

某高速船用齿轮箱油泵连接套失效机理研究

王斌¹, 刘演龙¹, 冯健²

(1. 海军装备部驻广州地区军事代表局, 广州 510300; 2. 重庆齿轮箱有限责任公司, 重庆 402263)

摘要: **目的** 掌握工作油泵连接套微观运行机理, 增加齿轮箱的可靠性。**方法** 从齿轮箱系统角度, 对工作油泵连接套的结构进行分析, 从齿轮箱动态运行、连接套微观磨损等方面的失效机理进行深入研究。**结果** 通过分析和验证, 机带泵端面键的间隙范围在 0.05~1.5 mm 左右为最佳, 长期运行后端面的磨损程度可通过增加端面键硬度和润滑、减少齿轮箱的轴系扰动等措施减缓与控制。由于本齿轮箱的结构特点, 端面键的寿命在 1.5 万小时内。在此基础上, 对齿轮箱中连接套与油泵的连接方式进行了优化, 在油泵的一端采用渐开线花键连接, 可有效减小其磨损程度。**结论** 某高速船用齿轮箱油泵连接套失效是由端面键的间隙、端面键动态运转时蠕动磨损、齿轮箱的轴系扰动等引起的, 可通过合理设计端面键的间隙、增加端面键硬度和润滑, 减小轴系扰动或优化为渐开线花键等措施预防。

关键词: 船用齿轮箱; 高速运行; 油泵连接套; 失效机理; 蠕动; 磨损

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.019

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)11-0119-06

Failure Mechanism of Connecting Sleeve of a High-Speed Marine Gearbox Oil Pump

WANG Bin¹, LIU Yan-long¹, FENG Jian²

(1. Military Representative Bureau of Naval Equipment Department in Guangzhou, Guangzhou 510300, China;

2. Chongqing Gearbox Co. Ltd., Chongqing 402263, China)

ABSTRACT: The work aims to master the micro-operation mechanism of the connecting sleeve of the working oil pump and increase the reliability of the gearbox. The structure of the connecting sleeve of the working oil pump was analyzed from the perspective of gearbox system. The failure mechanism of gearbox dynamic operation and micro-wear of connecting sleeve were studied in depth. Through analysis and verification, the optimal clearance range of the machine pump end key was 0.05 mm~1.5 mm. After long-term operation, the end face will have wear, which can be alleviated and controlled by measures such as increasing the hardness and lubrication of the end face key and reducing the shafting disturbance of the gear box. Due to the structural characteristics of the gearbox, the lifetime of the end face key was within 15,000 hours. Based on the above analysis, the connection way between the connecting sleeve and the oil pump in the gear box was optimized, and the involute spline was adopted at one end of the oil pump, which can effectively reduce its wear degree. The failure of high-speed marine gearbox oil pump connector is caused by the end key clearance, end key crawling wear of dynamic motion, shaft disturbance of gearbox etc. Reasonable design of end key tolerance, increasing the the end key hardness and lubrication, and reducing disturbance or opti-

收稿日期: 2020-09-09; 修订日期: 2020-09-28

Received: 2020-09-09; Revised: 2020-09-28

作者简介: 王斌(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备监造。

Biography: WANG Bin (1974—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: equipment supervision.

通讯作者: 冯健(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机械设计与制造。

Corresponding author: FENG Jian (1976—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: emachiney design and manufacture.

mizing the involute spline and other measures can be taken to prevent it.

KEY WORDS: marine gearbox; high-speed operation; oil pump connecting sleeve; failure mechanism; peristalsis; wear

某高速船用齿轮箱使用 10 多年后,发现左机工作油泵连接套断裂,右机连接套磨损正常,远小于左机的磨损。更换左机的连接套后,造成工作油泵快速损坏,引起齿轮箱的润滑系统频繁报警。左机齿轮箱连接套的拆检,发现机带泵的联轴套端面键断裂及磨损(如图 1 所示),带动机带泵的反向轴端面键卡槽磨损痕深约 1 mm,磨损区域平整光滑,并进一步导致了油泵的损坏。右舷齿轮箱机带泵进行拆检,机带泵正常,机带泵联轴套端面键及反向轴端面键卡槽仅有轻微磨损,属于正常现象,如图 2 所示。



