

高强马氏体不锈钢内齿轮裂纹的失效分析

李星, 胡黎明, 舒文祥, 王春健, 陆云霞

北京卫星制造厂有限公司 北京 100090

摘要: 分别从化学成分分析、力学性能测试、金相组织分析、宏观检测与SEM形貌观察对9Cr18不锈钢内齿轮的断口裂纹进行了分析, 最终确定了裂纹的性质, 并对可能的开裂原因进行了分析。结果表明: 内齿轮通过淬火+低温回火处理到 (60 ± 2) HRC的硬度, 本身马氏体转变过程组织应力较大, 且此时材料组织为回火马氏体+碳化物的组织状态, 碳化物的存在会大幅降低材料的抗裂纹扩展能力, 材料的脆性大幅增加, 使零件应力的敏感性也大幅增加。加之零件本身存在应力集中部位, 以上综合因素导致内齿轮发生了开裂。改进措施为结构上在尖角处增加小圆角, 同时在过渡或尖角处表面不能有毛刺或凸起, 以减小应力集中的风险, 热处理后对产品采用磁粉检测表面裂纹, 通过该措施保证了加工的零件无裂纹。

关键词: 马氏体不锈钢; 内齿轮; 裂纹; 失效分析

Failure analysis of cracks in high-strength martensitic stainless steel internal gears

LI Xing, HU Liming, SHU Wenxiang, WANG Chunjian, LU Yunxia

Beijing Spacecraft Co., Ltd., Beijing 100090, China

Abstract: The fracture cracks of 9Cr18 stainless steel internal gears were analyzed through chemical composition analysis, mechanical property testing, metallographic structure analysis, macroscopic inspection and SEM morphology observation, with the nature of the cracks finally determined and the possible cracking causes analyzed. The results show that the internal gears are treated by quenching + low-temperature tempering to a hardness of (60 ± 2) HRC, with large structural stress during the martensitic transformation process, and the material structure is in the state of tempered martensite + carbides at this time. The presence of carbides will significantly reduce the material's crack propagation resistance, greatly increase the brittleness of the material and also significantly enhance the stress sensitivity of the parts. Coupled with the stress concentration parts inherent in the parts, the above comprehensive factors lead to the cracking of the internal gears. The improvement measures are to add small round corners at the sharp corners in the structure, and the surface at the transition or sharp corners should not have burrs or protrusions to reduce the risk of stress concentration, and magnetic particle testing is used to detect surface cracks of the product after heat treatment, so as to ensure that the processed parts are free of cracks through this measure.

Keywords: martensitic; 9Cr18 stainless steel; internal gears; crack; failure analysis

1 序言

随着我国空间站、深空探测、载人登月及小行

星探测等任务的推进, 对轻质、高可靠性、高传动精度、长寿命的驱动机构类产品的需求越来越多,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3404100)。

尤其是齿轮驱动机构类产品^[1]。9Cr18作为高碳高铬马氏体不锈钢,具有优异的耐磨性能和硬度,在航天领域机构类产品上大量应用该材料,例如内外齿轮、重锤防扭轴、滑动卡销、销轴和棘爪等机构关键零部件。火星车机构主要含有驱动机构、转向轴机构和夹角调节机构,各类机构内部结构紧凑,设置有大量小模数、高精度小直齿轮组件。

通过重点研究航天领域某典型9Cr18不锈钢内齿轮零件裂纹的形成,深入了解裂纹产生原因和扩展机制,从而采取有效的预防和修复措施,以提高9Cr18不锈钢产品的合格率和可靠性。

2 材料及试验方法

某型号的内齿轮原材料为9Cr18高碳高铬马氏体不锈钢,执行GJB 2294—95《航空用不锈钢及耐热钢棒规范》^[2],毛坯直径120mm、长度60mm。齿轮规格尺寸如图1所示。技术要求粗加工后进行真空淬火+回火处理,满足硬度58~62HRC,其工艺过程为:粗车→粗铣→热处理(去应力)→半精车→半精铣→热处理(去应力)→精车→精铣→钳工→热处理(真空淬火+回火处理)→磨削(齿顶圆及内孔基准)→线切割(齿形)→钳工。

