

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2021.04.017

文献引用: 邹洪伟, 李亚波, 马丽英, 等. S38C 车轴表层梯度材料的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 润滑与密封, 2021, 46(4): 106-110.

Cite as: ZOU Hongwei, LI Yabo, MA Liying, et al. Research on fatigue crack propagation properties of S38C axle surface gradient materials [J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(4): 106-110.

S38C 车轴表层梯度材料的疲劳裂纹扩展性能研究*

邹洪伟¹ 李亚波¹ 马丽英¹ 洪友士²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司工程实验室 山东青岛 266111;

2. 中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 为研究 S38C 车轴表层梯度材料的疲劳裂纹扩展性能, 直接从现车车轴截取试样, 保持实际车轴表层具有的显微组织、硬度及其残余应力呈梯度变化的情况, 采用三点弯曲加载方法, 检测疲劳裂纹在硬化层、过渡层和芯部基体的扩展性能。结果表明, 随着表层裂纹长度的增加, 疲劳裂纹扩展速率呈现先增加后减小最后增加的趋势。通过测量不同表层深度位置的残余应力分布, 发现距车轴表面深度 0~3 mm 内存在较大的残余应力压应力, 使得疲劳裂纹扩展需要更大的驱动力, 而距车轴表面深度 3 mm 后转变为拉应力, 对疲劳裂纹扩展没有影响。

关键词: S38C; 三点弯曲; 残余应力; 裂纹扩展特性

中图分类号: TG113.25

Research on Fatigue Crack Propagation Properties of S38C Axle Surface Gradient Materials

ZOU Hongwei¹ LI Yabo¹ MA Liying¹ HONG Youshi²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong 266111, China; 2. State Key Laboratory of Nonlinear

Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to study the fatigue crack growth characteristics of the gradient material of the surface layer of the S38C axle, the samples of S38C axle were taken directly from the existing axle to maintain the gradient of the microstructure, hardness and residual stress of the actual axle surface. The three-point bending loading method was used to detect the propagation characteristics of fatigue cracks in the hardened layer, the transition layer and the core matrix. It is found that as the crack length increases, the fatigue crack growth rate is increased first then decreased, and finally increased. By measuring the residual stress distribution at different surface depths, it is found that there is a large residual stress compressive stress within 0 to 3 mm from the surface of the axle, which makes the fatigue crack growth need a greater driving force. However, the residual stress changes into tensile stress after 3 mm from the axle surface depth, which has no effect on the fatigue crack propagation.

Keywords: S38C; the three-point bending; residual stress; crack growth characteristics

作为机车车辆中重要的安全部件, 车轴承受车辆

的全部重量。在目前动车组核心部件的检修周期延长的前提下, 对车轴损伤容限和剩余寿命的评估就变得尤为重要^[1]。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (11172304; 11202210)。

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-05-06

作者简介: 邹洪伟 (1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通车辆结构强度试验。E-mail: zouhongwei22@163.com.

通信作者: 洪友士 (1951), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为材料力学性能与内部结构。E-mail: hongys@imech.ac.cn.

CRH2 型动车组采用的车轴基材为日本 S38C 牌号钢^[2]。该列车轴表面经过了感应加热 (感应加热频率 3 kHz)、淬火 (880~900 °C 加热后水冷)、低温回火 (200 °C 回火) 处理, 获得了表面硬化 (强化) 层^[3]。该车轴深度约为 2 mm 的表面层为回火马氏体组织, 从

距表面 2 mm 向里至约 6 mm 的区间为过渡层, 表现为淬火-回火组织以及珠光体+铁素体的混合组织^[2]; 距表面超过 6 mm 以后, 显微组织为珠光体+铁素体, 即正火态组织。该车轴距表层 2 mm 以内的维氏硬度为 HV (551±36); 距表面 2 mm 以外, 显微硬度明显减小, 距表面 2~6 mm 处的维氏硬度约为 HV230, 距表面超过 8 mm 时, 显微硬度波动较小, 平均值约为 HV200, 即为正火态组织的显微硬度^[2]。