图 1 左机联轴套端面键及键槽磨损情况

Fig.1 Wearability of straight end-face key and keyway of the left connecting sleeve



图 2 右机联轴套端面键及键槽磨损情况

Fig.2 Wearability of straight end-face key and keyway of the right connecting sleeve

为了确保船用齿轮箱的安全运行,亟需对油泵连接套的失效机理进行研究,为后续提高其可靠性奠定理论基础。张建平、王新刚、彭朝霞等^[5-7]对刮板输送机中部槽磨损、耐磨性进行了研究。赵洪、董炳武等^[8-13]对限压式变量叶片泵、润滑关节轴承衬垫等机械的摩擦特性、自磨损机理进行了研究。斯松华、范梓良等^[14-20]对钢的磨损特性进行了研究。文中从齿轮箱系统出发,对工作油泵连接套结构进行分析,从齿轮箱动态轴系扰动运行、连接套磨损、以及端面键间隙等方面对其失效机理进行深入研究,为工作油泵连接套结构的可靠性设计提供理论基础。

1 齿轮箱结构和原理介绍

1.1 齿轮箱结构

齿轮箱垂直异心布置,输入轴在上,输出轴在下。齿轮箱结构及其传动原理如图 3 和图 4 所示。由于左右主机的旋转方向一致,均为顺时针,螺旋桨旋向不同,为了形成模块化生产,便于后期的维修,在左右舷齿轮箱设计时,采用相同结构齿轮箱。通过内部离合器的控制来实现左右舷齿轮箱不同的换向要求。

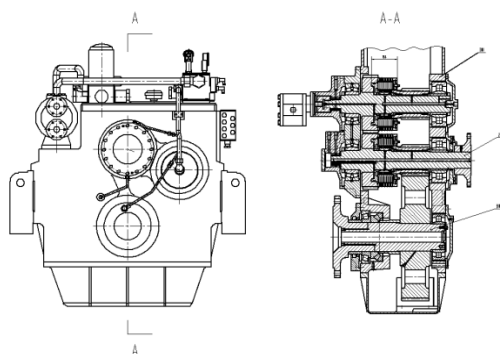


图 3 齿轮箱结构

Fig.3 Diagram of gearbox structure

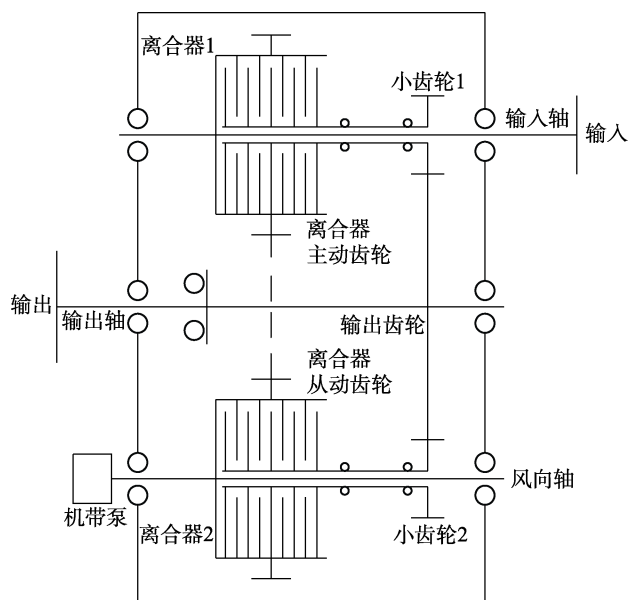


图 4 传动原理

Fig.4 Diagram of transmission theory

齿轮箱左右机功率传递路线不一样,左右机主传动的功率流如下所述。

左机正车时主功率传递路线为:主机→输入轴→离合器 1(接排)→小齿轮 1→输出齿轮→输出轴→桨。

右机正车时主功率传递路线为:主机→输入轴→

离合器 1 (脱排) → 离合器主动齿轮 → 离合器从动齿轮 (与反向轴一体) → 离合器 2 (接排) → 小齿轮 2 → 输出齿轮 → 输出轴 → 桨。

左右机的机带泵功率传递路线为: 主机 → 输入轴 → 离合器主齿轮 → 离合器从动齿轮 → 反向轴 → 机带泵。

1.2 泵连接设计

齿轮箱机带泵采用联轴套与反向轴通过端面键连接的形式, 如图 5 所示。为了防止长期运行过程中端面键快速磨损, 联轴套与油泵连接一端采用平键连接, 另一端采用端面键连接。在设计时将联轴套调质处理、端面键表面局部氮化处理, 提升其耐磨性能。

