

挖掘机链轨节失效分析及改善

吴爱青, 杨小芳, 孙叶, 范宪勇, 李晨, 张鲁 惠燕先

山推工程机械股份有限公司 山东济宁 272000

摘要: 挖掘机履带链轨节在服役过程中出现裂纹及掉块等失效问题。通过化学成分、硬度、微观组织、断口形貌、有限元等检测对链轨节进行全面失效分析。结果表明: 链轨节裂纹为疲劳裂纹, 其结构上存在应力集中区域; 剖检分析发现, 其调质晶粒度及硬化区马氏体组织较为粗大, 其他检测项目均无明显异常。基于分析结果, 进行设计优化避免应力集中区域, 并且通过改善调质工艺来提高基体晶粒度, 改善踏面硬化工艺以细化马氏体组织。通过以上改善措施加强链轨节的强韧性、抗冲击性等综合性能, 链轨节裂纹掉块失效问题得到显著改善。

关键词: 履带; 链轨节; 裂纹; 失效; 调质

Failure analysis and improvement of excavator track links

WU Aiqing, YANG Xiaofang, SUN Ye, FAN Xianyong, LI Chen, ZHANG Lu, HUI Yanxian

Shantui Construct Machinery Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China

Abstract: During the service life of the excavator crawler track link, failure problems such as cracks and chipping occur. A comprehensive failure analysis of the track link is carried out through tests of chemical composition, hardness, microstructure, fracture morphology, finite element, etc. The results show that the cracks in the track link are fatigue cracks, and there are stress - concentration areas in its structure. Through dissection analysis, it is found that the tempered grain size and the martensite structure in the hardened area are relatively coarse, while there are no obvious abnormalities in other inspection items. Based on the analysis results, design optimization is carried out to avoid stress - concentration areas. Moreover, the matrix grain size is improved by optimizing the quenching and tempering process, and the martensite structure is refined by improving the tread hardening process. Through the above improvement measures, the comprehensive properties of the track link, such as strength, toughness, and impact resistance, are enhanced, and the failure problems of cracks and chipping of the track link are significantly improved.

Keywords: track; link; crack; failure; tempering

1 序言

链轨节是履带式工程机械履带总成的关键零件。链轨节下与履带板通过螺栓联接, 链轨节上与支重轮滑动摩擦支撑工程机械整车重量, 并通过电动机的驱动来实现行走功能。链轨节工作条件恶

劣, 不仅承受很大交变载荷和冲击载荷, 与支重轮直接接触的链轨节踏面还受到周期性的摩擦作用, 这就要求链轨节基体部分必须具有较高的强度和良好的抗疲劳性能, 同时与支重轮接触位置更要有较高的硬度和良好的耐磨性。一般要求整体调质(硬

度285~375HBW10/3000)，踏面局部淬火（硬度48~55HRC）。其生产工艺过程一般为：棒料→锻造→余热调质→铣面→踏面淬火→精加工→成品。

2023年6月客户反馈多台某型号挖掘机整机工作3000h左右，履带链轨节出现裂纹及局部掉块现象，链轨节型号为228A。

2 现场调查及失效分析

2.1 施工现场调查

某矿山采用露天开采方式，应用行业先进爆破工艺生产砂石骨料。挖掘机在矿山进行挖掘装车作业，日工作时间20h以上，挖掘机行走较多，导致挖掘机链轨节踏面及销端凸台磨损严重（见图1a），链轨节踏面外侧与支重轮轮沿内侧相互接触碾压后踏面外侧拐角塌陷龟裂，部分链轨节踏面外侧拐角掉块（见图1b）。支重轮轮沿、护轨器均磨损严重。链轨节套孔和相邻窗口立筋外侧圆弧处裂纹较为普遍（见图1c）。如图1d所示，位置一为链轨节裂纹及掉块等失效普遍集中在踏面边角部位；位置二为链轨节套孔与相邻窗口立筋外侧裂纹；位置三为销端凸台处。

