角度出发,创新性地采用超声辅助电镀方法对牵引绞盘绳槽表面进行电镀改性,改善绞盘绳槽摩擦系数。设计超声电镀试验,通过XRD方法测量镀层晶粒尺寸,采用摩擦试验测量绳槽摩擦系数,分析镀层晶粒尺寸对绳槽摩擦系数的影响规律,通过缆绳收放试验验证超声辅助电镀方法改善绞盘减张力性能。

1 绞盘绳槽表面电镀改性试验

牵引绞车的绞盘由不锈钢合金制成。绳槽为U形。光电复合电缆直径为16.5 mm,绞盘直径为 $\phi 650$ mm,绳槽采用超声辅助电沉积。电镀溶液的组成为: NiCl₂ (10 g/L)、Ni(NH₂SO₃)₂·4H₂O (550 g/L)、润湿剂 (0.1 g/L)、H₃BO₃ (35 g/L)。该溶液的pH值约为4.0。超声频率为100 kHz。超声功率为0~250 W。超声功率是影响电镀层晶粒尺寸的重要因素,由于超声去极化作用,在一定超声功率范围内,镀层晶粒尺

寸会随着超声功率的增大而增大。相关超声辅助电镀研究表明,在超声频率为40 kHz时,超声功率由0 W增大到200 W时,平均晶粒尺寸由21.2 nm增大到27.5 nm^[24]。因此,采用6组不同的超声功率进行电镀。每一级绳槽的安排为:第一级绳槽的超声波功率为0 W,摩擦系数为 μ_1 ;第二级绳槽的超声波功率为50 W,摩擦系数为 μ_2 ;第三级绳槽的超声波功率为100 W,摩擦系数为 μ_3 ;第四级绳槽的超声波功率为150 W,摩擦系数为 μ_4 ;第五级绳槽的超声波功率为200 W,摩擦系数为 μ_5 ;第六级绳槽的超声波功率为250 W,摩擦系数为 μ_6 。

试验步骤如下:首先对绞盘表面进行清洗,采用氮气吹干。第一级绳槽电镀时,其他绳槽采用封蜡技术覆盖,然后利用挂件将绞盘浸入电镀槽中,采用直流电源进行电镀,电流密度为1 A/dm²,电镀时间为30 min,超声功率为0 W。第一级绳槽电镀完成后,将绞盘取出清洗然后烘干。第二级绳槽电镀时,其他绳槽采用封蜡技术覆盖,然后进行电镀,电流密度为1 A/dm²,电镀时间为30 min,超声功率为50 W。采用不同超声功率依次重复电镀步骤,直至六级绳槽电镀完成。牵引绞车绳槽超声辅助电沉积改性的试验过程如图1所示。

镍镀层中的平均晶粒尺寸可以根据Scherrer公式进行计算^[25]:

$$D = K\lambda / (B \cdot \cos \theta) \quad (1)$$

式中: D 为晶粒尺寸; λ 为X射线的波长; B 为衍射峰的半高宽; θ 为衍射角度; K 为Scherrer常数, K 取决于晶体的类型和形状。采用摩擦试验机(FTM M30)测量光电复合电缆与涂层之间的摩擦系数。往复行程为10 mm,往复频率为10 Hz,平均移动速度为10 mm/s。选用线性加载方式,法向加载力为0~150 N。在室温下进行60 min的摩擦试验。

2 结果与讨论

2.1 镀层晶粒尺寸对绳槽摩擦系数的影响

不同超声功率下的衍射图谱如图2所示。晶粒细化导致X射线衍射峰宽化,利用衍射峰的半高宽可以测量晶粒尺寸,由于镍镀层的(111)晶面衍射峰峰值最高,因此选取镍的(111)晶面来计算晶粒尺寸的大小^[26]。取3次重复试验的平均结果作为晶粒尺寸的试验结果,其值列于表1中。

晶粒尺寸随超声功率变化的趋势如图3所示。从图3可以看出,镍镀层的晶粒尺寸随着超声功率的增大而增大,超声功率为0 W时,晶粒尺寸为19.1 nm。超声功率为250 W时,晶粒尺寸为35.1 nm。相对于0 W时,超声功率为250 W时晶粒尺寸增大了16 nm。晶粒尺寸的增大可能由超声带来的去极化效应引起。去极化效应会减小极化过电位,极化过电位又是决定

