

35 钢延长拉杆过热断裂原因分析

郭新良, 代克顺, 杨迎春, 虞鸿江, 焦宗寒, 周静波

(云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 延长拉杆是输电线路重要的承载连接金具。结合一起 500 kV 输电线路延长拉杆断裂实例, 通过对延长拉杆进行宏观检测、材料成分检测、室温和高温力学性能检测、不同热处理条件下的金相组织观察、断口形貌观察、通流试验等进行分析, 研究引起延长拉杆过热断裂的原因。结果表明, 当引流线夹接触不良或断开时, 会导致延长拉杆通过大电流后长时间严重发热, 使延长拉杆珠光体组织由层片状结构转变为球状结构, 在导线拉力的作用下延长拉杆发生蠕变, 承载面积减小, 且抗拉强度大大降低, 最终在导线拉力作用下发生断裂。研究结果对线路巡线和引流线夹安装修复工作有一定的指导意义。

关键词: 延长拉杆; 引流线夹; 蠕变; 过热断裂; 输电线路

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.031

中图分类号: TM241

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0216-07

Analysis on reasons of overheating fracture for 35 steel extension rod

Guo Xinliang, Dai Keshun, Yang Yingchun, Yu Hongjiang, Jiao Zonghan, Zhou Jingbo

(Electric Power Research Institute of Yunnan Power Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Extension rod is an important load-bearing connection fitting for transmission lines. Therefore, for an example of an extension rod fracture for 500 kV transmission line, the reasons causing the overheating fracture of extension rod were investigated by macroscopic observation, material composition detection, mechanical performance detection at room temperature and high temperature, metallographic structure observation under different heat treatment conditions, fracture morphology observation and current test of extension rod. The results show that the poor contact or disconnection of jumper conductor clamper causes the extension rod to generate serious heat for a long time owing to passing through large current, the pearlite structure of the extension rod changes from lamellar structure to spherical structure, and creep occurs under the action of wire tension, then the bearing area decreases and the tensile strength has a significant drop, finally fracture occurs on the extension rod under the action of wire tension. Thus, the research provides guide for the line patrolling, installation and repair work of jumper conductor clamper.

Key words: extension rod; jumper conductor clamper; creep; overheating fracture; transmission lines

延长拉杆是高压输电线路中常用的一种连接金具, 主要包括杆体和挂耳两个部分, 采用 35 钢圆柱形配料一体加工制成^[1]。延长拉杆的断裂会造成导线掉落而引起线路跳闸, 影响输电线路的安全和稳定运行。延长拉杆断裂的原因主要有: 材质不合格或结构设计不合理从而导致拉杆的强度不满足设计要求而造成断裂^[2-5]; 运行中发生腐蚀导致有效受力面积减小造成断裂^[6-8]; 在交变载荷的作用下发生疲劳断裂^[9-10]; 运行中温度长时间过高导致组织结构转变、力学性能恶化而发生断裂^[11-15]。

某 500 kV 输电线路在运行中发生故障跳闸, 重合闸送电不成功, 巡线发现线路 11 号耐张塔大号侧 A 相 (上相) 左下子导线连接金具延长拉杆断裂, 一根子导线掉落地面, A 相引流线脱开。本文结合延长拉杆断裂实例, 通过宏观检测、材料成分检测、力学性能检测、不同热处理条件下的金相组织观察、断口形貌观察、通流试验等方法, 对延长拉杆进行检测分析, 探究引起延长拉杆过热断裂的原因, 最后为线路巡线和引流线夹的安装修复工作提出指导建议。

1 试验方法与结果

1.1 宏观检测

对断裂延长拉杆和未断延长拉杆进行宏观观察。断裂延长拉杆的颜色深黑, 拉杆有弯折, 弯折处有脱落的氧化皮; 其余未断延长拉杆的颜色为正常发

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2021-02-16

基金项目: 云南电网科技项目 (YNKJXM20180175)

作者简介: 郭新良 (1971-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 330965365@qq.com