2.2 裂纹分析

对链轨节套孔与相邻窗口立筋外侧裂纹断口（位置二）进行分析，断口的局部放大形貌如图2所示。由图2可看出，断口表面较平齐，裂纹源位于位置二靠近窗口处外表面（标记为A区），起裂位置可见多个台阶，断口表面可见由起裂位置向材料内部延伸的棱线（棘轮花样），说明该位置存在多个裂纹源。各条裂纹同时扩展并交汇，形成断口表面的扩展区（标记为B区）。扩展区可见贝纹线，是疲劳扩展的典型特征^[1]。裂纹扩展方向如图2中黄色箭头所示，C区是最后断裂区域，为疲劳断口的瞬断区。断口表面及周围可见红褐色腐蚀产物。

将断口清洗后放在扫描电子显微镜（SEM）下进行微观形貌观察。结合对断口的宏观检查发现，该裂纹为多源起裂，各裂纹源处的微观形貌特征也较一致。裂纹源（A区）位于链轨节外表面的边缘处，可见多处台阶及延伸至材料内部的棱线（见图3a）。裂纹扩展区（B区）低倍下可见贝纹线（见图3b），符合疲劳裂纹扩展的特征，放大后，可见穿晶解理断裂与韧窝混合形貌（见图3c）。断口瞬



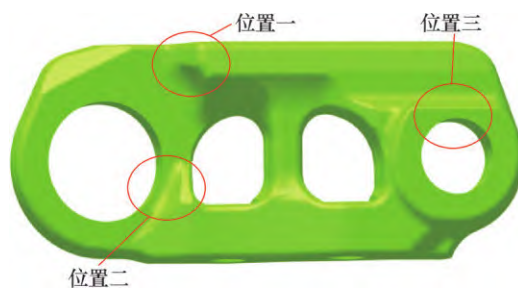
a) 销端凸台磨损



b) 踏面磨损掉块



c) 裂纹



d) 链轨节失效位置分布

图1 施工现场链轨节失效情况

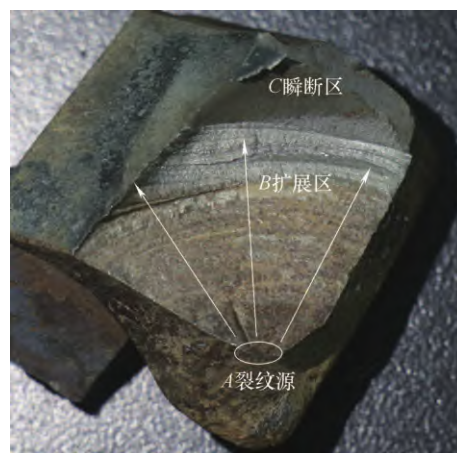


图2 链轨节断口宏观形貌

断区的微观形貌如图3d所示，呈现典型的韧窝形貌特征。

2.3 有限元分析

采用ANSYS有限元分析，链轨节踏面固定约束（见图4a），零部件接触对（包括节轴、节套、

节板之间）均为绑定（见图4b），履带板端面（单侧）施加竖直向上的力 $F=22t$ （ $1t=9800N$ ）（假设极限工况为3块履带板受力，如图4c所示）。分析后确认位置二处为应力集中区域，开裂位置的最大应力为623MPa（见图4d），达到材料屈服强度