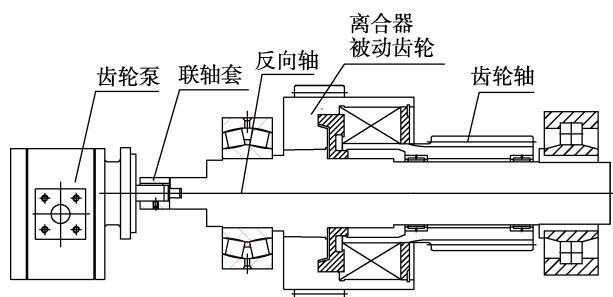


图 5 齿轮箱联轴套连接结构

Fig.5 Connecting structure of gearbox connecting sleeve

额定工况时, 机带泵转速为 1800 r/min, 额定功率为 8.3 kW, 联轴套传递的扭矩为 44 N·m。联轴套与反向轴端面键按全接触情况计算结果: 配合面最大挤压接触应力为 10.5 MPa, 远小于材料许用挤压应力 100 MPa; 联轴套最大应力为 55 MPa, 远小于联轴套屈服强度要求 (≥ 540 MPa); 反向轴连接处最大应力为 38 MPa, 远小于反向轴材料屈服强度 (≥ 665 MPa)。联轴套安全系数为 9.52, 反向轴安全系数为 17.5。可以看出, 连接部位的安全裕度大, 满足设计要求。

2 连接套损坏原因分析

2.1 左右机油泵轴系影响分析

虽然是左右舷齿轮箱结构, 但使用的功能不同和功率传递路线不一致。从功率传递路线可知, 右舷齿轮箱正车工作时, 连接机带泵的反向轴受到齿轮啮合力, 在高速旋转下运行稳定。

左舷齿轮箱正车工作时, 连接机带泵的反向轴没有受到齿轮啮合力。在高速旋转下, 扰动相对高。这样引起连接机带泵的端面键与反向轴的卡槽蠕动加剧, 磨损增大, 从而引起机带泵端面键与反向轴的卡槽间隙在相同运转时间内左舷齿轮箱比右舷齿轮箱大。

2.2 在动态条件下反向轴与机带泵对中分析

工作时, 反向轴通过轴套带动机带泵工作, 轴套

一端通过平键与机带泵输入轴连接, 并通过轴套螺钉固紧, 轴套另外一端通过端面键与反向轴的卡槽连接, 端面键与卡槽通过 0.05 mm 间隙配合。通过反向轴系、机带泵安装止口和联轴套的形位公差、端面键配合间隙来保证在动态条件反向轴与机带泵的对中要求, 使机带泵平稳运行。长期运行后, 联轴套上端面键与反向轴的卡槽配合间隙逐步增大, 最大可达到 4 mm。这样导致动态高速度运转条件下, 反向轴与机带泵严重不对中。

2.3 原因分析

通过上述分析可知, 左舷齿轮箱机带泵和联轴套磨损压溃的直接原因是机带泵与反向轴在动态高速运转时, 联轴套上的端面键与反向轴卡槽的 3 mm 配合间隙引起机带泵与反向轴不对中, 导致机带泵中的齿轮与泵体碰撞, 同时在冲击力下端面键卡爪局部压溃。联轴套上端面键与反向轴卡槽 4 mm 的配合间隙, 是由于联轴套在高速运行中微观上蠕动摩擦, 在长达 1.5 万小时运行后, 逐步形成的。