具有不同显微组织、不同硬度(强度)的车轴在不同表层深度必然存在着不同的残余应力分布。为研究 S38C 车轴的疲劳裂纹扩展性能, 本文作者从实际车轴截取试样, 保持实际车轴表层具有的显微组织、硬度(强度)及其残余应力呈梯度变化的情况,

研究了表层梯度材料疲劳裂纹扩展特性以及残余应力对疲劳裂纹扩展行为的影响, 以期为 S38C 车轴损伤容限和剩余寿命评估提供依据。

1 试样

1.1 试样设计

试验设计试样为三点弯曲试样, 直接从现车车轴表层获取, 用来测试含硬化(强化)表层的车轴材料的疲劳裂纹扩展性能。参考 GB/T 4161—2007^[4] 标准设计试样尺寸。实际使用的试样形状和尺寸如图 1 所示, 车轴的硬化(强化)表层为试样的受拉侧, 采用线切割技术在受拉侧的中心位置预制 0.5 mm 深的缺口^[5], 用来引导疲劳裂纹起裂和扩展。

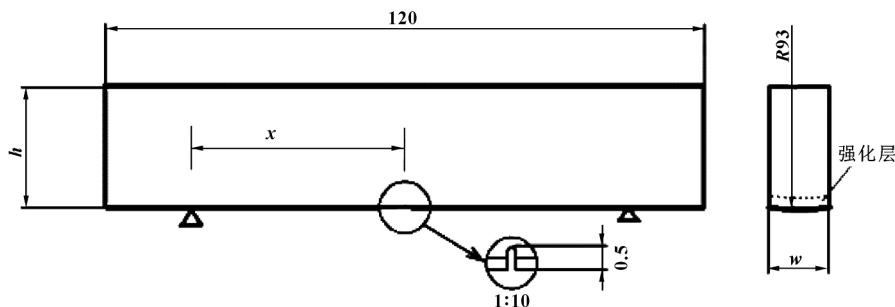


图 1 三点弯曲试样形状和尺寸 (mm)

Fig 1 Three-point bending specimen shape and size (mm)

三点弯曲试样受拉侧表面的名义应力可由式 (1)^[6] 计算得到:

$$\sigma = \frac{3px}{wh^2} \quad (1)$$

式中: σ 为缺口处名义应力; p 为施加载荷; w 为试样宽度; h 为试样高度; x 为半跨距长。

1.2 试样处理

采用磨床对截取的三点弯曲试样的前后侧表面 (20 mm×100 mm) 进行磨平, 粗糙度控制在 $Ra=0.4 \mu\text{m}$ 。对含硬化(强化)层试样表面的 2 个支撑点位置进行磨平, 以确保加载时 2 个支撑点的稳定支撑。

对加工好的试样的侧面中间区域用砂纸研磨, 并进一步用金刚石抛光膏抛光。采用游标卡尺测量加工并研磨好的试样的实际宽度与高度, 加工的 4 种试样的具体尺寸见表 1。

表 1 4 种三点弯曲试样的实际尺寸

Table 1 The actual size of four kinds of three-point bending specimens

试样	宽 w /mm	高 h /mm
1#	10.28	20.96
2#	10.16	20.96
3#	10.30	20.88
4#	10.30	21.30

1.3 试样残余应力分布测试

采用 X 射线应力仪, 分别选取 3 个无缺口试样和 3 个含 0.5 mm 深缺口的试样, 测量试样垂直于车轴表层深度方向的残余应力沿表层深度的分布^[7]。不含缺口的光滑试样与含 0.5 mm 深缺口的试样的残余应力测试结果分别见图 2 和图 3。

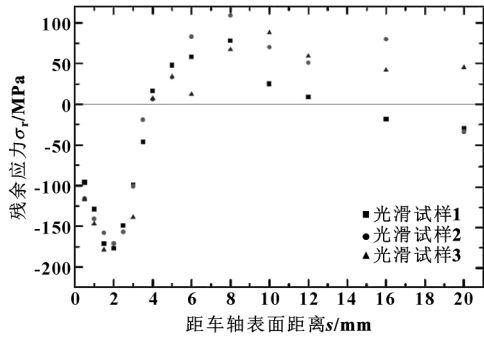


图 2 无缺口试样残余应力沿车轴表层深度的分布
Fig 2 Distribution of residual stress of unnotched specimens along axle surface depth