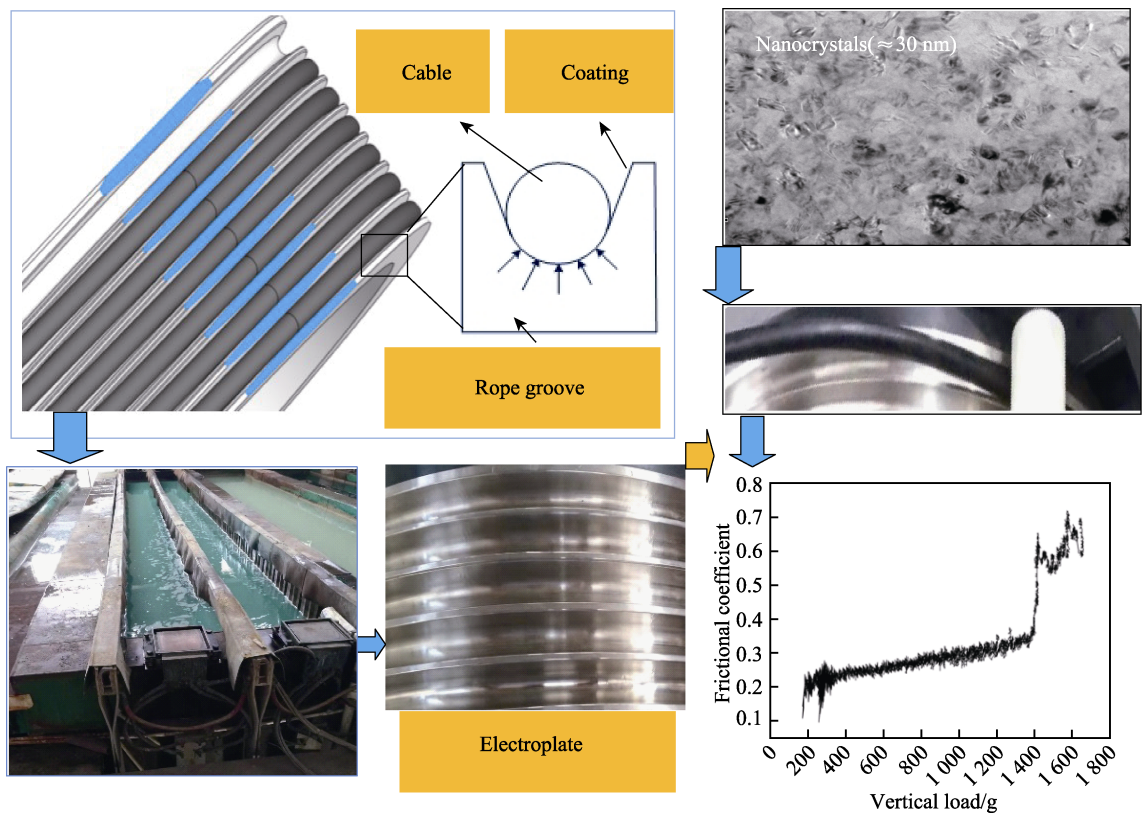


图 1 绞车绳槽改性电镀试验过程
Fig.1 Experimental process of modified electroplating of winch cable groove

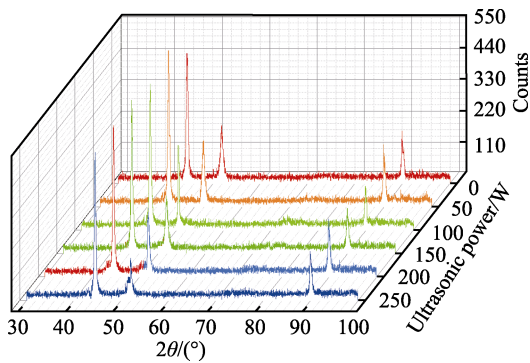


图 2 不同超声功率下的衍射图谱
Fig.2 Diffraction patterns under different ultrasound power

晶粒尺寸的重要因素。晶体的形核率与阴极极化过电位 η 的关系为^[27]:

$$\omega = K \exp\left(-\frac{\pi h \gamma^2 A}{F_0 k \rho n \eta T}\right) \quad (2)$$

式中: γ 为表面能; ρ 为沉积金属密度; h 为原子高度; A 为沉积金属的原子量; n 为沉积金属离子的价态数; K 为常数; F_0 为法拉第常数; k 为布尔斯曼常数; T 为热力学温度。由公式 (2) 可知, 当过电位较小时, 晶体的形核率较低, 沉积层的晶粒尺寸会变大。因此, 超声功率较大时极化过电位较小, 较小的极化过电位会减小晶体形核率从而增大晶粒尺寸, 因此可得超声功率亦影响摩擦系数的大小。