暗的镀锌色，如图 1 所示。断裂延长拉杆的断口有明显的塑性变形，断口颜色呈深黑，且两侧断口均有熔点，熔点应为延长拉杆最后断裂点发生引弧放电所致，如图 2、图 3 所示。断裂延长拉杆的断口处直径为 $\Phi 16.07\text{ mm}$ ，延长拉杆的直径为 $\Phi 22.19\text{ mm}$ ，断口的断面收缩率约为 47.4%。



图 1 更换的延长拉杆图片
Fig. 1 Image of replaced extension rod



图 2 断裂延长拉杆断口附近形貌
Fig. 2 Morphology near fracture of fractured extension rod

图 4 为与断裂延长拉杆连接的支撑杆，支撑杆局部区域发生熔化，表明在运行中支撑杆内部的温度过高，导致螺栓和杆壁发生熔化。支撑杆的成分为铝，而铝的熔点为 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，说明在运行中该部位

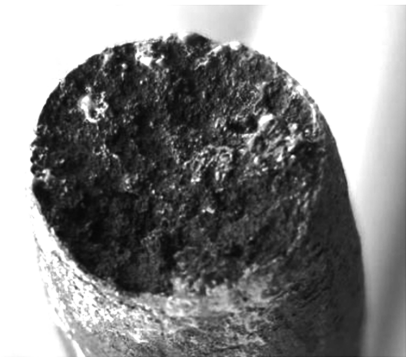


图 3 断裂延长拉杆断口形貌
Fig. 3 Fracture morphology of fractured extension rod



图 4 支撑杆局部熔化形貌
Fig. 4 Local melting morphology of support rod

温度至少达到 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

1.2 成分检测

采用电火花光谱仪，参照 GB/T 4336—2016^[16]，对断裂延长拉杆、未断延长拉杆和新延长拉杆进行材料化学成分检测，检测结果见表 1。延长拉杆的设计材质为 35 钢，材料化学成分检测结果符合材质设计要求。

表 1 延长拉杆的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of extension rod（%，mass fraction）

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
断裂延长拉杆	0.362	0.261	0.686	0.0192	0.0223	0.0182	0.0262	0.0452	余量
未断延长拉杆	0.344	0.260	0.672	0.0172	0.0168	0.0196	0.0301	0.0459	余量
新延长拉杆	0.321	0.249	0.634	0.0335	0.0058	0.0721	0.0109	0.0847	余量
35 钢材质设计要求	0.320~0.390	0.170~0.370	0.500~0.800	≤0.035	≤0.035	≤0.2500	≤0.3000	≤0.2500	余量

1.3 力学性能检测

1.3.1 室温力学性能试验

采用布洛维硬度计，参照 GB/T 231.1—2018^[17] 分别对断裂延长拉杆、未断延长拉杆和新延长拉杆的端部圆环位置进行布氏硬度检测，标尺选用 HB 2.5/187.5，检测结果如表 2 所示。断裂延长

拉杆的布氏硬度检测值为 165.2 HBW，低于未断延长拉杆和新延长拉杆的布氏硬度检测值。

分别取未断延长拉杆和新延长拉杆加工成直径为 $\Phi 10\text{ mm}$ 的圆形截面比例拉伸试样，其中比例系数 k 取值 5.65，参照 GB/T 228.1—2010^[18] 进行室温拉伸试验，试样抗拉强度的检测结果如表 2 所示。

表 2 延长拉杆布氏硬度和室温抗拉强度检测结果

Table 2 Test results of Brinell hardness and tensile strength at room temperature for extension rod

材料	布氏硬度/HBW	抗拉强度/MPa
断裂延长拉杆	165.2	—
未断延长拉杆	175.0	624
新延长拉杆	171.2	620

未断延长拉杆的抗拉强度为 624 MPa, 新延长拉杆的抗拉强度为 620 MPa, 延长拉杆的抗拉强度值满足要求 (不小于 530 MPa)。

参照 GB/T 1172—1999^[19] 的规定可知, 断裂延长拉杆的布氏硬度值对应的抗拉强度估计值在 576~582 MPa 之间, 换算的抗拉强度值满足要求 (不小于 530 MPa)。