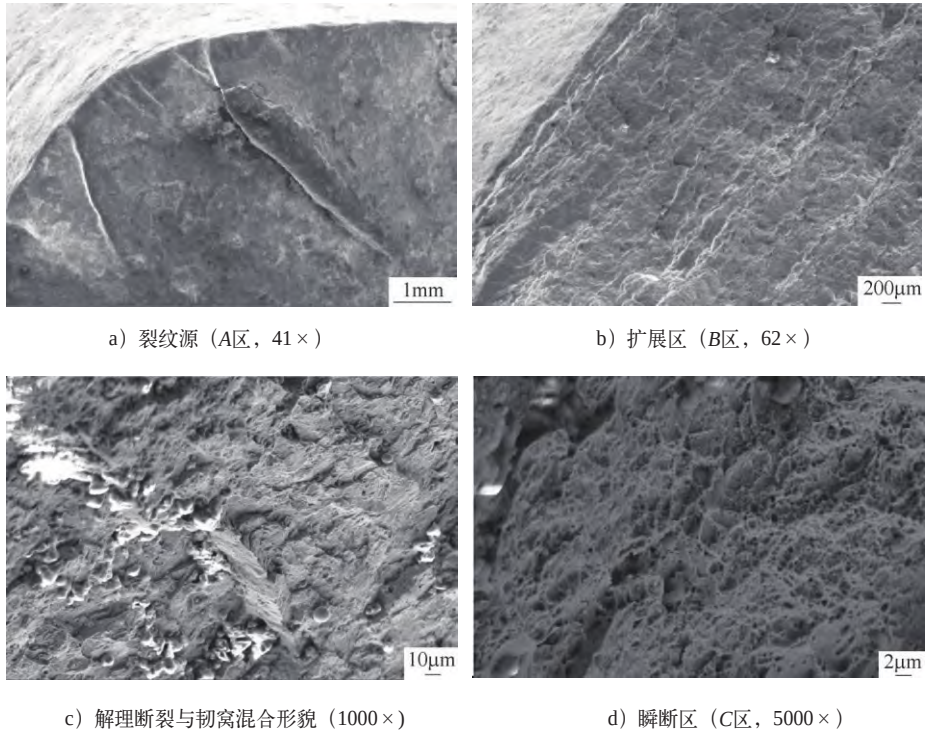


图3 链轨节断口微观形貌

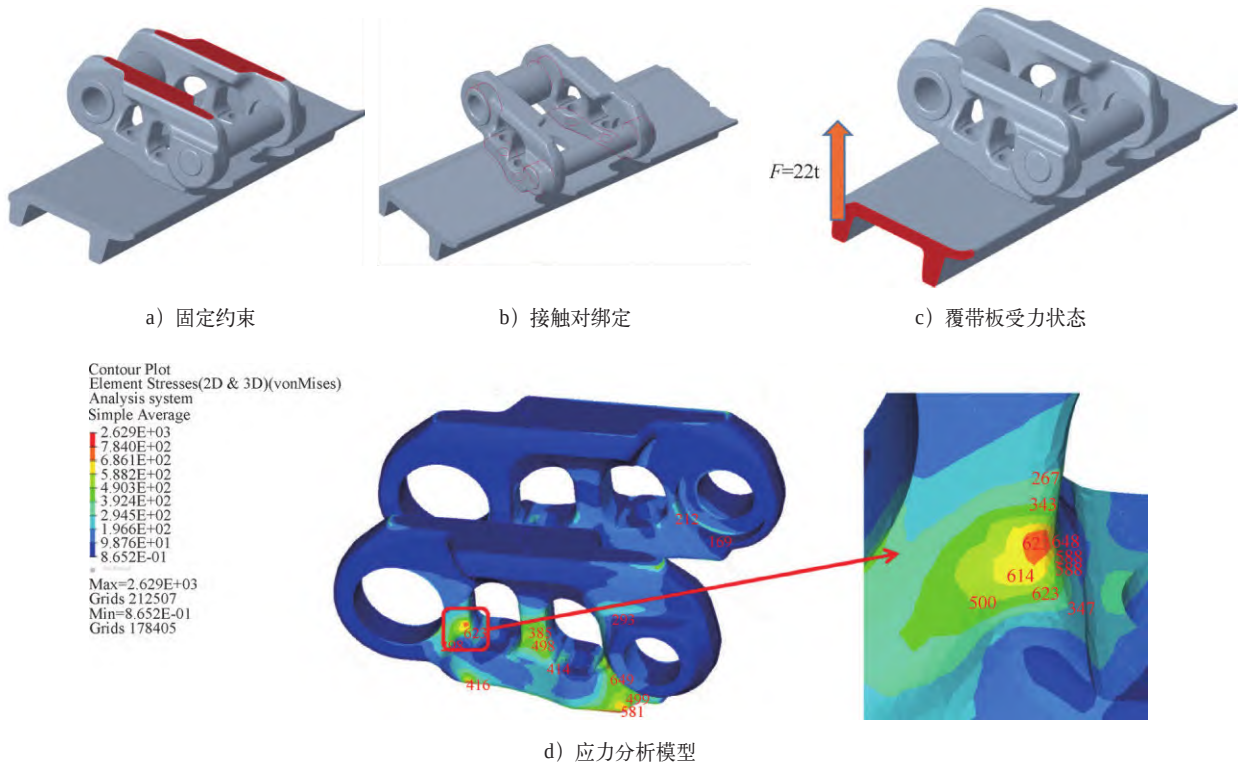


图4 有限元分析

的79%。挖掘机在行走、转向、爬陡坡等行驶过程中,链轨节承受高强度交变应力,诱发疲劳开裂。

2.4 裂纹件剖检分析

对市场失效返回件进行了剖检分析,检测项目主要有化学成分、硬化层、硬度、基体晶粒度及硬

化区马氏体级别等。链轨节材料的化学成分符合企业对35MnB钢的要求,见表1。对链轨节靠近裂纹源处和中频感应淬火处表面取样进行硬度检测,结果表明,硬度符合企业技术要求,见表2。

此外,基体调质组织(见图5a)晶粒度4级,技

表1 链轨节材料的化学成分(质量分数)

(%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	B
0.34	0.24	1.25	0.006	0.013	0.20	0.009	0.018	0.02	0.016	0.002

表2 链轨节硬度检测结果

检测位置	实测值	企业要求值
链轨节靠近裂纹源处硬度HBW10/3000	343、341、333	285~375(调质)
链轨节中频感应淬火处表面硬度HRC	51.4、50.8、51、52.2、51.3、51.6、50.8、52	48~55(踏面淬火+回火)