表 1 晶粒尺寸测量结果
Tab.1 Results of crystal size

Ultrasonic power/W	FWHM 2 θ /(°)	Crystal size/nm	Average size/nm
0	0.183	20.6	19.1
	0.192	19.2	
	0.186	17.5	
50	0.156	22.4	22.5
	0.151	21.8	
	0.167	23.3	
100	0.134	27.2	25.4
	0.129	23.8	
	0.146	25.2	
150	0.108	28.7	30.1
	0.091	32.3	
	0.086	29.3	
200	0.088	31.2	32.7
	0.082	34.5	
	0.079	32.4	
250	0.088	33.9	35.1
	0.075	36.2	
	0.069	35.2	

在超声电镀之后对镀层进行摩擦系数试验测量。采用摩擦试验机 (FTM M30) 测量光电复合电缆与不同超声功率下镍镀层之间的摩擦系数, 缆绳镶嵌于绞

盘的绳槽中, 缆绳直径为 6 mm, 与绳槽宽度大小一致, 二者的接触方式为线接触。取 3 次试验的平均结果作为摩擦系数的试验结果, 其值列于表 2 中, 摩擦系数曲线如图 4 所示。

摩擦系数随超声功率变化的趋势如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 摩擦系数随超声功率的增大而增大。摩擦系数的变化主要是因为超声功率增大了晶粒尺寸, 从而增大了摩擦系数。晶粒尺寸对摩擦系数的影响如图 6 所示。

晶粒尺寸对摩擦系数的影响可根据 Bowden 摩擦理论 (式 (3)) 来分析^[28]。

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3)$$

式中: μ 是摩擦系数; F 是摩擦力; N 是施加的法向载荷。摩擦力 F 为^[28]:

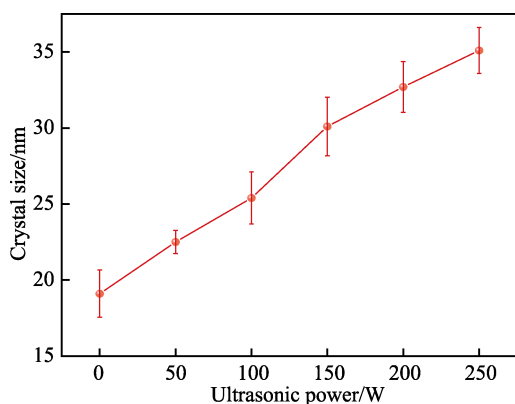


图 3 超声波功率对晶粒尺寸的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic power on crystal size

表 2 摩擦系数测量结果
Tab.2 Results of friction coefficient

Ultrasonic power/W	Friction coefficient	Average friction coefficient
0	0.093	0.091
	0.091	
	0.087	
50	0.110	0.110
	0.107	
	0.113	
100	0.155	0.155
	0.146	
	0.149	
150	0.167	0.170
	0.175	
	0.168	
200	0.184	0.189
	0.196	
	0.188	
250	0.225	0.229
	0.231	
	0.233	

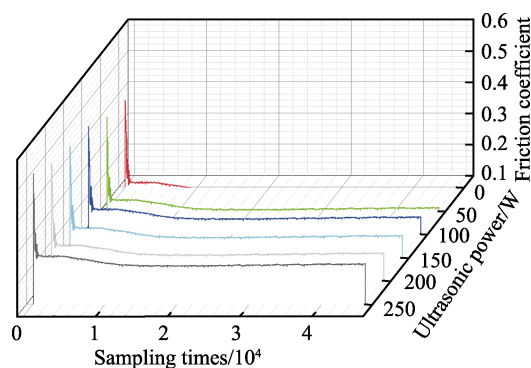


图 4 摩擦系数试验曲线

Fig.4 Experimental curve of friction coefficient

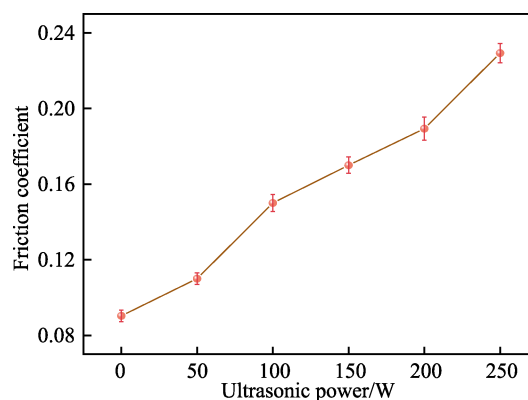


图 5 超声波功率对摩擦系数的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic power on friction coefficient