1.3.2 高温拉伸试验

取新延长拉杆加工成直径为 $\Phi 10$ mm 的圆形截面比例拉伸试样, 其中比例系数 k 取值 5.65, 参照 GB/T 228.2—2015^[20] 进行高温拉伸试验, 不同温度下试样的抗拉强度检测结果如表 3 所示。图 5 为新延长拉杆不同温度下的抗拉强度曲线图, 由图 5 可知, 随着试验温度的升高, 新延长拉杆的抗拉强度逐渐降低。当试验温度为 300 °C 时, 新延长拉杆的抗拉强度为 605 MPa, 和室温下的抗拉强度相当; 当试验温度升高为 500 °C 时, 新延长拉杆的抗拉强度急剧下降, 抗拉强度值为 343 MPa, 和室温抗拉强度相比降低了 44.7%, 抗拉强度值不满足要求 (不小于 530 MPa); 当试验温度升高至 660 °C, 新延长拉杆的抗拉强度值仅为 110 MPa, 和室温抗拉强度相比降低了 82.3%。图 6 为新延长拉杆不同温度下进行拉伸试验后的照片, 由图 6 可知, 随着温度的升高, 新延长拉杆的颜色逐渐变黑。

表 3 新延长拉杆不同温度下的抗拉强度检测结果

Table 3 Test results of tensile strength for new extension rod at different temperatures

试验温度/°C	23	300	400	500	600	660
抗拉强度/MPa	620	605	546	343	203	110

1.4 金相组织观察

分别取断裂延长拉杆、未断延长拉杆和新延长拉杆试样制备金相试样, 在扫描电镜下进行金相组织观察。延长拉杆的组织为铁素体和珠光体, 如图 7 所示。新延长拉杆和未断延长拉杆的珠光体组织保持层片状结构, 如图 7a、图 7b 所示。断裂延长

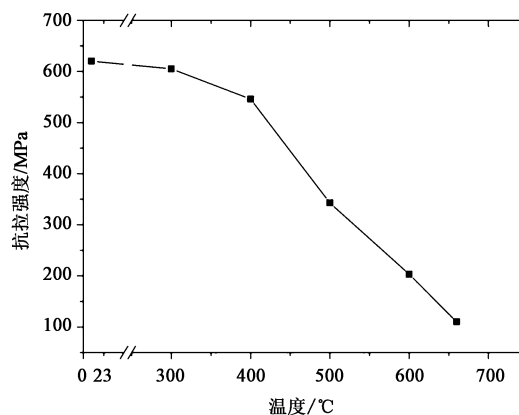


图 5 新延长拉杆不同温度下的抗拉强度曲线

Fig. 5 Curve for tensile strength of new extension rod at different temperatures



图 6 新延长拉杆的高温拉伸试样图片

Fig. 6 Images of specimens for new extension rod in high temperature tensile

拉杆的珠光体组织已完全发生球化, 无层片状特征, 如图 7c 所示。

取新延长拉杆高温拉伸试验后的试样, 分别在相应温度下 (300、400、500、600 和 660 °C) 保温 20 min 后进行金相组织观察。温度在 300~600 °C 时, 试样的珠光体组织仍为层片状结构, 如图 8a、图 8b 所示; 当温度为 660 °C 时, 珠光体层片状结构开始溶解并发生球化转变, 如图 8c 所示。

1.5 断口形貌分析

对断裂延长拉杆的断口进行观察, 断口表面存在光亮区, 亮点呈熔化状, 断口处有明显的颈缩现象, 如图 2、图 3 所示。断口光亮区的微观形貌具有光滑的凹坑, 如图 9 所示; 其余部位的微观形貌具有韧窝特征, 属于韧性断裂, 如图 10 所示。对断口的光亮区域和韧窝区域进行能谱分析 (表 4), 结果显示, 光亮区域中 C 元素含量高于韧窝区域, 这主要是由于光亮区域发生熔化造成的。