3 失效机理分析

3.1 端面键间隙影响

理论上, 反向轴与油泵在同一中心线上运转, 但在动态条件下, 由轴承间隙、箱体精度的影响, 油泵中心与反向轴运转中心不在同一轴心线上, 设计时通过端面键间隙进行补偿^[1-2]。间隙太小, 达不到动态补偿的目的; 间隙太大, 则会引起油泵与反向轴之间的运转平稳性差。特别在船用齿轮箱中, 受到船舶摇摆影响, 润滑油波动很大, 引起齿轮油泵运转不平稳, 造成油泵轴与反向轴在端面键处反复碰撞, 间隙越大, 碰撞越剧烈。反过来影响油泵工作状态, 使油泵加速疲劳。

齿轮箱反向轴的轴承径向间隙为 0.26~0.46 mm, 根据齿轮箱反向轴的结构特点, 在端面键处的最大偏心为 0.79 mm。考虑到动态运转以及齿轮泵的特点, 通过试验, 端面键的间隙为 0.05~1.5 mm 左右为最佳。并且端面键径向方向不约束, 导致偏心运转的风险机率增大。

当机带泵与反向轴连接的端面键间隙变大时, 高速运转条件下, 反向轴的扰动增大了机带泵油泵轴的扰动, 会造成反向轴与机带泵不对中的程度增大, 加大了机带泵的负荷。当间隙大到一定程度后, 在泵遇到吸空或其他负荷变化时, 会导致机带泵高速旋转的油泵齿轮与铝制泵体瞬间相碰, 刮伤泵体。在瞬间相碰撞时, 机带泵卡滞, 由于高速冲击影响, 引起负荷异常增大, 导致端面键的卡爪局部压溃, 甚至断裂, 同时引起机带泵损伤。

根据《理论力学》, 刚体绕定轴的转动方程:

$$M=J\alpha \quad (1)$$

式中: M 为瞬时扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; J 转运惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; α 为角加速度, rad/s^2 。

$$\alpha=\Delta\omega/t \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega$ 为角速度瞬间变化值, rad/s ; t 为冲击时间, s 。因此:

$$M=J\cdot\Delta\omega/t=J\cdot(\omega_1-\omega_2)/t \quad (3)$$

式中: ω_1 为齿轮箱反向轴运转角速度, rad/s ; ω_2 为油泵运转角速度, rad/s 。

$$\omega_1-\omega_2=L\cdot\pi/R/180 \quad (4)$$

式中: L 为端面键间隙, mm ; R 为反向轴的半径, mm 。

则瞬间扭矩为:

$$M=J(L\cdot\pi/R/180)/t \quad (5)$$

本齿轮箱反向轴 ω_1 的转速为 1800 r/min , 原则上运转中转速变化很小, 但油泵转速 ω_2 在微观上随着船舶摇摆、油路气蚀等原因, 发生变化, 变化的幅度与间隙密切相关。从式(3)可以看出, 油泵运转中端面键发生微观冲击, 导致端面键的瞬间扭矩大。长时间运转后, 若间隙扩大到齿轮泵的间隙, 则会发生瞬间扭矩大于 540 MPa , 导致端面键断裂。

3.2 端面键蠕动磨损影响

端面键与键槽通过面接触带动油泵工作。机带泵运转时, 端面键与键槽微观上蠕动, 反复进行摩擦。理论上反向轴每旋一次, 则端面键摩擦循环一次。油泵的工作转速为 1800 r/min , 频率为 60 Hz , 每小时蠕动运行 10.8 万次。摩擦必然会产生微量磨损, 同时会产生一定的热量^[3-4]。为了降低磨损速度, 在设计时将端面键氮化, 形成一定的硬度差, 减缓磨损速度。通过润滑端面键可以带走热量, 进一步延缓磨损程度。

3.3 油泵轴系扰动影响

左舷齿轮箱中, 由于反向轴没有参与主传动, 无齿轮啮合力存在, 在 1800 r/min 转速下高速运转, 带着 8.4 kW 齿轮泵运行, 反向轴扰动大。大扰动会导致端面键与键槽的蠕量程度与频次相应增加, 磨损进一步加快。通过左右舷齿轮箱的磨损情况对比(图6)可知, 经过 1.6 万小时运行后, 左舷齿轮箱端面键磨损 1 mm , 反向轴槽磨损深度达 3 mm 。端面键间隙由 0.05 mm 扩大到 4 mm 。右舷齿轮箱端面键磨损 0.5 mm , 反向轴槽磨损深度达 1 mm 。端面键间隙由 0.05 mm 扩大到 1.5 mm 。