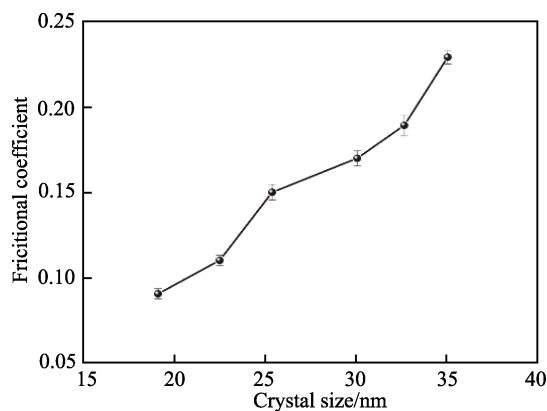


图 6 晶粒尺寸对摩擦系数的影响

Fig.6 Effect of crystal size on friction coefficient

$$F = A[k\tau_s + (1-k)\tau_f] \quad (4)$$

式中: A 表示涂层表面上晶粒的接触面积; 是电缆的剪切强度; τ_f 是涂层内部的剪切强度; k 是晶粒上微凸体和缆绳表皮之间的接触面积与总面积之比。施加的法向载荷 N 可以表示为^[29]:

$$N = A[k\sigma_s + (1-k)\sigma_f] \quad (5)$$

式中: σ_f 是金属涂层的屈服强度; σ_s 是金属涂层和电缆外皮之间的接触应力。因此, 根据公式 (4) 和公式 (5), 得到摩擦系数 μ ^[30]:

$$\mu = \frac{k\tau_s + (1-k)\tau_f}{k\sigma_s + (1-k)\sigma_f}$$

(6)

晶粒尺寸对屈服强度的影响可以表示为^[30]:

$$\sigma_f = \sigma_0 + \frac{f}{\sqrt{d}}$$

(7)

式中： σ_f 是金属沉积层的屈服强度； σ_0 是滑移面上位错运动的应力； f 是常数； d 是晶粒尺寸。从公式（7）可以看出，随着晶粒尺寸的增加，金属沉积层的屈服强度降低。从公式（6）可以看出，屈服强度的降低能够提高摩擦系数。因此，超声增大了晶粒尺寸，晶粒尺寸的增大降低了镀层的屈服强度，屈服强度的降低能够提高摩擦系数。

因此可得，把绞盘绳槽分别置于 0、50、100、150、200、250 W 的超声功率下进行电镀，不同超声功率使得每道绳槽的镀层晶体尺寸不同，镀层晶粒尺寸不同使得每道绞盘绳槽的摩擦系数均不相同，从而实现了变摩擦系数的目标。

2.2 绳槽摩擦系数对缆绳张力的影响

牵引绞车上的摩擦力是每圈缆绳紧边和松边之间张力差的总和。电缆、绞车松边和紧边张力分析^[31]:

$$\Delta F = F_S^i - F_L^i$$

(8)

$$\Delta T = T_S^i - T_L^i$$

(9)

根据欧拉公式^[32]:

$$F_S^i = F_L^i \cdot e^{\mu\delta}$$

(10)

$$T_S^i = T_L^i \cdot e^{\mu\delta}$$

(11)

$F_L^i = T_S^i$ 、 $F_S^{i+1} = T_L^i$ 、 $F_Z = T_S^1$ 、 $T = F_S^{n_0-1}$ ，其中 $i=1$ 、2、3、4、5、6； δ 为包角； μ 为摩擦系数； F_S^i 为绞盘绳槽 II 的紧边张力； F_L^i 为绞盘绳槽 II 的松边张力； T_S^i 为绞盘绳槽 I 的紧边张力； T_L^i 为绞盘绳槽 I 的松边张力； F_Z 为牵引绞车负载端（进绳端）张力； T 为牵引绞车尾端（出绳端）张力； n_0 为绞车绳槽数。张力之间的关系公式为^[32]:

$$F_S^i = F_Z e^{-2(i-1)\mu\delta}$$

(12)

$$T_S^i = F_Z e^{-2(i-1)\mu\delta}$$

(13)

根据以上分析，缆绳的张力衰减变化规律满足欧拉方程。缆绳的张力仅受缆绳与绳槽之间的摩擦包角 δ 和摩擦系数 μ 的影响。因此，当绳槽摩擦包角固定时，多级绳槽的摩擦系数成为影响张力衰减效果的重要因素^[33]。根据公式（12）与公式（13），采用数值分析法计算在定摩擦系数为 0.18 的情况下每个绳槽中缆绳的张力衰减如表 3 所示。

表 3 缆绳张力衰减的变化（ $\mu=0.18$ ）
Tab.3 Changes in tension attenuation of cable ($\mu=0.18$)

