

40Cr钢紧固轴疲劳断裂原因分析及改进

庞维彬¹, 郑东方¹, 潘冬², 侯震彪¹, 刘志伟¹

1. 铁设(济南)电气设备有限公司 山东济南 250200

2. 济南铁路物资工业集团有限公司 山东济南 250001

摘要: 一批40Cr钢紧固轴在疲劳试验检测过程中连续出现早期断裂, 达不到试验要求次数。为了探索此批紧固轴断裂的原因, 对断裂件进行了成分分析、硬度检测、宏观断口分析与扫描电镜、金相组织检测, 以及螺纹外形轮廓测量。结果表明: 紧固轴的螺纹牙底过渡圆弧半径 $R \leq 0.07\text{mm}$, 且调质后的金相组织超过6级, 不合格, 导致疲劳试验检测中的紧固轴因螺纹根部应力集中形成细微裂纹并逐步扩展而断裂。通过分析讨论, 制定改进措施并严格控制紧固轴的生产过程, 最终使紧固轴的力学性能达到了技术要求。

关键词: 紧固轴; 疲劳断裂; 应力集中; 过渡圆弧

Analysis and improvement of fatigue fracture reasons for 40Cr steel screw bolt

PANG Weibin¹, ZHENG Dongfang¹, PAN Dong², HOU Zhenbiao¹, LIU Zhiwei¹

1. CRDC (Jinan) Electrical Equipment Co., Ltd., Jinan 250200, Shandong, China

2. Jinan Railway Material Industry Group Co., Ltd., Jinan 250001, Shandong, China

Abstract: A batch of 40Cr steel screw bolt broke continuously early during the fatigue test, failing to meet the required times of test. In order to explore the cause of this batch of fastening shaft fracture, the fracture component analysis, hardness detection, macro fracture analysis and scanning electron microscope, metallographic tissue detection and thread contour measurement, the results show that the thread of fastening shaft bottom transition arc radius $R \leq 0.07\text{mm}$, and the alignment more than 6 level unqualified, resulting in the fastening shaft fatigue test thread root stress concentration formed subtle cracks and gradually expand and fracture. Through analysis and discussion, the improvement measures are formulated and the production process of the fastening shaft is strictly controlled, and finally the mechanical properties of the fastening shaft meet the technical requirements.

Keywords: screw bolt; fatigue fracture; stress concentration; transition arc

1 序言

紧固轴是铁设(济南)电气设备有限公司生产的接触网腕臂装置中组合承力索座的重要组成部分, 材质采用40Cr钢, 性能达到8.8级, 属于自制非标M16×1.5螺纹紧固件, 表面处理为一级热浸镀锌, 组装后的组合承力索座疲劳性能需要达 5×10^5 次^[1], 紧固轴疲劳受力方向为轴向和径向两个方向, 分为 F_{1y} 和 F_{1x} , 如图1所示; 承力锁座装配及疲



图1 紧固轴疲劳受力方向

劳试验过程如图2所示。某批次紧固轴装配后,组合承力索座在疲劳试验中,连续3次在未达到规定疲劳次数的情况下,紧固轴发生断裂,导致组合承力索座整体疲劳性能未能达到标准要求。为了找出紧固轴断裂原因,杜绝其在接触网使用中的安全隐患,对断裂紧固轴进行了化学成分、金相组织、断口的宏观形貌及扫描电镜进行分析,找到了疲劳试验中紧固轴早期断裂的原因,提出了改进措施,保证了其在接触网中的使用寿命和安全性。

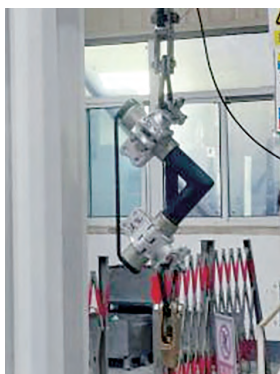


图2 承力锁座装配及疲劳试验过程

2 制造工艺过程调查分析

紧固轴生产加工工艺流程:圆棒下料 $\phi 35\text{mm} \times 100\text{mm}$ →调质→车削→热浸镀锌,其中,圆棒调质过程采用箱式电阻炉加热,加热温度为 $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$,保温1h,保温完成后用铁钩钩入料框,放入快速光亮淬火油冷却,加热至 $(600 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温150min进行回火,回火后水冷。调质后车削加工螺纹,此工艺过程设计可以有效避免螺纹处出现脱碳、螺纹淬火开裂等热处理质量问题。