术要求 ≥ 4 级,处于技术要求下限,晶粒较为粗大。晶粒度是影响材料性能的重要因素之一。晶粒度的变化可以显著影响材料的力学性能,包括强度、韧性和塑性。一般是晶粒越细小,则强度、塑性和韧性就越好。这是因为,晶粒越细,塑性变形越可以分散在更多的晶粒内进行,使塑性变形越均匀,内应力集中越小;而且晶粒越细,晶界越多,晶界也越曲折,晶粒与晶粒中间犬牙交错的机会就越多,越不利于裂纹的传播和发展,彼此就越紧固,强度和韧性也就越好^[2]。

踏面硬化区域回火马氏体组织(见图5b)不

均匀,要求 ≥ 4 级,实际局部区域可达3级,应与局部加热温度高有关。马氏体级别取决于奥氏体晶粒度,加热时局部温度过高,导致奥氏体晶粒粗大,从而获得粗大的马氏体组织^[3]。淬火马氏体组织的粗细直接影响材料的强度、硬度和韧性。一般来说,细小的马氏体组织能够提供更高的强度和硬度,因为细小的组织结构能够更好地阻碍位错运动,所以会增强材料的力学性能。相反,粗大的马氏体组织会导致材料的韧性降低,这是因为较大的组织结构在受到外力时更容易产生裂纹和断裂^[4]。

3 失效分析及改善对策

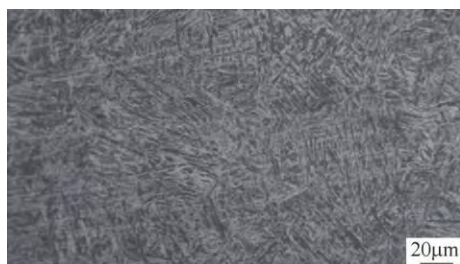
挖掘机在行走、转向、爬陡坡等行驶过程中,链轨节外侧与支重轮轮沿内侧摩擦、冲击,进而导致磨损。链轨节在高强度交变载荷作用下在应力集中处发生疲劳开裂。因此,需从设计角度出发,尽量减少应力集中区域。

另外,当挖掘机在颠簸地面行驶或翻越石头障碍时,支重轮轮沿顶端对链轨节外侧面圆弧形冲击(俗称爬轨,见图6),链轨节外侧圆弧被碾切甚至掉块。结合剖检分析,可以优化此处组织级别,提高踏面硬化区域的耐磨性、耐冲击性能等,从而减缓此处失效。