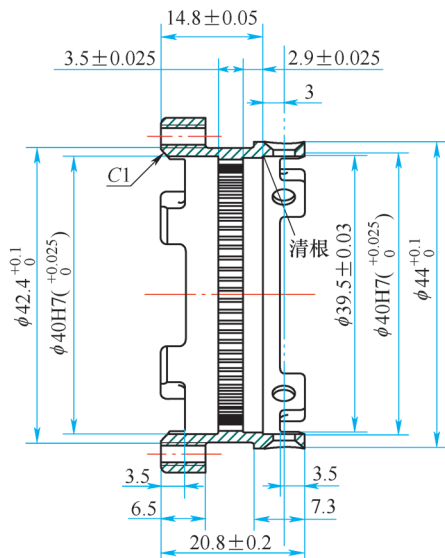
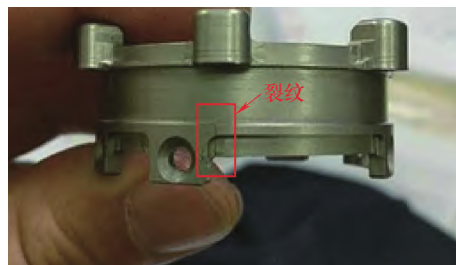


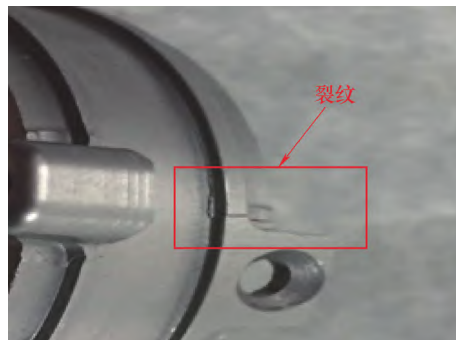
图1 齿轮截面规格尺寸

该批内齿轮经过超声波检测、机械加工、热处理去应力、热处理真空淬火+回火处理后,在磨削齿顶圆及内孔基准时,操作人员发现16件内齿轮中3件表面有裂纹,如图2所示。

为了找到3件产品裂纹产生的原因,分别从化学



a) 纵向裂纹



b) 裂纹扩展

图2 裂纹产品

成分分析、力学性能测试、金相组织分析、宏观检测与SEM形貌观察进行试验^[3-11]。

3 试验结果

3.1 化学成分分析

化学成分分析基于X射线荧光光谱仪S4 Pioneer进行检测^[12],在开裂的内齿轮上截取试样进行化学成分分析,结果见表1。从表1可知,化学成分符合选用材料标准的要求。

表1 化学成分的测试结果(质量分数)(%)

元素	C	Si	Mn	S	Cr	P
标准值	0.90~1.00	≤0.80	≤0.70	≤0.025	17.00~19.00	≤0.030
测试值	0.98	0.38	0.35	0.013	18.07	0.013

3.2 硬度检测

采用洛氏硬度计TH320,对内齿轮进行洛氏硬度检测,结果见表2。从表2可看出,硬度符合(60±2)HRC要求范围,表明热处理实施无异常。

表2 洛氏硬度测试结果 (HRC)

项目	位置1	位置2	位置3	位置4
测试值	61.3	60.5	58.6	58.5
标准值	60±2	—	—	—

3.3 金相组织观察

采用金相显微镜OLYMPUS BX51M观察金相组织形貌，在裂纹附近取纵向试样，磨抛浸蚀后其金相组织如图3所示。从图3可看出，其组织与标准图谱中淬火+低温回火组织一致，金相组织正常。