Number of rope groove	Tension at the entrance end of the rope groove cable/kN	Tension at the cable outlet end of the rope groove/kN	Cable wrapping angle
The first rope groove of winch II	20	11.361 7	π
The first rope groove of winch I	11.361 7	6.454 4	2π
The second rope groove of winch II	6.454 4	3.666 6	3π
The second rope groove of winch I	3.666 6	2.083 0	4π
The third rope groove of winch II	2.083 0	1.183 3	5π
The third rope groove of winch I	1.183 3	0.672 2	6π
The fourth rope groove of winch II	0.672 2	0.381 9	7π
The fourth rope groove of winch I	0.381 9	0.216 9	8π
The fifth rope groove of winch II	0.216 9	0.123 2	9π
The fifth rope groove of winch I	0.123 2	0.070 0	10π
The sixth rope groove of winch II	0.070 0	0.039 8	11π
The sixth rope groove of winch I	0.039 8	0.022 6	12π

定摩擦系数情况下张力衰减趋势如图 7 所示。从图 7 中可以看出，前 3 级绳槽衰减了近 80%的张力值，张力衰减率较大。前 3 级绳槽中缆绳张力衰减较大会导致缆绳张力分布不均，缆绳容易产生磨损。因此，有必要调整绳槽与光电复合电缆之间的摩擦系数。根据公式（12）与公式（13），采用数值分析法计算在变摩擦系数影响下每个绳槽中缆绳张力的衰减如表 4 所示。

变摩擦系数影响下的缆绳张力衰减图如图 8 所示。从图 8 可以看出，变摩擦系数绳槽能够减小缆绳张力衰减率，绳槽缆绳的衰减率为^[33]:

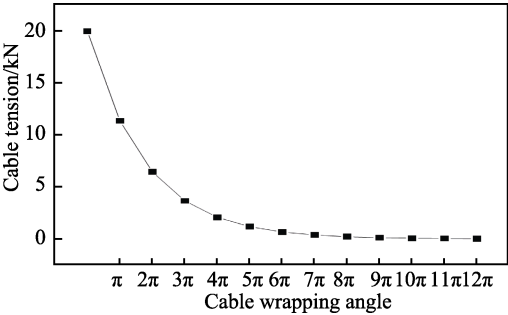


图 7 恒定摩擦系数下电缆的张力衰减
Fig.7 Tension attenuation of cables under constant friction coefficient

表 4 变摩擦系数下电缆张力衰减的变化

Tab.4 Changes in tension attenuation of cables under variable friction coefficient

Number of rope groove	Tension at the entrance end of the rope groove cable/kN	Tension at the cable outlet end of the rope groove/kN	Friction coefficient
The first rope groove of winch II	20	15.074 3	0.09
The first rope groove of winch I	15.074 3	11.361 7	
The second rope groove of winch II	11.361 7	7.092 3	0.11
The second rope groove of winch I	7.092 3	5.020 0	
The third rope groove of winch II	5.020 0	1.895 6	0.15
The third rope groove of winch I	1.895 6	1.183 3	
The fourth rope groove of winch II	1.183 3	0.475 8	0.17
The fourth rope groove of winch I	0.475 8	0.278 9	
The fifth rope groove of winch II	0.278 9	0.092 9	0.19
The fifth rope groove of winch I	0.082 9	0.051 1	
The sixth rope groove of winch II	0.051 1	0.007 1	0.23
The sixth rope groove of winch I	0.007 1	0.003 4	

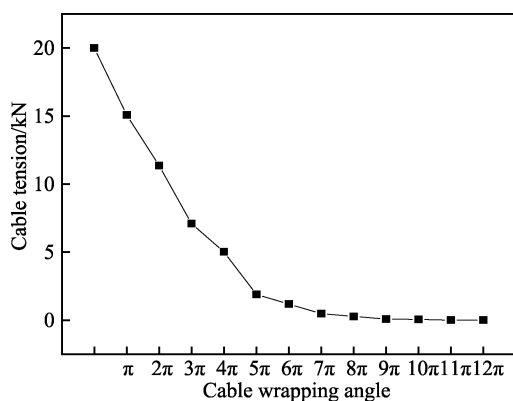


图 8 可变摩擦系数下电缆的张力衰减
Fig.8 Tension attenuation of cables under variable friction coefficient

$$\eta = \frac{(T_i - T_{i+1})}{T_i} \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4, 5) \quad (14)$$

式中: η 是衰减率, T 为缆绳张力。根据公式(14)可得前 3 级绳槽衰减了 64% 的缆绳张力值。与定摩擦系数相比, 缆绳张力衰减率变低, 缆绳张力在绳槽中的分布更加均匀。这有利于保护缆绳, 有效降低缆绳的磨损。