爬轨还会造成链轨节销端凸台与护轨器干涉磨损,导致销端凸台异常磨损(见图7)。因此,一方面建议客户改善护轨器结构;另一方面结合剖检分析,细化晶粒也是一个重点改善方向,晶粒的细化



a) 基体调质组织(4级)



b) 硬化区马氏体局部组织(3级)

图5 晶粒度级别

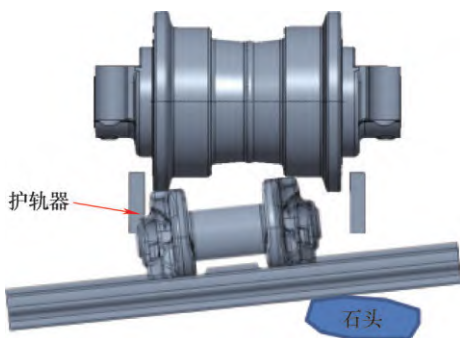


图6 爬轨



图7 销端凸台异常磨损

可以提高链轨节基体强度，从而减轻此处磨损。

综合以上分析，可以通过设计优化减少应力集中区、改善热处理工艺等手段加强链轨节的耐磨性、强韧性、抗冲击性等综合性能，从而避免异常失效，改善市场表现。

3.1 设计优化

对链轨节做了对应设计加强，ANSYS有限元分析（见图8）显示，改善后此位置最大应力值由623MPa降至438MPa，降低了29.7%。

3.2 热处理工艺优化

此型号链轨节采用余热调质工艺，晶粒较为粗大，晶粒度一般在4~5级；目前国内厂家主要采用的调质处理工艺有两种：一是常规调质工艺，将锻后自然冷却的工件重新加热，保温一定时间后淬火；二是余热调质工艺，即无需重新加热，利用锻造余热进行调质。由于锻造余热淬火温度比常规淬火温度高，所以获得的晶粒要比常规工艺粗大。如果奥氏体晶粒粗大，则会影响工件的力学性能。因此，锻造加热温度应在模锻允许范围内取下限，以尽量减缓形变奥氏体晶体内的缺陷在高温下的再结晶和长大，防止由于晶粒粗大导致钢的强韧性下降，同时还必须保证终锻结束到淬火这段时间内表面温度不低于相变临界点 A_{r3} 温度，以免淬火产生非马氏体组织^[5]。我公司对现用余热调质工艺进行了分析，对锻造加热温度、始锻温度进行了优化，实施严格的温度监控，并严格控制棒料的重复加热次数。优化调质工艺后晶粒度可明显细化，可控制在6级左右（见图9a）。

此外，同时改进了踏面硬化工艺。对热处理工艺及感应器设计进行了优化，并配合导磁体应用调

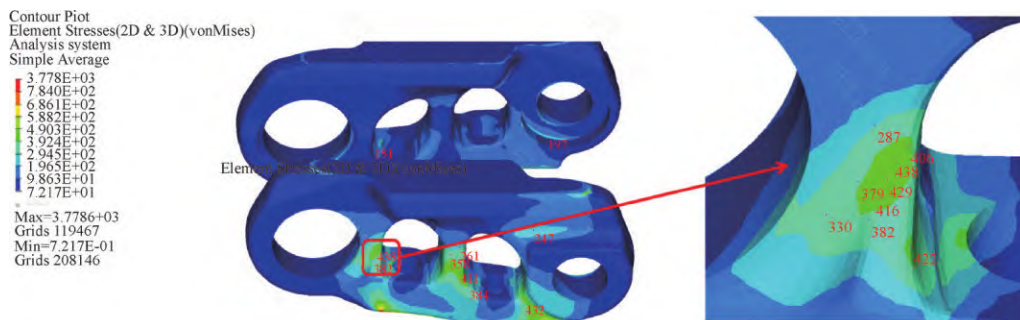
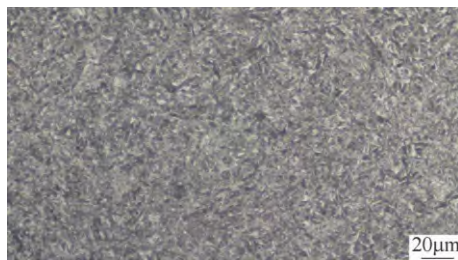