此次发生开裂的内齿轮材料主要成分含量符合标准，硬度值符合要求，金相检查组织未见异常，裂纹源区未见明显缺陷，因此可排除材质的原因。

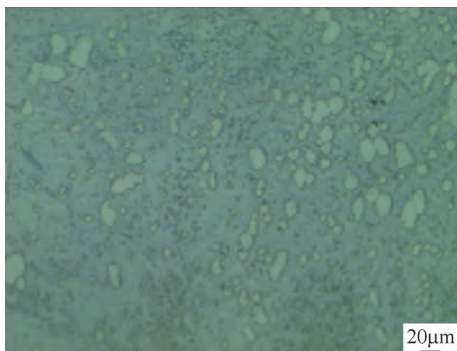


图3 金相组织

3.4 宏观检测与SEM形貌观察

(1) 宏观形貌 开裂的内齿轮宏观形貌如图4所示。由图4可观察到3处明显裂纹，其中1#裂纹开裂程度最严重，沿纵向和左右周向均发生了开裂，且开裂已贯穿整个壁厚方向，纵向裂纹与轴向平行，位于过渡圆角处，周向裂纹沿着外壁底角处^[13]；2#裂纹为纵向裂纹，平行轴向发生开裂，位于过渡圆角处，开裂贯穿整个壁厚；3#裂纹沿纵向和一侧轴向开裂，贯穿整个壁厚，纵向裂纹与轴向平行，位于过渡圆角处，周向沿着内壁底角处开裂。通过以上观察可知，3处裂纹均未见明显塑性变形，纵向裂纹均位于过渡圆角处，开裂贯穿整个壁厚，周向

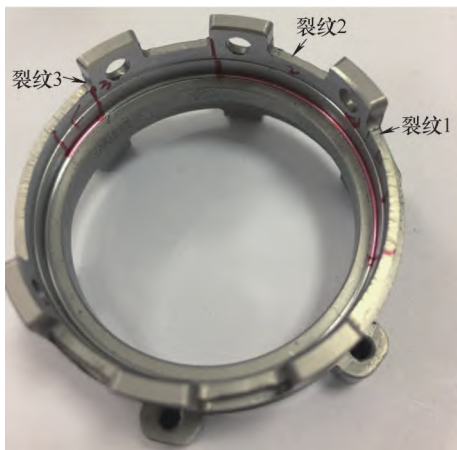
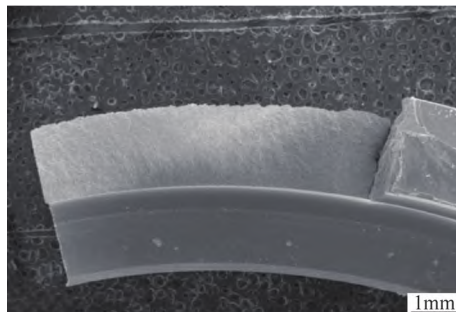


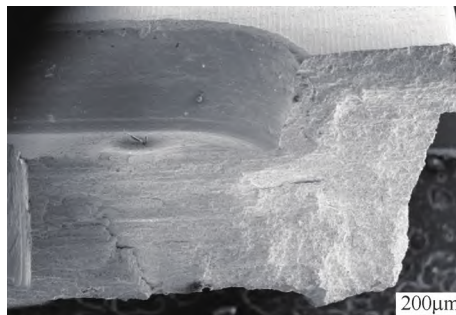
图4 开裂内齿轮整体形貌

裂纹均沿着底角处扩展。

(2) SEM形貌观察 SEM形貌观察采用ZEISS的SUPRA55 (VP) 扫描电镜。将1#裂纹打断，其断口经超声波清洗后放入扫描电镜中进行微观形貌观察，断口的整体形貌如图5所示。