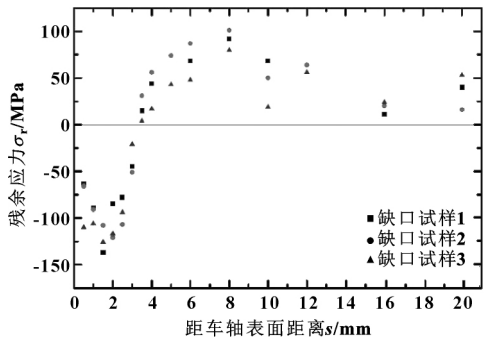


图 3 含 0.5 mm 深缺口试样残余应力沿车轴表层深度的分布
Fig 3 Distribution of residual stress of the specimens with 0.5 mm deep notch along axle surface depth

可以看出, 3 个无缺口的光滑试样和 3 个含 0.5 mm 深缺口的试样的残余应力在距车轴表面 5 mm 内分散性很小, 在 5 mm 后分散性较大的原因应该跟测试精度有关。经过统计分析, 无缺口试样的最大残余应力为 -174 MPa, 距车轴表面 2 mm 处; 含 0.5 mm 深缺口试样的最大残余应力为 -123 MPa (缺口试样释放了部分残余应力), 在距车轴表面 1.5 mm 处。两组试样残余应力均沿深度增加先增加后减小, 在距车轴表面 4 mm 时变为 0, 之后转变为拉应力。含 0.5 mm 深缺口试样的残余应力分布趋势与无缺口试样相同。

2 疲劳裂纹扩展试验方法

2.1 试验方法

采用三点弯曲疲劳加载 (应力比 $R=0.1$), 并采用光学摄像设备观测试样缺口侧面。首先用较小的名义应力预制长度约 0.5 mm 的裂纹, 然后施加疲劳试验载荷, 选取较高的名义应力进行加载, 使疲劳裂纹在此应力下能够一直扩展。试验过程中通过光学摄像设备跟踪疲劳裂纹的扩展^[8], 然后用图像处理软件测量不同加载周次对应的裂纹尺寸, 从而获得疲劳裂纹长度、疲劳裂纹扩展速率和应力强度因子之间的关系

关系^[9-10]。

三点弯曲试样疲劳裂纹的应力强度因子幅值 ΔK 计算公式^[11]为

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{h}\right) \quad (2)$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot$$

$$\frac{1.99 - \frac{a}{h} \left(1 - \frac{a}{h}\right) \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{h} + 2.7 \left(\frac{a}{h}\right)^2\right)}{\left(1 + 2 \frac{a}{h}\right) \left(1 - \frac{a}{h}\right)^{3/2}} \quad (3)$$

式中: ΔK 为应力强度因子幅值; $\Delta \sigma$ 为所施加载荷的名义应力幅值; a 为疲劳裂纹长度; h 为试样高度。

疲劳裂纹扩展速率 (v_f) 采用差分法计算^[12], 如式 (4) 所示, 其中 L_n 为第 N 周裂纹长度, L_m 为第 M 周裂纹长度。

$$v_f = (L_n - L_m) / (N - M) \quad (4)$$

2.2 试验设备

采用 PLG100 高频疲劳试验机和液压式 MTS 疲劳试验机分别对试样进行三点弯曲疲劳加载^[13], 试验时搭建光学测量系统对试样两个侧面进行观察和记录, 监测疲劳裂纹的长度。高频疲劳试验机的试验频率为 140 Hz, 液压式 MTS 疲劳试验机的试验频率为 15 Hz。

3 试验结果及分析

3.1 疲劳裂纹扩展速率数据分析

根据公式 (2) — (4) 计算得到的应力强度因子幅值和疲劳裂纹扩展速率的数据, 然后绘制二者的关系散点图, 如图 4 所示; 图 5 给出了表 1 中 4 个试样按距车轴表面不同深度划分的疲劳扩展速率和应力强度因子幅值的关系。

