

因装配不当造成的失效案例

螺纹连接是机械设备上最常见和最重要的一种连接方式，其装配工艺是确保机械系统可靠性的最重要技术之一。工程中所使用的绝大多数螺纹紧固件在装配时都必须拧紧，使拧紧的组合件在承受服役应力之前预先受到一个力的作用，这个力称为预紧力。预紧的目的在于增强连接的可靠性、紧密性，以防止受载荷后被连接件间出现设计不允许存在的间隙或发生相对滑移，甚至引起微动疲劳损伤。研究表明，适当地增加预紧力对提高紧固件的可靠性和疲劳强度是有利的，但预紧力过大会导致紧固件在装配拧紧过程中因应力过大而拉长、螺纹脱扣甚至过载断裂。紧固件拉长即发生不可恢复的塑性变形，从而造成预紧力松弛。因此，在设计时既要有较高的预紧力，又要使预紧力在安全工作范围内，确保紧固件在拧紧过程和承受工作载荷过程中不会发生过载现象。

8.1 螺纹紧固件的预紧力选取

一般而言，螺纹紧固件装配拧紧后产生的预紧力不得超过其材料的下屈服强度 R_{eL} 的 80%，对于一般连接用的钢制紧固件的预紧力 F_0 ，推荐按下列关系确定：

$$\text{碳素钢螺栓} \quad F_0 \leq (0.6 \sim 0.7) R_{eL} A_1 \quad (8-1)$$

$$\text{合金钢螺栓} \quad F_0 \leq (0.5 \sim 0.6) R_{eL} A_1 \quad (8-2)$$

式中， A_1 为紧固件危险截面的面积。

工程中，通常借助指示式扭力扳手来控制拧紧力矩，然而对螺纹连接而言最重要的指标不是紧固扭矩，而是轴向预紧力。因此，研究螺栓紧固扭矩 T 与轴向预紧力 F 之间的关系是十分重要的。三角形螺纹螺栓拧紧时紧固扭矩 T 与螺栓轴向预紧力 F 之间的关系为

$$F = \frac{2T}{\frac{\mu_s}{\cos\alpha} d_2 + \frac{P}{\pi} + d_w \mu_w} \quad (8-3)$$

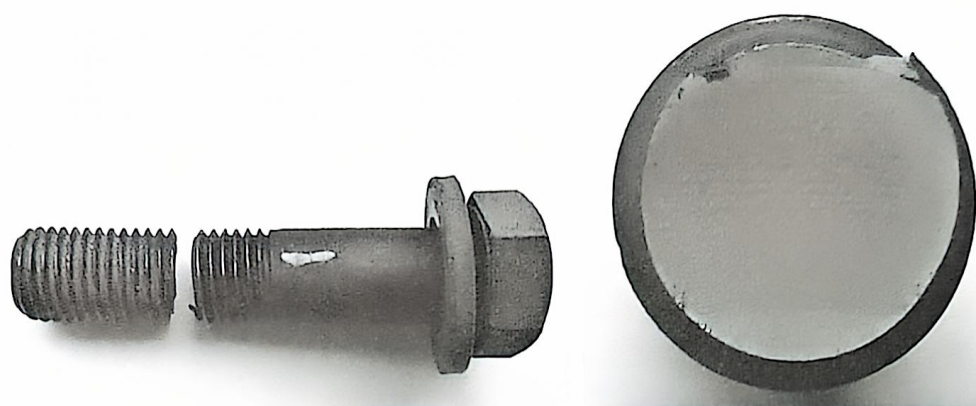
式中, d_2 为螺纹中径; d_w 为支撑面等效摩擦直径; P 为螺距; α 为牙型半角或牙侧角; μ_s 为螺纹摩擦因数; μ_w 为支撑面摩擦因数; F 为螺栓轴向预紧力; T 为紧固扭矩。