a) 周向裂纹打开后断口



b) 纵向裂纹打开后断口

图5 断口整体形貌

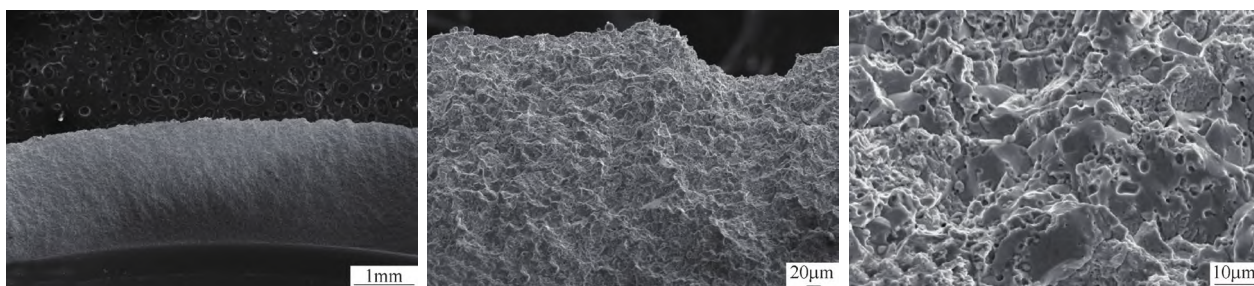
经宏观观察，周向、纵向断口均未见明显塑性变形，断口较平整，纵向断口可见明显变形方向。

周向断口的微观形貌如图6所示。从图6可看出，裂纹呈线源起裂，源区位于外侧底角处，源区未见明显缺陷，可见明显放射棱线特征。整个断口微观形貌一致，为沿晶特征，在晶粒及晶界上均可见明显颗粒相特征。

纵向断口的微观形貌如图7所示。从图7可看出，裂纹呈线源特征，源区位于外壁凸台处，源区未见明显缺陷，可见明显放射棱线特征。源区以沿晶特征为主，可见少量韧窝特征，扩展区也是沿晶+韧窝特征，最后断裂区以韧窝特征为主，整个断口晶粒及晶界上均可见明显的颗粒相特征。