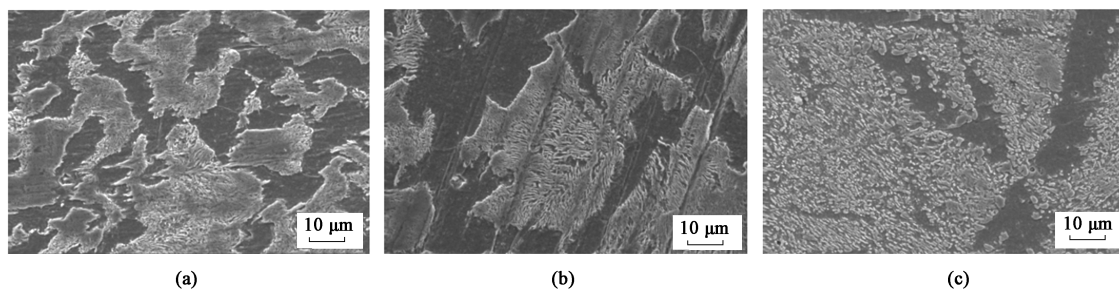


图 7 延长拉杆金相组织

(a) 新延长拉杆 (b) 未断延长拉杆 (c) 断裂延长拉杆

Fig. 7 Metallographic structures of extension rod

(a) New extension rod (b) Unfractured extension rod (c) Fractured extension rod

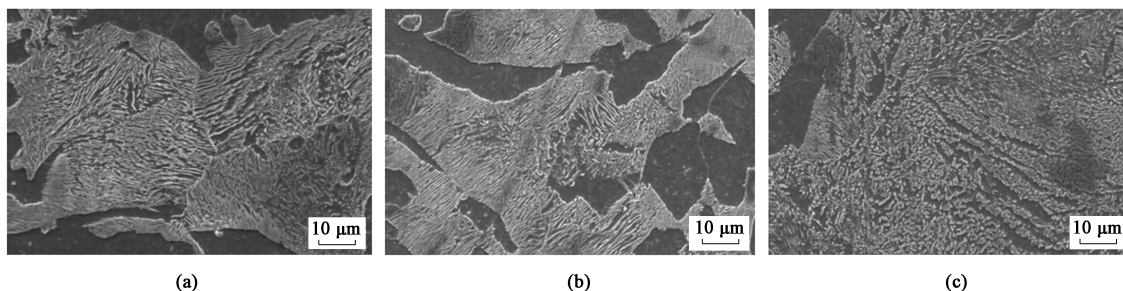


图 8 不同温度下的新延长拉杆金相组织

(a) 300 °C (b) 600 °C (c) 660 °C

Fig. 8 Metallographic structures of new extension rod at different temperatures

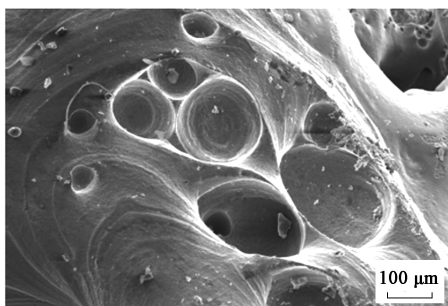


图 9 断口光亮区扫描电镜图像

Fig. 9 SEM image of bright area for fracture

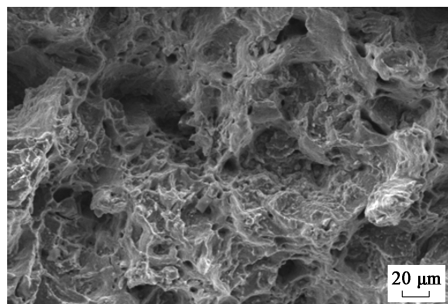


图 10 断口韧窝形貌

Fig. 10 Dimple morphology of fracture

表 4 断口能谱分析结果 (% , 质量分数)