从式 (8-3) 可以清楚看出, 螺栓的轴向预紧力由紧固扭矩 (T)、螺栓或螺母的规格参数 (d_2 、 d_w 、 P 、 α) 和螺纹或支撑面的摩擦因数 (μ_s 和 μ_w) 确定。用相同的扭矩 (如 $10\text{N} \cdot \text{m}$) 拧紧符合 GB/T 3098.1—2010 8.8 级的 M10 螺栓, 当螺纹摩擦因数为 0.2 时, 得到的螺栓轴向预紧力约为 14.9kN; 然而当螺纹摩擦因数为 0.1 时, 得到的螺栓轴向预紧力达到 27.4kN。由此可见, 螺栓的轴向预紧力受摩擦因数的影响极大。实际生产中常常会发生螺栓或螺母沾上油或润滑剂的情况, 此时摩擦因数变小, 在紧固扭矩不变的情况下轴向预紧力增加, 从而会导致螺栓在装配过程中发生过载断裂。

8.2 装配预紧力与防松

紧固件装配预紧力不足, 安装件未被紧密固定, 会增加使用中的不稳定性, 尤其在交变载荷作用下, 螺栓不仅受到拉伸和冲击载荷, 还会承受一个弯曲载荷, 在此状态下反复连续作用, 螺栓会发生疲劳断裂。其断裂位置一般位于与螺母配合部分的第一扣螺纹根部, 断口形貌常常表现为多源低应力高周疲劳断裂特征, 在断口附近的螺纹根部常常会存在细小的疲劳裂纹。例如: 轮边减速器电动机的连接螺栓共有 12 根, 强度级别为 10.9 级, 经服役使用不到半年后螺栓全部发生断裂。如图 8-1a 所示, 螺栓断裂位置均位于与螺纹孔配合的第一扣螺纹根部。如图 8-1b 所示, 螺栓断面平坦, 四周未见明显的塑性变形痕迹, 可见明显的疲劳弧线。裂纹源位于螺纹底部, 附近存在较多轮辐状台阶, 该台阶为不同裂纹交汇形成的台阶, 具有多源疲劳特征。断面最终瞬断区面积均较小, 不足整个断面的 5%, 整个断面具有高周低应力疲劳特征, 螺栓断裂时受到的名义应力较小。经解剖检查, 螺栓材质、硬度及螺纹过渡处质量均符合设计要求。从螺纹胶涂抹情况、垫片磨损形貌和断裂螺栓遗留在螺纹安装孔内的位置等综合分析可知, 安装后的螺栓未能拧紧, 且螺纹胶涂抹量不够, 导致螺栓在振动载荷作用下发生松动, 且导致螺栓承受弯曲应力。在交变应力连续作用下, 在螺纹底部应力集中处萌生裂纹, 并逐渐扩展导致断裂。

安装时螺栓拧紧不均匀而引起受力不均匀, 当增加设备运行时的服役应力后, 拧紧力过大的螺栓易引起过载断裂。对于重要的螺纹紧固件, 应尽可能不采



a) 螺栓断裂部位形貌

b) 螺栓断口的宏观形貌

图 8-1 轮边减速器电动机连接螺栓的断裂情况

用直径过小的螺栓（例如小于 M12），以防止预紧力过大而导致紧固件过载断裂。

8.3 案例分析

8.3.1 机车电动机吊杆螺栓断裂分析

1. 案例简介

某机车电动机吊杆螺栓材料为 40Cr，强度级别为 8.8 级。螺栓主要制备工艺为原材料→下料→热锻→正火→机加工→调质→磨加工→滚压螺纹→发黑。运行过程中吊杆螺栓发生断裂，螺栓要求紧固力矩为 $1300\text{N} \cdot \text{m}$ 。