热处理工艺因素对淬火开裂的影响。在淬火工艺因素中，淬火温度和冷却速度对淬火开裂有着重要的影响。

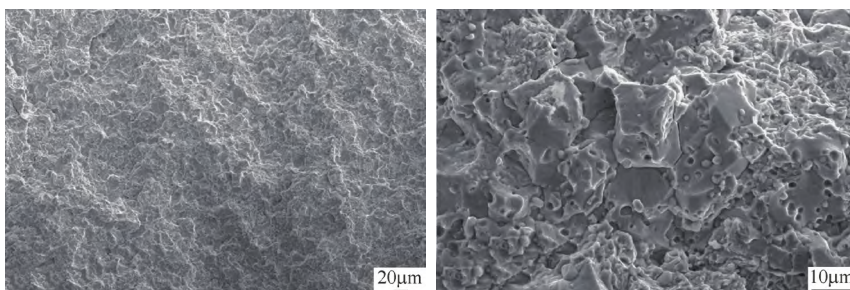
一般而言，较高的淬火温度和较快的冷却速



a) 放射棱线特征

b) 源区低倍

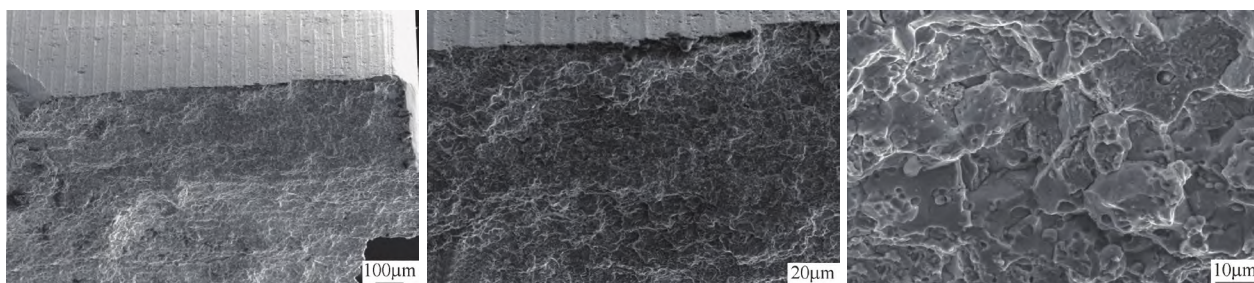
c) 源区高倍



d) 其他区域低倍

e) 其他区域高倍

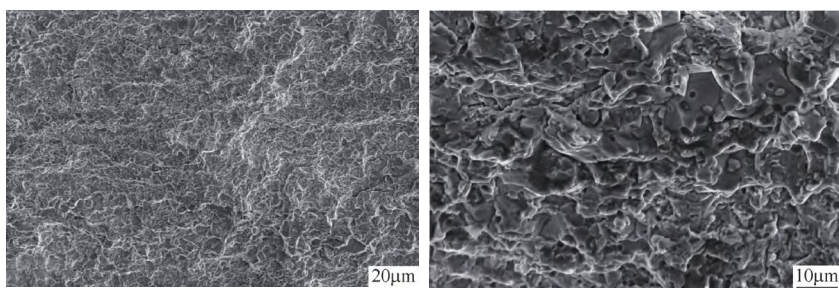
图6 周向裂纹打开后断口微观形貌



a) 放射棱线

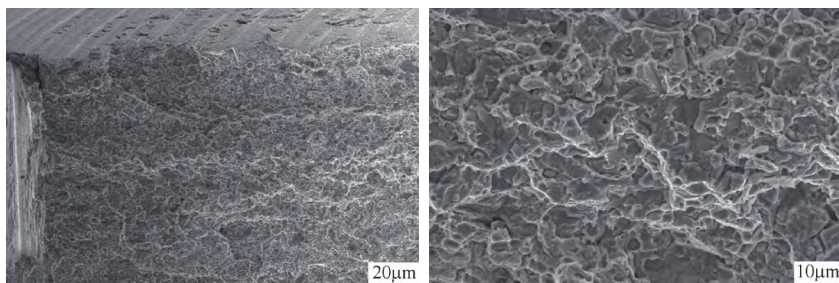
b) 源区低倍

c) 源区高倍



d) 扩展区低倍

e) 扩展区高倍



f) 最后断裂区低倍

g) 最后断裂区高倍

图7 纵向裂纹打开后断口微观形貌

度都会造成淬火应力过大，并容易引起淬火开裂现象。较高的淬火温度易造成过热、过烧等现象。金相检查结果显示组织未见异常，由此排除淬火温度过高引起的淬火应力过大现象。而材料在热处理过程中可能会出现冷却速度过快现象，从而导致零件内部淬火应力过大，复查热处理的炉温、保温时间及冷却方式等发现，内齿轮冷却时采用气冷方式，相对于水冷、油冷方式，冷却速率相对较小。零件均匀摆放，且气体由四周各个方向喷出，喷气口与零件均布，而且气体喷出后再由风机带动循环，不存在冷却不均匀的问题。热处理设备选用自动化的真空气淬炉，热处理淬火温度为1050℃，保温30min，气冷；回火为150℃，保温2h，空冷，工艺制度满足航天工业行业标准QJ 2714—1995《不锈钢的热处理》^[14]，因此基本可以排除热处理工艺不当的原因。

但是，该内齿轮通过淬火+低温回火处理后，硬度达到 (60 ± 2) HRC，且本身马氏体转变过程组织应力较大^[15]，此时材料组织为回火马氏体+碳化物状态，9Cr18不锈钢含碳量相对较高，断口微观形貌的球形颗粒即为碳化物，裂纹源区以沿晶特征为主，可见少量韧窝特征，扩展区也是沿晶+韧窝特征，最终断裂区以韧窝特征为主，整个断口晶粒及晶界上均可见明显颗粒相特征。碳化物的存在会降低材料的抗裂纹扩展的能力，材料的脆性增加，使零件应力的敏感性大幅提高。