3 质量分析

在断裂紧固轴没有裂纹的地方取样进行化学成分分析、硬度检测,然后对断口进行宏观检测、电镜扫描,最后采用线切割方法将螺纹断裂处纵向切开,并镶嵌成金相试样。抽取同批次紧固轴进行拉伸试验。

3.1 化学成分

从螺栓非螺纹处取试样,采用直读光谱仪SPECTROMAXx检测其化学成分,结果见表1。从表1可看出,断裂紧固轴的化学成分符合GB/T

3077—2015《合金结构钢》^[2]要求。

表1 紧固轴化学成分(质量分数)(%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
实测值	0.410	0.214	0.586	0.0170	0.0030	0.888	0.0068
标准值	0.370~0.440	0.170~0.370	0.500~0.800	≤ 0.030	≤ 0.030	0.800~1.100	≤ 0.100

3.2 拉伸试验、硬度检测

采用HRS-150T洛氏硬度计对螺栓横截面进行硬度检测,同时抽取同批次螺栓进行拉伸试验,结果见表2。断裂紧固轴的硬度符合GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》规定的8.8级要求^[3]。

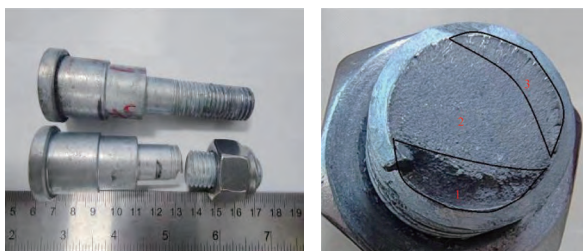
表2 紧固轴硬度与抗拉强度检测结果

取样编号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	硬度 HRC
同批次1 [#]	815.2	651.4	23.9
同批次2 [#]	829.5	657.3	23.8
断裂紧固轴	—	—	24.5
标准要求	≥ 800	≥ 640	22~32

3.3 断口形貌检测

在分析断裂构件时,从断裂构件中选取断口样品。必须对断口进行宏观和微观观察分析,以判断断裂的形式和机制,查找裂纹起裂和扩展的主要原因^[4]。

(1) 断口表面宏观形貌观察 紧固轴断口在第4道螺纹延螺纹根部垂直于轴向,如图3a所示,其断口宏观形貌如3b所示。在图3b中,1区为瞬断区,呈现撕裂、韧窝形貌;2区为裂纹扩展区,由于交变应力值相对小($8.48\text{kN} \pm 2.54\text{kN}$),形成的贝壳纹非常细致;3区为疲劳源区,由于螺纹根部应力集中,因此形成众多应力裂纹。



a) 紧固轴断裂形貌

b) 断口宏观形貌

图3 紧固轴及断口宏观形貌

(2) 断口表面微观形貌 通过对2区进行电镜扫描,断口的微观形貌呈现明显的贝纹线,局部区域可见细小韧窝,断口以解理和准解理断裂为主,如图4所示。断口扩展区和瞬断区的端口上未见异常的非金属夹杂物等冶金缺陷^[5]。

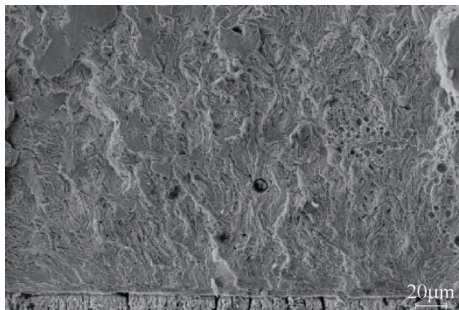


图4 断口形貌:贝纹线、细小韧窝

3.4 金相组织检测

(1) 螺纹处的脱碳检测 按照GB/T 3098.1—2010对螺纹进行脱碳及金相检测,使用金相法可以确定螺纹底部过渡圆弧处无脱碳,如图5所示。检测中发现螺纹牙底过渡圆弧半径 $R \leq 0.07\text{mm}$ 。