2. 理化检验

(1) 宏观形貌分析 共有两根螺栓一起连接电动机和吊杆。图 8-2 中 1#螺

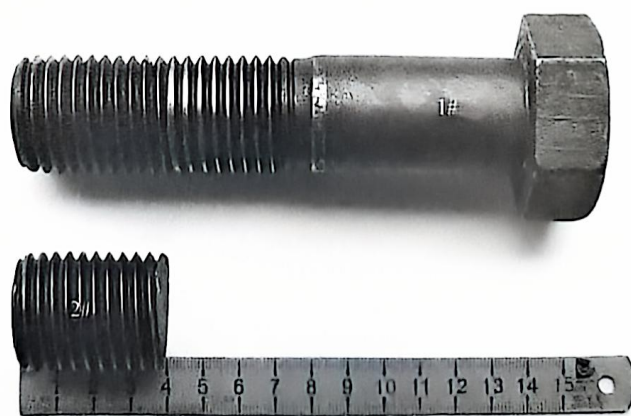


图 8-2 螺栓的宏观形貌

栓为右侧螺栓，该螺栓未发生断裂，但在啮合处螺纹磨损严重，螺栓存在弯曲变形现象；2#螺栓为左侧螺栓，在啮合处螺纹根部发生疲劳断裂。

图 8-3 所示为 2#螺栓断口的宏观形貌。断口较平坦，表面除有少量氧化锈蚀外无其他明显腐蚀产物和低倍缺陷，断口四周无明显的宏观塑性变形。断口经清洗后显示金属本色，可见明显的疲劳弧线。根据断口形貌特征可以初步推测裂纹源位于螺纹底部，附近存在较多轮辐状台阶，该台阶为不同裂纹交汇形成的台阶，具有多源疲劳特征。断口最终瞬断区位于下方区域，该区域面积较小，不足整个断面的 10%，整个断面具有高周低应力疲劳特征。

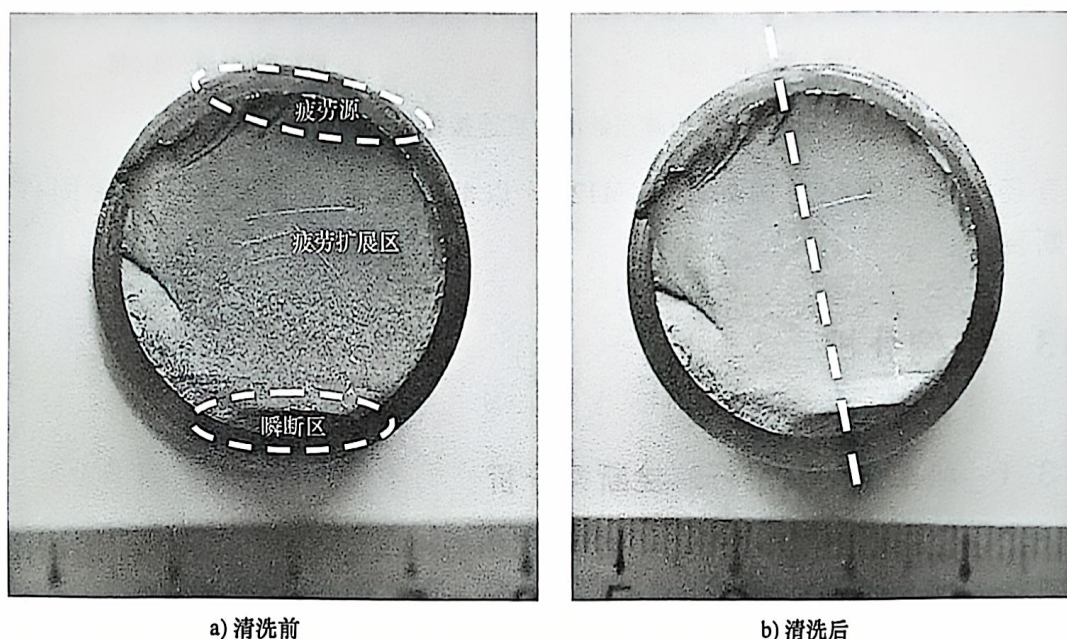


图 8-3 2#螺栓断口的宏观形貌

(2) 微观形貌检查 将 2#螺栓断口清洗后通过扫描电子显微镜观察其微观形貌。如图 8-4 所示，疲劳源附近未见明显氧化、夹渣等材料缺陷，疲劳扩展区可见明显的疲劳条带，最终瞬断区微观形貌以撕裂韧窝为主。