3 绳槽摩擦系数对缆绳张力影响试验验证

采用缆绳拖曳试验研究摩擦系数对减张力性能的影响。试验分为 2 组。第一组采用定摩擦系数(摩擦系数 0.18)的牵引绞车, 第二组采用变摩擦系数绞车。试验参数为: 负载 20 kN, 收缆速度 12 m/min。利用张力传感器测量缆绳张力, 负载试验设备如图 9 所示。电缆张力的试验结果如表 5 所示。



图 9 电缆收放试验设备
Fig.9 Cable retraction experiment equipment

图 10 为不同摩擦包角下张力衰减曲线。从图 10 可以看出, 定摩擦系数绳槽与变摩擦系数绳槽中缆绳张力都随着摩擦包角的增加而减小。但在相同摩擦包角的情况下, 变摩擦系数绳槽缆绳张力衰减率较小。当摩擦包角为 3π 时, 定摩擦系数绳槽中缆绳张力为 7.6 kN 且缆绳张力衰减率为 62%, 变摩擦系数绳槽中缆绳张力为 11.6 kN 且缆绳张力衰减率为 41%。与定摩擦系数绳槽相比, 变摩擦系数绳槽缆绳张力衰减率降低约 21%。较小的缆绳张力衰减率有利于缆绳张力在绳槽中的均匀分布, 并减少缆绳表面的磨损。

此外, 定摩擦系数绳槽与变摩擦系数绳槽中储缆端即最后一道绳槽中缆绳的张力亦有不同。当缆绳包角为 12π 时, 定摩擦系数绳槽中最后一道绳槽的张力为 1.1 kN, 变摩擦系数绳槽中最后一道绳槽的张力为 2.2 kN。相对于定摩擦系数绳槽, 变摩擦系数绳槽中最后一道绳槽的缆绳张力较大。最后一道绳槽中保留较大的缆绳张力能够保持缆绳拉紧状态, 这有利于后续储缆绞车中缆绳的有序缠绕。

表 5 不同摩擦包角下电缆张力衰减的变化
Tab.5 Changes in cable tension attenuation under different friction wrap angles

Number of rope groove	Tension at the cable outlet of the variable friction coefficient rope groove/kN	Tension at the cable outlet of the fixed friction coefficient rope groove/kN	Cable wrapping angle
The first rope groove of winch II	17.5	15.4	π
The first rope groove of winch I	13.2	10.3	2π
The second rope groove of winch II	11.6	7.6	3π
The second rope groove of winch I	9.5	6.8	4π
The third rope groove of winch II	8.4	5.9	5π
The third rope groove of winch I	7.1	5.2	6π
The fourth rope groove of winch II	6.8	4.9	7π
The fourth rope groove of winch I	5.3	4.1	8π
The fifth rope groove of winch II	4.9	3.8	9π
The fifth rope groove of winch I	3.8	3.2	10π
The sixth rope groove of winch II	2.6	2.1	11π
The sixth rope groove of winch I	2.2	1.1	12π

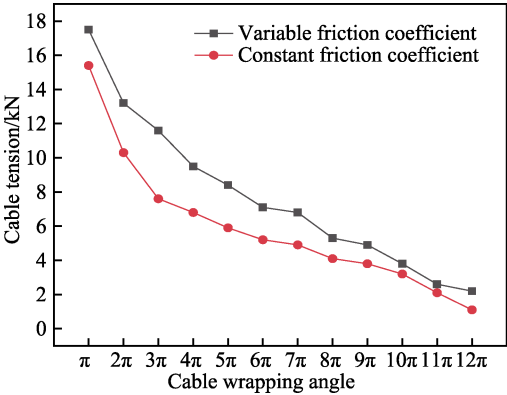


图 10 不同摩擦包角下的张力衰减图
Fig.10 Diagram of tension attenuation under different friction wrap angles

4 结论

- 1) 绳槽摩擦系数的变化趋势与镀层晶粒尺寸的变化趋势一致，调控超声功率的大小可以获得期望的摩擦系数。
- 2) 缆绳负载为 20 kN、摩擦包角为 3π 时，对比未改性绞盘，改性绞盘前 3 道绳槽缆绳张力衰减率降低了 21%。这表明改性绞盘能够有效减小前 3 道绳槽中的缆绳衰减率，防止缆绳断裂磨损。
- 3) 在电镀过程中增大超声功率能够减小阴极极化过电位，增大镀层晶粒尺寸，进而改变摩擦系数。

参考文献：

[1] 万步炎, 彭奋飞, 金永平, 等. 海洋探测装备收放缆力学性能研究综述[J]. 中国机械工程, 2024, 35(9): 1521-1533.
WAN B Y, PENG F F, JIN Y P, et al. A Review of Mechanics Property Studies of Retracting and Releasing Cables for Marine Exploration Equipment[J]. China

Mechanical Engineering, 2024, 35(9): 1521-1533.