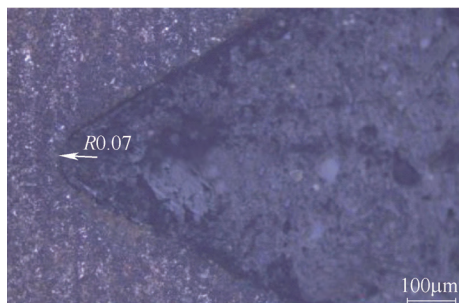
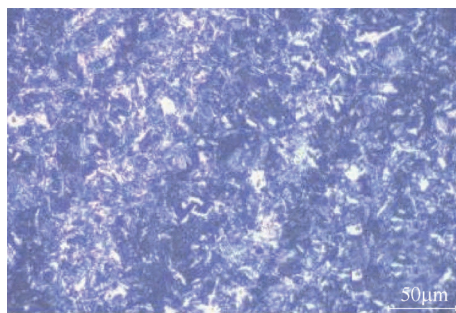


图5 螺纹无脱碳、螺纹牙底过渡半径 R 测量

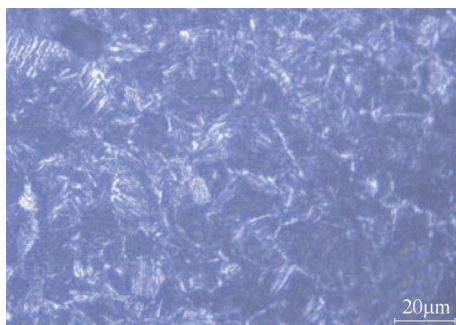
(2) 螺栓金相显微组织检测 在对螺栓部分放大200倍、500倍视场下进行金相组织检测,可以看出组织由回火索氏体、贝氏体、铁素体组成,如图6所示。其中,贝氏体+铁素体的含量约40%,可以判断在调质淬火过程中,马氏体的转变量约60%,不能满足GB/T 3098.1—2010中对力学性能 ≥ 8.8 级的紧固件回火前获得约90%马氏体组织的要求。

3.5 螺纹外形检测

使用金相显微镜分析软件,对螺纹底部过渡圆弧半径进行测量,结果 $\leq 0.07\text{mm}$ (见图5),没能达到GB/T 197—2018《普通螺纹 公差》中关于力学性能 ≥ 8.8 级的紧固件螺纹圆弧半径 $R_{\min} \geq 0.125P$ 的规定。



a) 200 ×



b) 500 ×

图6 螺栓部分金相组织:回火索氏体+贝氏体+铁素体

3.6 检测结果讨论分析

通过以上理化检验结果表明,断裂紧固轴化学成分、非金属夹杂物及硬度符合要求。紧固轴调质后的金相组织含有大量铁素体、贝氏体,铁素体,降低了螺栓的力学性能^[6],也使抗疲劳性能下降;螺纹底部过渡圆弧半径过小,疲劳裂纹源均起源于螺纹根部,疲劳裂纹形成的尖端应力集中是在螺纹处断裂的主要原因之一^[7]。以上两种原因的共同作用,造成了紧固轴疲劳试验早期断裂。

4 改进措施与效果

针对检测结果讨论分析,制定了改善紧固轴金相组织、加大螺纹底部过渡圆弧半径的相应措施。

4.1 改进金相组织

为了改善紧固轴的调质金相组织,进一步提高紧固轴的力学性能,改进紧固轴的加工工艺过程,增加粗车工序:圆棒下料 $\phi 35\text{mm} \times 100\text{mm}$ →粗车(单边留1mm余量,见图7)→调质→车削→热浸镀锌。热处理前增加粗车工序,减少零部件有效截面积,能够提高紧固轴心部淬火马氏体组织转变量;同时调质采用连续式网带炉生产线,加热温度为 $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$,加热网带运转时间 $> 2\text{h}$,用约8%的PAG淬火液冷却,回火温度 $(600 \pm 10)^\circ\text{C}$,