油泵轴系扰动除了与齿轮箱运转时受力有关, 还有齿轮箱的运行工况和使用环境有关。齿轮箱有高工况运行时, 齿轮箱的振动能量会加大, 轴系扰动程度越高, 引起连接键的蠕动频率越高, 导致磨损速度加快。随着船舶的横摇和纵倾, 船用齿轮箱的润滑油在齿轮箱的油底壳中波动, 导致机带泵运行不平稳, 也

会引起油泵轴系扰动, 尤其是持续风浪中工作的船用齿轮箱扰动更大, 相应蠕动引起的磨损会加剧。

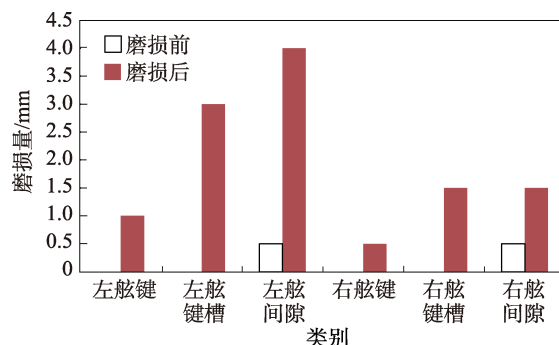


图6 1.6万小时磨损情况

Fig.6 Histogram of wear extent in 16,000 hours

3.4 端面键润滑影响

考虑到油泵轴系的扰动、动态运行时的蠕动不可避免, 通常对于高速运行的动态连接键, 通过润滑减缓磨损。润滑方式主要有脂润滑、油浴润滑和强制润滑三种, 润滑效果逐步减小。由于脂润滑在高速运行后, 时间不长, 润滑效果不佳, 往往是低速间断性运行条件的润滑方式; 油浴润滑也是在中速度间断性运行的润滑方式; 强制润滑是高速连续运行的润滑方式。

本次齿轮箱设计结构紧凑, 油泵的运行转速为 1800 r/min , 连续运行。首次装配时加脂润滑, 后续运行时只能依靠齿轮箱运转的飞溅润滑油进行润滑, 实际效果没有达到端面键的磨损需要。蠕动后温度相对高, 无法充分带走热量。长期运行后, 端面键磨损加剧。

4 预防措施

4.1 优化连接结构

鉴于船用齿轮箱的运行特点以及轴系对油泵连接套的影响, 为了进一步提高连接套的可靠性, 延长寿命, 将其结构调整: 机带泵采用联轴套与反向轴通过渐开线连接的形式, 如图7所示。即连接套与油泵一端采用渐开线花键连接, 连接套与反向轴采用平键小过盈配合连接。

优化后的花键连接结构特点为: 将端面键的端面摩擦变为多面磨损, 进一步降低蠕动的磨损量。同时可以降低磨损后对中不良的影响, 有效防止长期运行过程中端面键磨损间隙增大带来的风险, 一定程度上可以降低轴系的扰动对油泵的影响, 增加了油泵连接套的维修性。通过实船验证, 油泵花键连接方式磨损速度远小于端面键的磨损速度。