Table 4 Energy spectrum analysis results of fracture
(%, mass fraction)

位置	C	O	Si	Mn	Fe	总计
韧窝区	6.68	31.48	—	—	61.84	100.00
光亮区	11.81	32.34	0.56	0.98	54.31	100.00

所示, 300 °C 时试样表面呈金黄色, 400 °C 时试样表面开始变为黑色, 当温度为 500 °C 时试样整体为黑色。随着试验温度的升高, 新延长拉杆断口的颜色由灰色变为黑色, 断口处均有明显的颈缩现象, 如图 11 所示。在扫描电镜下断口微观形貌均具有韧窝特征, 属于韧性断裂, 如图 12 所示。

1.6 延长拉杆通流试验

为了测试延长拉杆在通流情况下的温度分布情况, 取新延长拉杆, 在不同的电流下测试其温度分布状况。试验中若 10 min 内温度不再上升, 则认为检测温度为该电流下新延长拉杆能达到的最高温度。新延长拉杆最高温度检测结果如表 5 所示, 发热最高点在延长拉杆中段, 如图 13 所示。随着电流的增大, 新延长拉杆的最高温度基本呈线性升高, 当试验电流达 1000 A 时, 新延长拉杆的最高温度高于 550 °C, 如表 5 所示。

新延长拉杆的高温拉伸试样的整体形貌如图 6

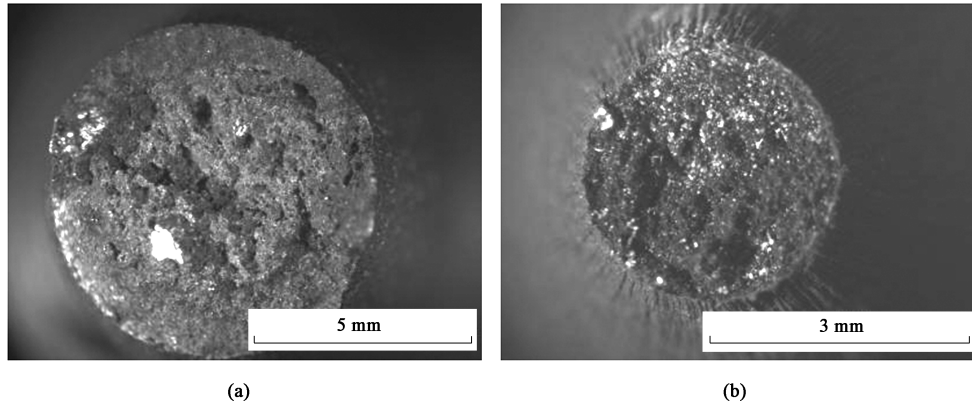


图 11 延长拉杆不同温度下的拉伸断口宏观形貌

(a) 300 °C (b) 660 °C

Fig. 11 Macro-morphologies of tensile fracture at different temperatures for extension rod