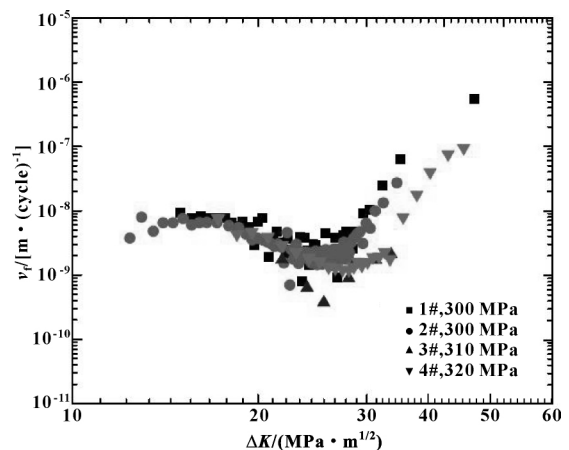


图 4 4 件试样疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅值的关系

Fig 4 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor amplitude of 4 specimens

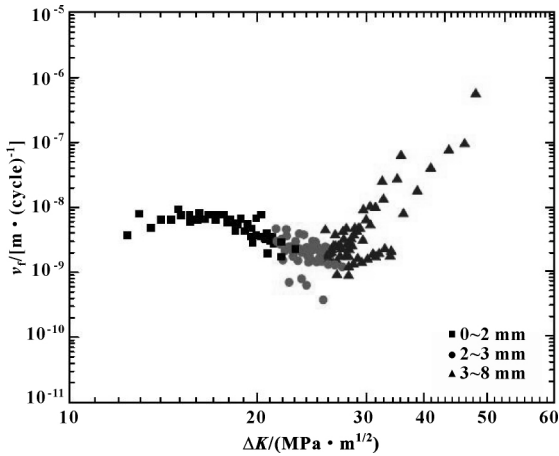


图 5 距车轴表面不同深度疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅值的关系
Fig 5 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor amplitude at different depths from the axle surface

由图 4 和图 5 可以看出, 不同试样的疲劳裂纹扩展速率均呈现先小幅增加, 然后减小, 最后单调增加的趋势。在距车轴表面深度 3~8 mm 范围时, 疲劳裂纹扩展速率随应力强度因子幅值单调增加。在距车轴表面深度 0~2 mm 范围内, 应力强度因子幅值为 12 MPa · m^{1/2} 时, 疲劳裂纹扩展速率为 5 × 10⁻⁹ m/cycle; 随着疲劳裂纹长度增加、应力强度因子幅值增大, 疲劳裂纹扩展速率小幅增加到 1 × 10⁻⁸ m/cycle 后又呈下降趋势。在距车轴表面深度 2~3 mm 处, 随着应力强度因子幅值增大, 疲劳裂纹扩展速率继续降低至 1 × 10⁻⁹ m/cycle 低速扩展, 直到裂纹扩展到距车轴表面深度 3 mm 后, 疲劳裂纹扩展速率随应力强度因子幅值单调增加, 表现出明显的 Paris 区的特征^[14]。

3.2 残余应力对疲劳裂纹扩展影响分析

在疲劳裂纹扩展的过程中, 残余应力对疲劳裂纹扩展速率有重要影响。根据图 2 和图 3 测量的试样残余应力数据分布, 采用式 (5)^[4] 计算了有效应力强度因子。有效应力强度因子与疲劳裂纹扩展速率的关系如图 6 所示。

$$\Delta K_{eff} = \begin{cases} (\sigma_{max} + \sigma_{res}) \sqrt{af} \left(\frac{a}{h} \right) & \sigma_{min} + \sigma_{res} < 0 \\ (\sigma_{max} + \sigma_{min}) \sqrt{af} \left(\frac{a}{h} \right) & \sigma_{min} + \sigma_{res} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

由图 6 可以看出, 距车轴表面深度 0~3 mm 存在较大的残余应力压应力, 从而使疲劳裂纹需要更大的驱动力才能扩展, 而对距车轴表面深度 3 mm 以后残余应力压应力逐步减小并转变为拉应力, 对疲劳裂纹扩展没有影响。残余应力并未改变疲劳裂纹扩展速率