4.2 优化润滑方式

鉴于油泵高速运行, 飞溅润滑无法满足端面键

润滑需求, 将飞溅润滑优化为强制润滑, 从反向轴增加油路, 将压力为 0.2 MPa 的润滑油用来润滑渐开线花键。

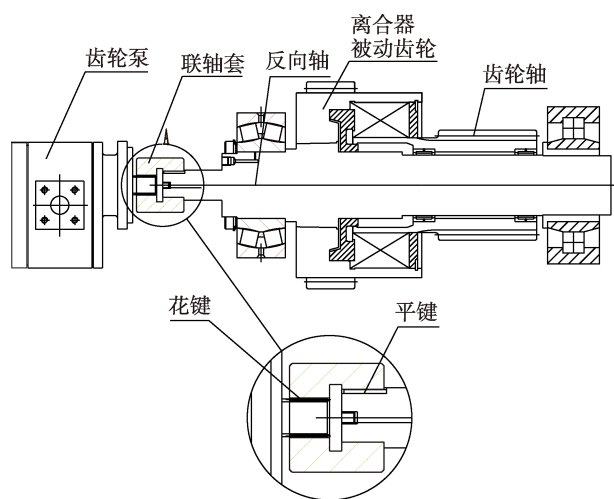


图 7 联轴套与反向轴的渐开线连接型式

Fig.7 Involute connecting type of connecting sleeve and inversion axis

5 结论

船用齿轮箱的油泵连接形式, 在特殊的使用环境下, 会造成连接端面键快速磨损甚至断裂。文中针对船用齿轮箱结构特点, 研究了端面键间隙和微观蠕动对端面键磨损的影响, 对其失效机理进行了分析。

1) 某高速船用齿轮箱油泵连接套失效与端面键的间隙有关, 间隙过大, 将引起油泵轴系对在动态下发生变化。

2) 某高速船用齿轮箱油泵连接套失效与端面键动态运转时蠕动磨损有关, 而蠕动磨损速度与端面键硬度、润滑方式直接相关。

3) 某高速船用齿轮箱油泵连接套失效与齿轮箱的轴系扰动有关, 可通过优化为渐开线花键连接方式减少轴系扰动。

4) 在后续需要对油泵连接方式在船用齿轮箱蠕动条件下可靠性指标进行深入分析, 对其寿命进行试验验证, 为后续装备可靠性的提高奠定基础, 为全寿命周期装备保障提供理论基础。

参考文献:

[1] 李小天, 李小龙, 朱荣生. 矿井瓦斯泵泵轴磨损的原因分析及解决措施[J]. 煤矿机械, 2012, 33(4): 219-220.
LI Da-tian, LI Xiao-long, ZHU Rong-sheng. Reasons and Solutions of Pump Axle Abrasion of Mine Gas Drainage Pump[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(4): 219-220.
[2] 姚振强, 张雪萍, 俞亚波, 等. 机轿车后轮轴承磨粒磨损失效特性与产生机理[J]. 机械科学与技术, 2002,

21(3): 363-365.

YAO Zhen-qiang, ZHANG Xue-ping, YU Ya-bo, et al. On Abrasive Wear Mechanism of Automobile Rear-wheel Bearings[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(3): 363-365.

[3] 卢凤山. 活塞环常见的几种故障[J]. 山东农机化, 1994(7): 27.

LU Feng-shan. Several Common Faults of Piston Ring[J]. Shangdong Agricultural Mechanization, 1994(7): 27.

[4] 高德利, 黄文君, 刘永升, 等. 钻柱力学与套管磨损预测若干研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(4): 1-9.

GAO De-li, HUANG Wen-jun, LIU Yong-sheng, et al. Some Research Advances in Drill String Mechanics and Casing Wear Prediction for Well Engineering[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020, 6(4): 1-9.

[5] 张建平. 刮板输送机中部槽耐磨复合中板的应用[J]. 煤矿机电, 2015(6): 107-109.

ZHANG Jian-ping. Application of Wear-Resisting Compound Middle Plate for Scraper Conveyor[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2015(6): 107-109.

[6] 王新刚, 梁爱国. 刮板输送机中部槽与刮板链的磨损分析及对策[J]. 煤矿机械, 2015, 36(5): 109-111.

WANG Xin-gang, LIANG Ai-guo. Wear Analysis and Counter Measures of Scraper Conveyor Central Groove and Scraper Chain[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(5): 109-111.

[7] 彭朝霞. 提高刮板输送机中部槽耐磨性的研究[J]. 山西焦煤科技, 2015(4): 52-53.

PENG Zhao-xia. Study on Improving the Wear Resistance of Scraper Conveyor in Middle Trough[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2015(4): 52-53.

[8] 赵洪, 祝迎春, 刘潺, 等. 限压式变量叶片泵摩擦特性的研究[J]. 制造技术与机床, 2008(8): 129-132.

ZHAO Hong, ZHU Ying-chun, LIU Chan, et al. Research on Friction Characteristic of Pressure-limiting Variable Vane Pump[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(8): 129-132.