综上所述，内齿轮上的裂纹性质为结构存在应力集中部位，淬火后应力集中放大后产生裂纹^[16]。

4 分析与讨论

针对上述问题，采取以下3种措施对开裂风险进行控制，加工过程中未产生裂纹，同时零件加工后进行了磁粉检测，未发现裂纹，整器力热试验、机构发射升空和在火星上运行均获得圆满成功。

1) 建议设计在尖角处增加小圆角如图8所示。

为了验证增加圆角前后的应力情况，基于ABAQUS的热力耦合瞬态分析，使用相同材料属性，对无圆角模型和有圆角模型的所有外表面均添加了相同的界面换热属性。经过计算，增加圆角后，零件出现了一定程度的应力下降。改进结构后实际的热处理也未再发生齿轮开裂，等效应力仿真

如图9所示。

2) 控制产品表面质量，在过渡或尖角处表面粗糙度值要低，不能有毛刺或凸起，以减小应力集中的风险。

3) 热处理后对产品采用磁粉检测方法检测表面裂纹。

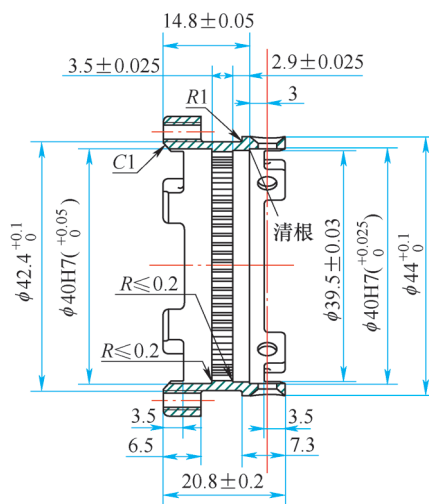
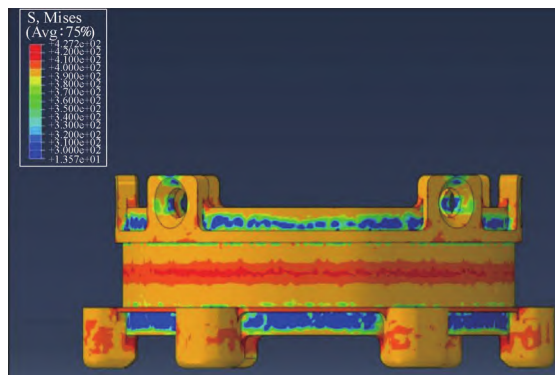
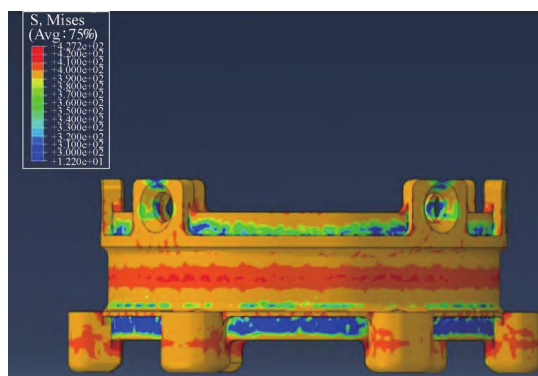


图8 设计增加R圆角



a) 无圆角



b) 有圆角

图9 增加R圆角前后的应力仿真

采用上述方法后,产品无裂纹,合格率达到100%。

5 结束语

内齿轮是在热处理后、机械加工前发现裂纹的,断口宏观未见明显塑性变形,源区微观主要为沿晶特征,这些均与淬火开裂后的断口特征一致,因此判断此次内齿轮的裂纹性质为结构存在应力集中部位,淬火应力集中放大后产生裂纹,具体结论如下。