保温150min后水冷。使用连续式网带炉生产线淬火、回火，其加热保温过程的温度均匀，同时淬火冷却使用PAG淬火液能够加大紧固轴的淬火冷却速度，增加淬火马氏体转变量，经过高温回火后主要得到回火索氏体。紧固轴工艺改进后金相组织如图8所示，组织主要为回火索氏体，按GB/T 38720—2020《中碳钢与中碳合金结构钢淬火金相组织检验》评定为4级，确保了产品性能的均匀一致性。

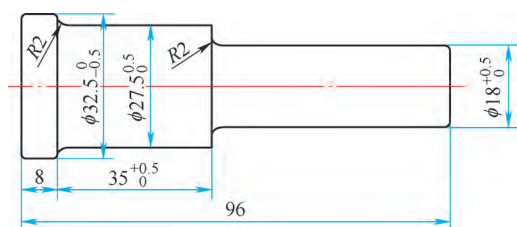


图7 紧固轴粗车



图8 调质后金相组织：回火索氏体

4.2 改进螺纹底部过渡圆弧

按照GB/T 197—2018中关于力学性能 ≥ 8.8 级的紧固件螺纹底部过渡圆弧半径 $R_{\min} \geq 0.125P$ 的规定，将 $R_{\min}$ 更改设计为0.189mm，采用特制刀具加工。更改后的螺纹牙底部过渡圆弧及改善前后螺纹横剖面对比如图9、图10所示。

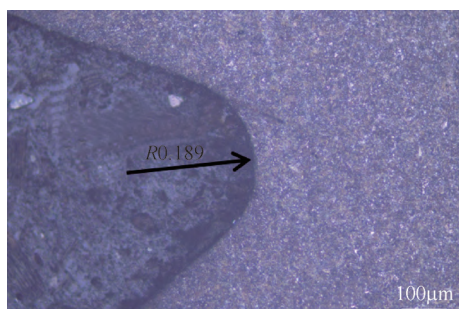


图9 改进后螺纹底部圆弧

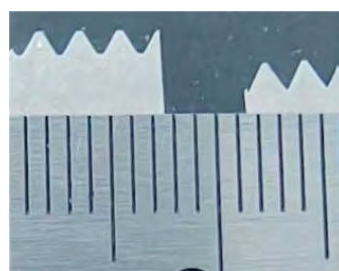


图10 改进前（右）后（左）螺纹底部圆弧对比

5 结束语

检测分析此批次紧固轴的螺纹牙底过渡圆弧半径 $R \leq 0.07\text{mm}$ ，同时金相组织存在大量铁素体、贝氏体，降低了基体强度，最终导致疲劳试验中的紧固轴因螺纹根部应力集中形成细微的裂纹并逐步扩展而早期断裂，没能达到疲劳试验要求次数。通过改进，将螺纹牙底过渡圆弧半径加大至0.189mm，调质金相组织回火索氏体达到4级，紧固轴的各项力学性能达到了相应标准要求，确保了其在高速铁路接触网中的使用安全性。

参考文献：

- [1] 中铁电气化局集团有限公司. 电气化铁路接触网零部件技术条件：TB/T 2073—2020[S]. 北京：中国铁道出版社有限公司，2021.
- [2] 全国钢标准化技术委员会. 合金结构钢：GB/T 3077—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.
- [3] 全国紧固件标准化技术委员会. 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱：GB/T 3098.1—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2010.
- [4] 钟群鹏，赵子华，张峥. 断口的发展及微观断裂机理研究[J]. 机械强度，2005，27（3）：358-370.
- [5] 杨春林，何俊，官彦双，等. 35CrMoV钢螺栓断裂原因分析[J]. 化工装备技术，2023，44（3）：33-36.
- [6] 任智铨，蒋铁流. 某起重机回转支承40Cr连接螺栓断裂失效分析[J]. 山东化工，2015，44（12）：84-87.
- [7] 赵强，曹佳丽，丁景焕，等. 35CrMo钢螺栓断裂原因分析[J]. 上海金属，2017，39（6）：71-75.

MW 20240106