随应力强度因子幅值变化的趋势。

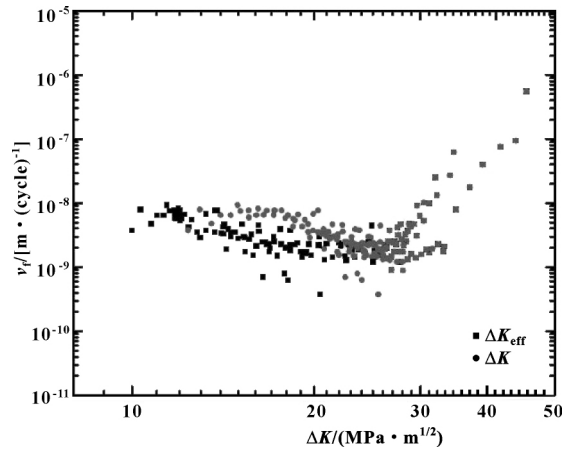


图 6 疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅值 (有效值) 的关系

Fig 6 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor amplitude (effective value)

4 结论

(1) 疲劳裂纹在具有硬化 (强化) 表层的缺口试样中扩展时, 在距车轴表面深度 0~3 mm 内, 随裂纹长度增加, 应力强度因子幅值增大, 疲劳裂纹扩展速率由 5 × 10⁻⁹ m/cycle 增加到 1 × 10⁻⁸ m/cycle, 之后降低至 1 × 10⁻⁹ m/cycle 以下低速扩展, 直到裂纹扩展到距车轴表面深度 3 mm 后, 疲劳裂纹扩展速率随应力强度因子幅值单调增加。

(2) 残余应力分布对疲劳裂纹扩展速率的影响显著。距车轴表面深度 0~3 mm, 存在较大的残余应力压应力, 从而使疲劳裂纹需要更大的驱动力才能扩展, 而对距车轴表面深度 3 mm 以后残余应力压应力逐步减小并转变为拉应力, 对疲劳裂纹扩展没有影响。残余应力并未改变疲劳裂纹扩展速率随应力强度因子幅值变化的趋势。

(3) 文中的研究获取了距车轴表面不同深度时裂纹扩展速度随应力强度因子幅值的变化趋势, 并且根据测试数据得到残余应力分布对疲劳裂纹扩展速度的影响, 为 S38C 车轴损伤容限和剩余寿命评估提供依据。

参考文献

【1】李亚波 杨凯 陈一萍 等.S38C 车轴钢的旋转弯曲和超声振动疲劳性能[J].润滑与密封 2017 42(3): 124-128.
LI Y B ,YANG K ,CHEN Y P ,et al.Rotating bending and ultrasonic vibration fatigue properties of axle steel S38C[J].Lubrication Engineering 2017 42(3): 124-128.
【2】林浩博.高速动车组 S38C 车轴疲劳、裂纹扩展特性及可靠性研究[D].北京: 北京交通大学, 2017.
LIN H B.Study on the fatigue ,crack propansion characteristics