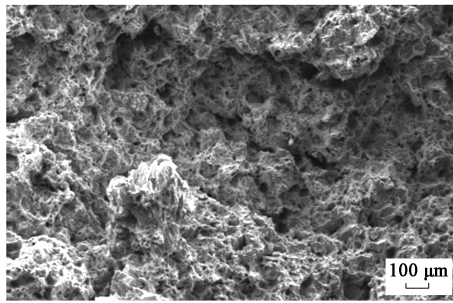


图 12 660 °C 下拉伸断口韧窝形貌

Fig. 12 Dimples morphology of tensile fracture at 660 °C

表 5 新延长拉杆通流试验最高温度

Table 5 The maximum temperatures of new extension rod in current test

试验电流/A	252	505	750	1000
最高温度/°C	101	249	380	>550

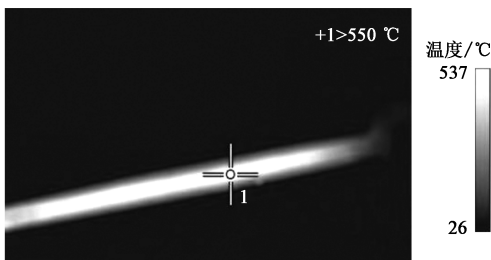


图 13 延长拉杆红外检测温度分布图

Fig. 13 Temperature distribution map for infrared detection of extension rod

2 讨论与分析

断裂延长拉杆的颜色发黑，表面存在氧化皮；断口颜色为深黑，表面有熔化点，应为最后断开时发生引弧放电所致。断裂延长拉杆的断口有明显的

颈缩现象，其微观形貌呈现韧窝特征，属于韧性断裂。

延长拉杆的材质为 35 钢，其室温抗拉强度满足要求（不小于 530 MPa），且断裂延长拉杆的强度低于未断延长拉杆和新延长拉杆。高温拉伸试验的结果表明，随着试验温度的升高，新延长拉杆的抗拉强度逐渐降低；当试验温度升至 500 °C 时，新延长拉杆的抗拉强度仅达 343 MPa，远低于要求。

延长拉杆的组织为铁素体和珠光体，未断延长拉杆和新延长拉杆的珠光体组织保持层片状结构，断裂延长拉杆的珠光体组织已发生球化。不同温度下新延长拉杆的金相组织观察结果表明，当温度为 660 °C 时，新延长拉杆的珠光体组织片层结构开始溶解并开始球化。组织球化是指材料长时间在高温下运行而发生的组织变化，高温下原子扩散速度加快，片层结构的渗碳体逐渐向颗粒状渗碳体转变，并聚集长大形成球状珠光体^[12,21-22]。珠光体的球化使相界面减少，减弱了界面强化的作用，并且减小了位错的运动阻力，降低了材料的强度和硬度^[23]。由于断裂延长拉杆长时间在高温下运行，珠光体组织发生球化，故其强度和硬度低于新延长拉杆和未断延长拉杆。

根据延长拉杆的通流试验结果可知，随着电流的增大，延长拉杆的最高温度基本呈线性升高。因此可以推测，当引流线夹接触不良或者断开时，电流主要从延长拉杆通过，使延长拉杆严重发热，导致延长拉杆的珠光体组织球化，抗拉强度急剧下降，且发热将会使延长拉杆在导线拉力的作用下发生蠕变，使延长拉杆截面积减小，承载面积降低，最终延长拉杆在导线拉力的作用下因强度不足而断裂。

3 结论

(1) 延长拉杆长时间在高温下运行, 其层片状结构的珠光体组织转变为球状结构的珠光体组织, 导致延长拉杆的抗拉强度降低。

(2) 当引流线夹接触不良或断开时, 电流主要从延长拉杆通过, 导致延长拉杆严重发热, 并在导线拉力作用下发生蠕变, 使其横截面积减小, 承载面积降低。高温下延长拉杆的抗拉强度急剧降低, 最终在导线拉力作用下因强度不足而发生断裂。

(3) 在运行中发现, 延长拉杆及附近金具有明显发热时, 建议检查引流线夹与耐张线夹的接触情况, 必要时对接触面重新打磨, 涂电力脂并按规定力矩值进行紧固。

参考文献:

- [1] 徐健涛, 常林晶, 宋铁创, 等. 延长拉杆的成型装置 [P]. 中国: CN105057534A, 2015-11-18.
Xu J T, Chang L J, Rong T C, et al. A forming device for extension tie rod [P]. China: CN105057534A, 2015-11-18.
- [2] 翟少兵, 任德均, 凌志祥, 等. 基于 ANSYS Workbench 拉杆的断裂原因分析和优化 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46 (4): 133-135.
Zhai S B, Ren D J, Ling Z X, et al. Pull rod fracture analysis and optimization based on ANSYS Workbench [J]. Machine Building & Automation, 2017, 46 (4): 133-135.
- [3] 胡跃均, 陈麒麟, 李文炎, 等. 乘用车抗扭拉杆断裂失效分析 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (12): 1340-1343.
Hu Y J, Chen Q L, Li W Y, et al. Failure analysis of passenger vehicle torque reactor [J]. Foundry Technology, 2019, 40 (12): 1340-1343.
- [4] 黄硕, 胡军, 尹菊芳. 开关设备金属部件典型失效分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32 (11): 14-18.
Huang S, Hu J, Yin J F. Typical failure analysis for the metal parts in switching equipment [J]. Total Corrosion Control, 2018, 32 (11): 14-18.
- [5] 张佳蓉. 横拉杆断裂失效分析 [J]. 理化检验: 物理分册, 2018, 54 (6): 83-85.
Zhang J R. Fracture analysis of 45 steel drawing pole [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2018, 54 (6): 83-85.
- [6] Jung H G, Yoo J Y, Woo J S. The microbiologically influenced corrosion behavior of C-Mn ship structural steel with different manufacturing processes [J]. ISIJ International, 2003, 43 (10): 1603-1610.
- [7] 耿慧. 海水腐蚀对碳钢宏细观阻裂力学性能的影响 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
Geng H. The Effect of Seawater Corrosion on Mechanical Properties of Macro-meso Crack Resistance of Carbon Steel [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013.
- [8] 吴进怡, 罗琦, 肖伟龙, 等. 海水环境中弧菌对 45 钢腐蚀行为及力学性能的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32 (4): 343-348.
Wu J Y, Luo Q, Xiao W L, et al. Influence of vibrio on corrosion behaviors and mechanical properties of 45 steel in seawater [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32 (4): 343-348.
- [9] 胡晓辉. 45 钢拉杆断裂失效分析 [J]. 理化检验: 物理分册, 2006, 42 (12): 628-630.
Hu X H. Fracture analysis of 45 steel drawing pole [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2006, 42 (12): 628-630.
- [10] 盘玮. 关于电动机轴疲劳断裂的分析 [J]. 金属加工: 热加工, 2019, (10): 51-54.
Pan W. Analysis on fatigue fracture of motor shaft [J]. MW Metal Forming, 2019, (10): 51-54.
- [11] 徐小华. 含硼钢管状扭力梁热处理脱碳层对疲劳性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 235-240.
Xu X H. Influence of heat treatment decarburization layer on fatigue performance for boron steel tubular torsion beam [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 235-240.
- [12] 刘明武, 苏辉, 张晋坤. 15CrMo 钢珠光体球化对性能的影响 [J]. 金属热处理, 2015, 40 (6): 41-44.
Liu M W, Su H, Zhang J K. Effect of pearlite spheroidization on properties of 15CrMo steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40 (6): 41-44.
- [13] 孙宁, 姜勇, 巩建鸣. 高温载荷作用下 20G 钢的性能及显微组织演变 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (6): 50-54, 58.
Sun N, Jiang Y, Gong J M. Property and microstructure evolution of 20G steel under high temperature loading [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42 (6): 50-54, 58.
- [14] 祝家祺, 谭淳礼, 张敏, 等. 钒和铬对贝氏体车轮钢回火组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (9): 957-966.
Zhu J Q, Tan Z L, Zhang M, et al. Microstructure and mechanical properties of tempered bainitic railway wheel steels with addition of V and Cr [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (9): 957-966.
- [15] 何朋非, 陈亮平, 杨成明, 等. 火力发电厂受热面管长时超温爆管分析 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 257-260.
He P F, Chen L P, Yang C M, et al. Analysis of long-time overheating explosion of heating surface tube at thermal power plant [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (9): 257-260.
- [16] GB/T 4336—2016, 碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法 (常规法) [S].
GB/T 4336—2016, Carbon and low-alloy steel—Determination of multi-element contents—Spark discharge atomic emission spectrometric method (routine method) [S].
- [17] GB/T 231.1—2018, 金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法 [S].

(下转第 228 页)