[2] 刘江涛. “海洋石油 201” 船 A&R 绞车系统并车同步作业研究[J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(2): 65-67.
LIU J T. Study on Parallel Operation of A&R Winch System of Offshore Oil 201 Ship[J]. Marine Equipment/ Materials & Marketing, 2024, 32(2): 65-67.

[3] 刘晓进, 赵延明, 敬明洋. 电驱动海洋绞车自动排缆控制系统建模与仿真[J]. 机械工程师, 2024(2): 74-78.
LIU X J, ZHAO Y M, JING M Y. Modeling and Simulation of Automatic Cable Arrangement Control System for Marine Winch[J]. Mechanical Engineer, 2024(2): 74-78.

[4] 朱鹏程, 张晴, 张文华, 等. 基于 BP 模糊神经网络 PID 控制的牵引绞车张力控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(21): 137-143.
ZHU P C, ZHANG Q, ZHANG W H, et al. Research on Traction Winch Tension Control Based on BP Fuzzy Neural Network PID Control[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(21): 137-143.

[5] 佟寅, 桑巍. 应用高模量合成纤维缆的深海调查绞车系统设计[J]. 船舶工程, 2020, 42(6): 109-113.
TONG Y, SANG W. Design of Winch System Applying HMSF for Deep Sea Surveys[J]. Ship Engineering, 2020, 42(6): 109-113.

[6] CARRAL L, LARA-REY J, CASTRO-SANTOS L, et al. Oceanographic Research Vessels: Defining Scientific Winches for Fisheries Science Biological Sampling Manoeuvres[J]. Ocean Engineering, 2018, 154: 121-132.

[7] CHU Y G, PEDERSEN B S, ZHANG H X. Virtual Prototyping for Maritime Winch Design and Operations Based on Functional Mock-up Interface Co-Simulation[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(sup1): 261-269.

[8] YOO S, KIM T, SEO M, et al. Modeling and Verification of Multi-Winding Rope Winch for Facade Operation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104105.

[9] 喻开安, 王晓波, 钟朝廷, 等. 用于深水海管铺设的双滚筒绞车设计研究[J]. 石油机械, 2011, 39(2): 41-44.
YU K A, WANG X B, ZHONG C T, et al. Design and Research of Double Drum Winch for Deep-Water Submarine Pipeline Laying[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(2): 41-44.