1) 此次发生开裂的内齿轮材料主要成分含量符合标准,硬度值符合要求,金相观察组织未见异常,裂纹源区未见明显缺陷,因此可排除材质的原因。热处理炉温及其工艺制度的复查以及金相组织未见异常,可排除淬火过烧和冷却过快。

2) 内齿轮通过淬火+低温回火处理硬度达到 (60 ± 2) HRC,且本身马氏体转变过程组织应力较大,此时材料组织为回火马氏体+碳化物状态,碳化物的存在会降低材料的抗裂纹扩展能力,材料脆性增加,使零件应力的敏感性大幅提高。

3) 内齿轮3处裂纹,周向裂纹均沿着底角处扩展,且断口表明1#裂纹的源区即位于外壁底角处,该处本身即为零件结构应力集中部位,因为零件结构不合理,存在应力集中部位,应力集中现象在热处理后放大。改进后的结构在尖角处设计小圆角,产品磁粉检测无裂纹,合格率达到100%。

4) 改进结构后效果显著,产品在鉴定件、结构热控件等多批次生产的30多件正样产品上均未发生开裂问题,“祝融号”火星车圆满完成既定的巡视探测任务。

参考文献:

- [1] 杨三强,韩建超,胡黎明,等.航天器用结构齿轮线切割加工技术研究:“第14届全国特种加工学术会议”论文集[C].江苏:工程科技II辑,2011.
- [2] 冶金部信息标准研究院.航空用不锈钢及耐热钢棒规范:GJB 2294—1995[S].北京:冶金部信息标准研究院,1995.
- [3] 孙国栋,贾贺泽,张文学,等.锥形磨浆机磨片用新型马氏体不锈钢的组织性能[J].材料热处理学报,2015,36(6):138-143.
- [4] 沈天阔.控制棒驱动机构可拆接头用X12CrNi13马

氏体不锈钢冲击失效分析及改进[J].材料导报,2021,35(S2):404-409.

- [5] 陈俊峰,倪世丰.20Cr13钢制螺栓的断裂失效分析[J].材料开发与应用,2024,39(3):61-65,67.
- [6] 张栋,钟培道,陶春虎,等.失效分析[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [7] 王春雨,吴雪猛,赵静,等.某型航空发动机燃油导管开裂失效分析[J].航空维修与工程,2021(6):63-65.
- [8] 杨玉川,李巍,熊勇.1Cr17Ni2钢制操纵盒小轴断裂原因分析[J].金属热处理,2022,47(3):261-265.
- [9] 郑勇.水轮机不锈钢叶片失效分析[J].金属材料与冶金工程,2020,48(2):26-31.
- [10] 赵庆云,孙昂,黄宏,等.内锥衬套高锁螺栓性能及接头疲劳寿命研究[J].航空制造技术,2023,66(16):104-110,123.
- [11] 卢一城.1Cr5Mo管法兰焊缝在线开裂失效原因分析[J].金属加工(热加工),2024(5):25-29.
- [12] 高祥,刘宝安,刘颖宾,等.高速列车1Cr17Ni2制动杠杆螺栓沿晶开裂机理研究[J].失效分析与预防,2018,13(1):34-42.
- [13] 黄月华.螺栓的断裂失效分析[D].上海:上海交通大学,2003.
- [14] 中国航天工业总公司.不锈钢的热处理:QJ 2714—1995[S].北京:中国航天标准化研究所,1995.
- [15] 申坤,许东.9Cr18马氏体不锈钢的亚温淬火[J].热处理技术与装备,2012,33(3):19-22.
- [16] ZHONG Z Q, TIAN Z L, YANG C, et al. Failure analysis of vessel propeller bolts under fastening stress and cathode protection environment[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 57: 129-136.

(收稿日期:20250206)