[9] 董炳武, 邓四二, 张文虎. 自润滑关节轴承衬垫磨损机理研究[J]. 智能制造, 2020(8): 50-53.

DONG Bin-wu, DENG Si-er, ZHANG Wen-hu. Research on Wear Mechanism of Liner of Self-lubricating Joint Bearing[J]. Intelligent Manufacturing, 2020(8): 50-53.

[10] 李维, 杨方亮, 杨晓晨, 等. 控制棒驱动机构传动件耐磨性研究[J]. 科技视界, 2016(12): 25-26.

LI Wei, YANG Fang-liang, YANG Xiao-chen, et al. Research on Abrasion of Driver of CRDM[J]. Science & Technology Vision, 2016(12): 25-26.

[11] 张永强, 李辉, 王珂, 等. 油井管杆偏磨失效分析[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 87-91.

ZHANG Yong-qiang, LI Hui, WANG Ke, et al. Eccentric Wear Failure Analysis of Oil Well Tubing and Sucker Rod[J]. Surface Technology, 2016, 45(8): 87-91.

[12] 徐学利, 王涛, 余晗, 等. 低摩擦速度下 CT80 油管摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2019, 44(2): 66-71.

- XU Xue-li, WANG Tao, YU Han, et al. Friction and Wear Properties of CT80 Tubing under Low Friction Velocity[J]. *Lubrication Engineering*, 2019, 44(2): 66-71.
- [13] 周杰, 吴进军, 易蒙, 等. 海水径向柱塞泵陶瓷摩擦副摩擦学性能研究[J]. *液压与气动*, 2017(10): 23-26.
- ZHOU Jie, WU Jin-jun, YI Meng, et al. Tribological Property for Ceramics Friction Pair of Seawater Radial Piston Pump[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2017(10): 23-26.
- [14] 斯松华, 胡德锐, 钟尧舜, 等. 贝氏体和马氏体耐磨钢的高温磨损性能对比研究[J]. *材料保护*, 2018, 51(5): 61-63.
- SI Song-hua, HU De-rui, ZHONG Yao-shun, et al. Comparative Study on High Temperature Wear Resistance of Bainite and Martensite Wear Resistant Steels[J]. *Materials Protection*, 2018, 51(5): 61-63.
- [15] 范梓良, 梁国星, 宋金鹏, 等. 干摩擦下速度与载荷对 AISI 1045 钢磨损行为的影响[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(10): 73-80.
- FAN Zi-liang, LIANG Guo-xing, SONG Jin-peng, et al. Effects of Sliding Velocity and Normal Load in Dry Sliding Condition on Tribology Behavior of AISI 1045[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(10): 73-80.
- [16] 李一磊. 不同硬度匹配的马氏体耐热钢耐磨性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- LI Yi-lei. Study on Wear Resistance of Martensitic Heat Resistant Steel with Different Hardness Matching[D]. Baotou: Inner Mongolia University Of Science & Technology, 2020.
- [17] 王光宏. 高性能渗氮钢的摩擦磨损特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- WANG Guang-hong. Study on Friction and Wear Characteristics of High Performance Nitriding Steel[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [18] PENG Yu-xing, CHANG Xiang-dong, SUN Shi-sheng, et al. The Friction and Wear Properties of Steel Wire Rope Sliding Against Itself Under Impact Load[J]. *Wear*, 2018, 400-401: 194-206.
- [19] ANTONOV M, AFSHARI H, BARONINS J, et al. The Effect of Temperature and Sliding Speed on Friction and Wear of Si_3N_4 , Al_2O_3 , and ZrO_2 Balls Tested Against AlCrN PVD Coating[J]. *Tribology International*, 2018, 118: 500-514.
- [20] 商剑, 张越, 刘亮. 不同晶粒取向铜与 45 钢配副时的摩擦磨损机制[J]. *材料保护*, 2015, 48(11): 1-3.
- SHANG Jian, ZHANG Yue, LIU Liang. Friction and Wear Mechanism of Copper with Different Grain Orientation and 45 Steel[J]. *Materials Protection*, 2015, 48(11): 1-3.