- [10] 赵忠, 伏圣钊, 李会芳, 等. 深海电动牵引绞车设计与缆绳张力控制[J]. 船舶工程, 2022, 44(1): 148-153.
ZHAO Z, FU S Z, LI H F, et al. Design of Deep Sea Twin Traction System of Electric Optic/Electric Composite Cable Winch to Release the Tension of Photoelectric Composite Cable[J]. Ship Engineering, 2022, 44(1): 148-153.
- [11] MENG L S, LIN Y, GU H T, et al. Study on Dynamic Characteristics Analysis of Underwater Dynamic Docking Device[J]. Ocean Engineering, 2019, 180: 1-9.
- [12] WU J M, CHEN D J. Trajectory Following of a Tethered Underwater Robot with Multiple Control Techniques[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2019, 141(5): 051104.
- [13] 王俊霞, 梁利华, 史洪宇. 光电复合缆绞车牵引系统力学分析[J]. 海洋工程, 2017, 35(3): 125-130.
WANG J X, LIANG L H, SHI H Y. Mechanical Analysis on Traction System of Optic/Electric Composite Cable Winch[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(3): 125-130.
- [14] 王志斌, 朱东华, 沈佳辉, 等. 30000 DWT 散货船码头系泊模型试验[J]. 船舶工程, 2020, 42(8): 55-58.
WANG Z B, ZHU D H, SHEN J H, et al. Dock Mooring Model Test of 30000 DWT Bulk Carrier[J]. Ship Engineering, 2020, 42(8): 55-58.
- [15] SUN S, GAO P, SUN G X, et al. Nanostructuring as a Route to Achieve Ultra-Strong High- and Medium-Entropy Alloys with High Creep Resistance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154656.
- [16] 徐雨生, 丁慧, 向莉, 等. Ni-金刚石复合涂层的厚膜化及其耐磨性研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 223-229.
XU Y S, DING H, XIANG L, et al. Thickening Deposition and Wear Resistance of Ni-Diamond Composite Coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 223-229.
- [17] ALLAHYARZADEH M H, ALIOFKHAZRAEI M, REZVANIAN A R, et al. Ni-W Electrodeposited Coatings: Characterization, Properties and Applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 978-1010.
- [18] 江林峰, 陈雷, 李一新. Al_2O_3 防滑粒料对防滑涂层防滑及磨损性能的影响[J]. 涂料工业, 2014, 44(1): 6-11.
JIANG L F, CHEN L, LI Y X. Effects of Al_2O_3 Nonskid Particles on Antiskid and Wear Performance of Non-Skid Coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(1): 6-11.
- [19] 李文, 魏琪, 南阳, 等. 超高强钢表面电沉积锌-镍合金工艺及镀层性能[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(3): 112-121.
LI W, WEI Q, NAN Y, et al. Electrodeposition and Properties of Zinc-Nickel Alloy Coating on Surface of Ultra-High-Strength Steel[J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44(3): 112-121.
- [20] 李亚强, 李若鹏, 江杰, 等. 芯片金属互连中电镀添加剂的理论及试验研究[J]. 中国科学: 化学, 2023, 53(10): 1970-1988.
LI Y Q, LI R P, JIANG J, et al. Theoretical and Experimental Research on Electroplating Additives in Chip Metal Interconnects[J]. Sci Sin Chim, 2023, 53: 1970-1988.
- [21] 王文亚, 傅波, 黄清宇. 超声辅助电镀的仿真与试验[J]. 应用声学, 2023, 42(5): 938-947.
WANG W Y, FU B, HUANG Q Y. Simulation and Experiment of Ultrasonic Assisted Electroplating[J]. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(5): 938-947.
- [22] 贾卫平, 陈伟荣, 孙垂康. 超声电沉积 Ni-TiN 纳米复合镀层的摩擦磨损性能[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22): 118-120.
JIA W P, CHEN W R, SUN C K. Friction and Wear Properties of Ni-TiN Nanocomposite Coatings Prepared by Ultrasonic Ultrasonic Electrodeposition[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(22): 118-120.
- [23] 郑精武, 陈意顺, 付永成, 等. 无氰电镀液中超声电沉积耐腐蚀纳米晶铜镀层[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 827-834.
ZHENG J W, CHEN Y S, FU Y C, et al. Corrosion-Resistant Nanocrystalline Cu Coating by Ultrasonic Electrodeposition in Cyanide-Free Electrolyte[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(3): 827-834.
- [24] ZHAO Z, DU L Q, TAO Y S, et al. Enhancing the Adhesion Strength of Micro Electroforming Layer by Ultrasonic Agitation Method and the Application[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 33: 10-17.
- [25] 刘娟丽, 吴蓉, 祖一丹, 等. 采用 Rietveld 精修, 谢乐公式以及 Williamson-Hall 法分析不同煅烧温度 TiO_2 的晶粒尺寸[J]. 化工管理, 2023(13): 151-155.
LIU J L, WU R, ZU Y D, et al. Crystalline Size of TiO_2 at Calcination Temperature with by Rietveld Refinement, Debye-Scherrer and Williamson-Hall Method[J]. Chemical Engineering Management, 2023(13): 151-155.
- [26] ZHAO Z, DU L Q, TAN Z C. Influence of Electrodeposited Crystallite Size on Interfacial Adhesion Strength of Electroformed Layers[J]. Micro & Nano Letters, 2014, 9(2): 73-76.
- [27] 程钊, 金帅, 卢磊. 电解液温度对直流电沉积纳米孪晶 Cu 微观结构的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 428-434.
CHENG Z, JIN S, LU L. Effect of Electrolyte Temperature on Microstructures of Direct-Current Electrodeposited Nanotwinned Cu[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(3): 428-434.
- [28] BRAUN O M, PEYRARD M. Friction in a Solid Lubricant Film[J]. Physical Review E, 2001, 63(4): 046110.
- [29] ZHANG X G, KANAPATHIPILLAI S, WU T H, et al. Frictional Behaviour and Friction Mechanisms of Rolling-Sliding Contact in Mixed EHL[J]. Tribology International, 2017, 114: 201-207.
- [30] ZHANG Z, LU W Z, WU B J, et al. Effect of Diamond Grain Size on the Tribological Properties of WS_2 -Based Multilayer Coatings[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 113: 108298.
- [31] CHU Y G, PEDERSEN B S, ZHANG H X. Virtual Prototyping for Maritime Winch Design and Operations Based on Functional Mock-up Interface Co-Simulation[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(sup1): 261-269.
- [32] YOO S, KIM T, SEO M, et al. Modeling and Verification of Multi-Winding Rope Winch for Facade Operation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104105.
- [33] 申阿强, 张冰蔚, 戚永康, 等. 系留气球系统牵引绞盘结构设计及其力学分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(13): 81-84.
SHEN A Q, ZHANG B W, QI Y K, et al. Structural Design and Mechanical Analysis of Traction Winch for Tethered Balloon System[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(13): 81-84.