- and reliability of EMU high speed S38C axle [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University 2017.
- 【3】张晓乐,孙成奇,刘小龙,等.车轴材料(S38C)显微组织、显微硬度和(EA4T)小试样疲劳性能[R].北京:中国科学院力学研究所,2013.
- 【4】全国钢标准技术委员会.金属材料 平面应变断裂韧度 KIC 试验方法:GB/T 4161—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- 【5】关凯书,徐一飞,喻灿,等.带环形裂纹的微试样小冲杆试验法测试材料断裂韧性探讨[J].塑性工程学报,2012,19(6):103-108.
GUAN K S, XU Y F, YU C, et al. Determination of material fracture toughness by circular pre-cracked small punch test specimens [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(6): 103-108.
- 【6】束德林.金属力学性能[M].2版(修订版).北京:机械工业出版社,1995.
- 【7】王秋成,柯映林,章巧芳.7075 铝合金板材残余应力深度梯度的评估[J].航空学报,2003,24(4):336-338.
WANG Q C, KE Y L, ZHANG Q F. Evaluation of residual stress depth profiling in 7075 aluminum alloy plates [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 336-338.
- 【8】左永基,刘小刚.超塑性成形 TC4 钛合金的疲劳性能研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(5):59-65.
ZUO Y J, LIU X G. Study on fatigue properties of superplastic forming TC4 titanium alloy [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(5): 59-65.
- 【9】李其棒.航空发动机涡轮盘用 GH4133B 合金疲劳裂纹扩展数值模拟研究[D].湘潭:湘潭大学,2016.
LI Q B. Aeroengine turbine disk GH4133B alloy Fatigue crack propagation numerical simulation study [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- 【10】陈帅,丁康.行星齿轮箱太阳轮裂纹故障仿真及实验研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(5):101-107.
CHEN S, DING K. Simulation and experimental study on crack fault of sun gear of planetary gearbox [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(5): 101-107.
- 【11】TADA H, PARIS P C, IRWIN G R. The stress analysis of cracks handbook [M]. New York: ASME Press, 2000.
- 【12】陆晓燕.316L 钢高温疲劳蠕变共同作用下裂纹扩展速率研究[D].杭州:浙江工业大学,2007.
LU X Y. Studies on crack propagation under fatigue-creep combined action of 316L steel at high temperature [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007.
- 【13】齐祥羽,董营,胡军,等.高强韧低碳中锰钢的弯曲疲劳性能[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(12):1712-1716.
QI X Y, DONG Y, HU J, et al. Bending fatigue property of low-C medium-Mn steel with high strength and toughness [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(12): 1712-1716.
- 【14】BATHIAS C, PINEAU A. Fatigue of materials and structures [M]. London: Wiley-ISTE, 2010.
- (上接第 105 页)
- 【10】蒋海珍,陶德华,王彬.水溶性有机羧酸醇铵盐防锈剂的分子结构与性能关系的研究[J].润滑与密封,2005,30(2):72-74.
JIANG H Z, TAO D H, WANG B. Study of relations between the molecular structures and the rust-inhibiting properties on aqueous soluble organic acid salts [J]. Lubrication Engineering, 2005, 30(2): 72-74.
- 【11】李广宇,孟瑶,马先贵.脂肪酸对微乳化切削液防锈性能影响的研究[J].润滑与密封,2008,33(10):45-48.
LI G Y, MENG Y, MA X G. Study on the effects of fatty acids on the rust-inhibiting properties of microemulsion cutting fluid [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(10): 45-48.
- 【12】祁有丽,苏刚,陈馥婧,等.水溶性聚醚酯摩擦学性能的研究[J].摩擦学学报,2011,31(3):249-254.
QI Y L, SU G, CHEN F J, et al. Tribological studies of a water-soluble polyether ester [J]. Tribology, 2011, 31(3): 249-254.
- 【13】宋扬扬,杨振华,任蕊,等.有机羧酸衍生物防锈性能的研究[J].化学工程师,2015,29(11):13-14.
SONG Y Y, YANG Z H, REN R, et al. Study of organic acid derivatives' anti-rust properties [J]. Chemical Engineer, 2015, 29(11): 13-14.
- 【14】TOMALA A, KARPINSKA A, WERNER W S M, et al. Tribological properties of additives for water-based lubricants [J]. Wear, 2010, 269(11/12): 804-810.
- 【15】祁有丽,苏刚,陈馥婧,等.聚氧乙烯链长对聚醚酯 HLB 值和摩擦学性能的影响[J].润滑与密封,2011,36(3):113-116.
QI Y L, SU G, CHENG F J, et al. Effect of polyoxyethylene chain length on its HLB value and tribological properties [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(3): 113-116.
- 【16】顾军,张朝辉,黄宝成,等.丙二醇无规共聚醚水溶液的摩擦学性能研究[J].机械工程学报,2018,54(1):144-149.
GU J, ZHANG C H, HUANG B C, et al. Tribological properties of propylene glycol random copolyether aqueous solutions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 144-149.
- 【17】谷国平,张朝辉,丁晓峰.椰油酰胺聚氧乙烯醚水溶液的摩擦学性能研究[J].摩擦学学报,2015,35(3):266-273.
GU G P, ZHANG C H, DING X F. Tribological properties of cocamide polyoxyethylene aqueous solutions [J]. Tribology, 2015, 35(3): 266-273.