图8 有限元分析（优化后）



a) 基体调质组织晶粒度（6级）



b) 硬化区马氏体级别（5级）

图9 优化调质工艺后晶粒度

（下转第166页）

分和力学性能检测结果符合JB/T 1271—2014《交、直流电动机主轴锻件技术条件》的规定。

3) 样品23090017-001~003的低倍组织、金相分析结果表明,其显微组织为16Mn钢大锻件正火后的正常组织,且与力学性能检测结果相匹配。

4) 疲劳断裂具有扭振破坏特征,根据样品23090017-002的断口宏观及扫描电镜分析表明,裂纹源自轴的表面,裂纹由表面向中心扩展,其断口形貌可见明显的疲劳扩展辉纹及二次裂纹,断裂形式为疲劳断裂,符合周期性往复作用力导致裂纹产生的特征^[1];电动机主轴是一个旋转体,运行中发生扭转振动,多处轴表面裂纹形貌呈X形,裂纹走向与轴向呈45°,因此该轴裂纹失效,具有扭振破坏的特征^[2, 3]。

5) 谐振加速了电动机主轴开裂,当电动机转动频率下降、中途出现频率台阶时,轴瓦温度急剧升高,说明此时电动机主轴已经产生裂纹,而这个裂纹的产生与谐振有关,此时电动机主轴振动幅度最大,承受的应力也最大。电动机主轴在交变作用力下往复运动,发生疲劳断裂,裂纹扩展区域内部产生次生裂纹。

综上所述,电动机主轴非裂纹失效部分经化学成分分析、金相组织检测、力学性能试验,以及超

声波、扫描电镜检测,均符合低倍组织和显微组织为16Mn钢大锻件的正常正火组织及其力学性能。

5 结束语

综上所述,可得出如下结论。

1) 电动机主轴非裂纹失效部分经化学成分分析、金相组织检测、力学性能试验、超声波及扫描电镜检测,符合低倍组织和显微组织为16Mn钢大锻件的正常正火组织与其力学性能。

2) 样品23090017-002断口分析结果表明,其裂纹源自轴表面,断裂机制为疲劳断裂,裂纹走向具有扭振破坏的特征。

3) 该电动机主轴的疲劳裂纹与电动机主轴产生谐振有关。

参考文献:

- [1] 清华大学工程力学系固体力学教研组振动组. 机械振动: 上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [2] 王泽基, 王瑞庭, 张祥军. 冷连轧机主传动系统扭振分析[J]. 冶金设备, 2010, 12 (6): 17-23.
- [3] 胡子正, 杨小波, 邵成. 汽车传动系统扭振特征辨识[J]. 汽车工程, 1992, 14 (1): 32-37.

MW 20241120

(上接第160页)

整磁通量,改善加热区域磁场分布,提高加热部位温度分布的均匀性,避免局部加热温度过高。将马氏体组织细化至5级左右(见图9b),进一步增强链轨节的使用强度。

4 结束语

针对挖掘机履带链轨节裂纹掉块等失效情况进行调查,通过断口宏观及微观分析,确认其裂纹为疲劳裂纹,有限元分析结果也证实了结构上存在应力集中区域。剖检分析发现,其调质晶粒度及硬化区马氏体组织较为粗大。根据分析结果,通过设计优化、改善热处理工艺等手段进行改善。优化设计减少应力集中区域,通过改善调质工艺来提高基体晶粒度,优化踏面硬化工艺,细化马氏体组织。改善措施实施以后,经一年的市场验证,无不良反

馈,挖掘机履带链轨节裂纹掉块失效问题得到有效解决。

参考文献:

- [1] 李庆芬, 胡胜海, 朱世范. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2008.
- [2] 路君, 曾小勤, 丁文江. 晶粒度与合金强度关系[J]. 轻金属, 2008 (8): 59-64.
- [3] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 刘宗晶, 赵莉萍. 热处理工程师必备理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 彭天成, 张开华. 链轨节的选材及热处理工艺[J]. 金属加工(热加工), 2018 (11): 64-66.

MW 20241220