(3) 金相检查 在断裂螺栓上取样进行金相检查。螺栓的非金属夹杂物如图 8-5 所示。其非金属夹杂物级别为：A1.0、A0.5e、D1.0D、TiN0.5，原材料洁净度较好。

图 8-6 所示为螺栓螺纹底部的显微组织。螺纹底部过渡较圆滑，未见氧化折叠现象，螺纹表面存在滚压螺纹形成的形变流线。通过以上特征可以判断，该螺栓加工工艺为调质处理后进行滚压螺纹。图 8-7 所示为螺栓基体的显微组织。其组织中存在偏析带，为回火索氏体+少量上贝氏体。

为进一步分析螺栓早期疲劳断裂的原因，采用线切割沿图 8-3b 虚线处取样，制成金相试样观察螺栓断裂源附近截面的微观形貌和显微组织。如图 8-8 和

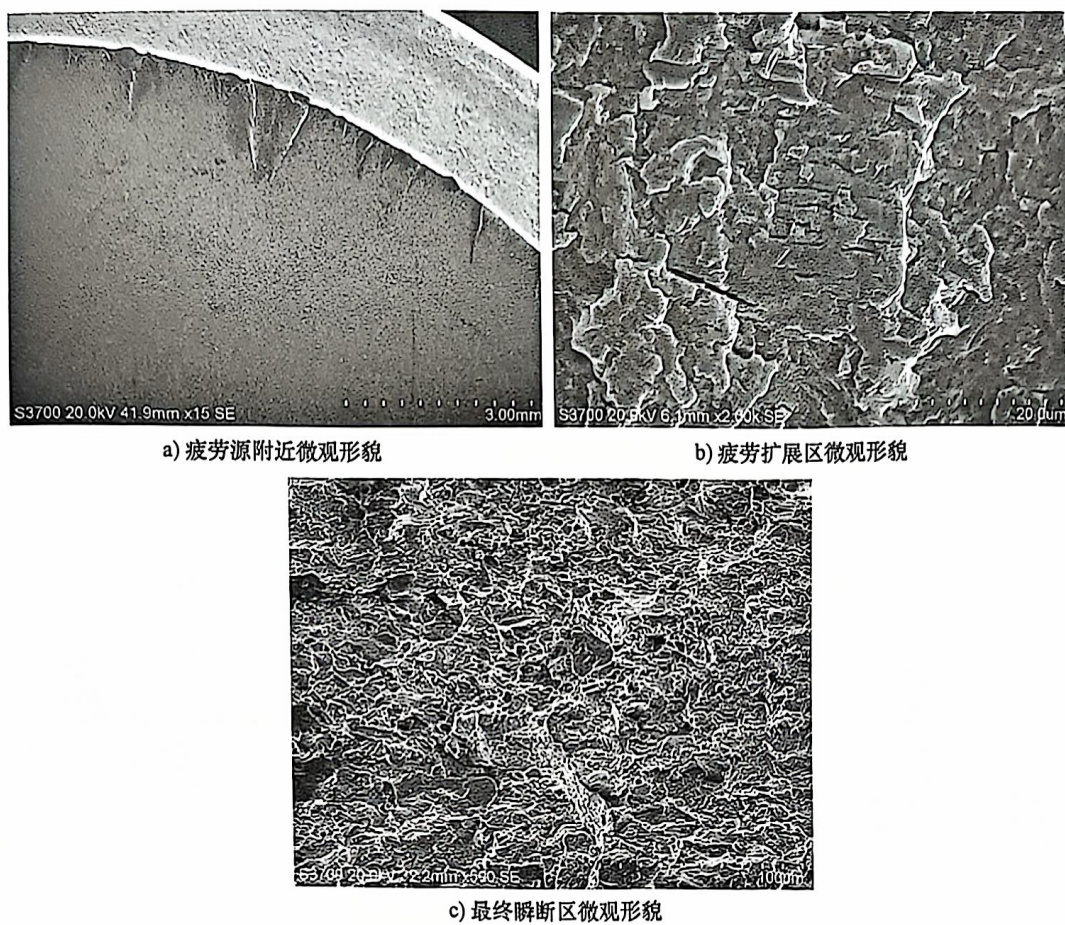


图 8-4 螺栓断口各区域的微观形貌

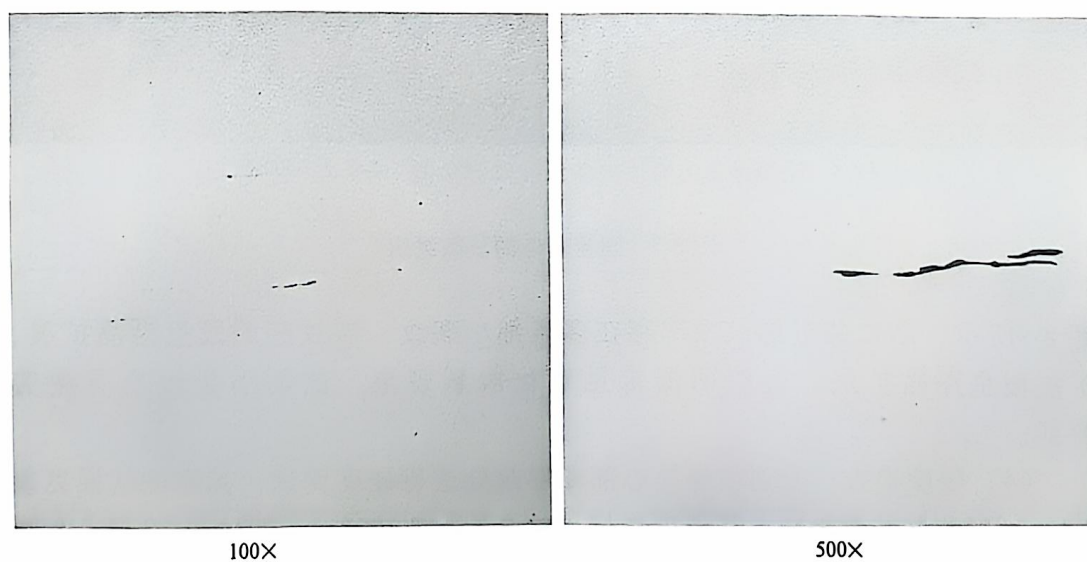


图 8-5 螺栓的非金属夹杂物

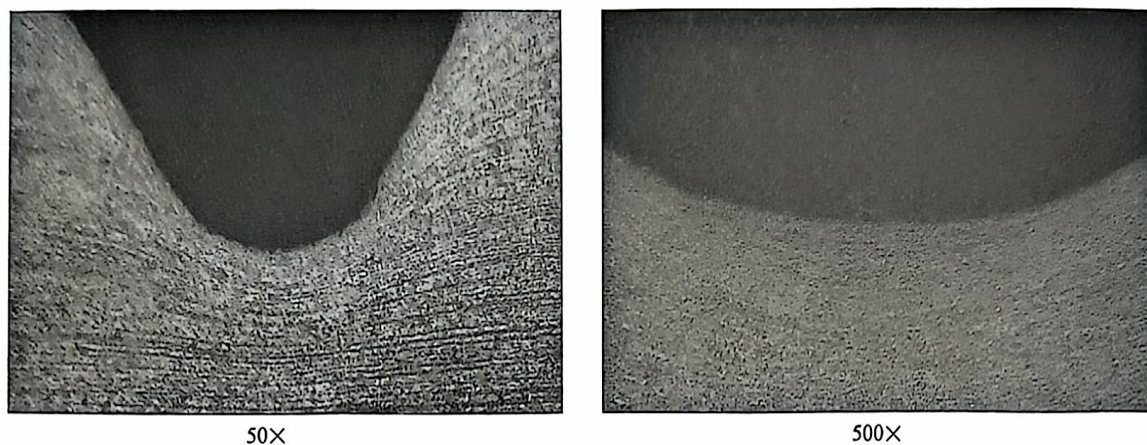


图 8-6 螺栓螺纹底部的显微组织

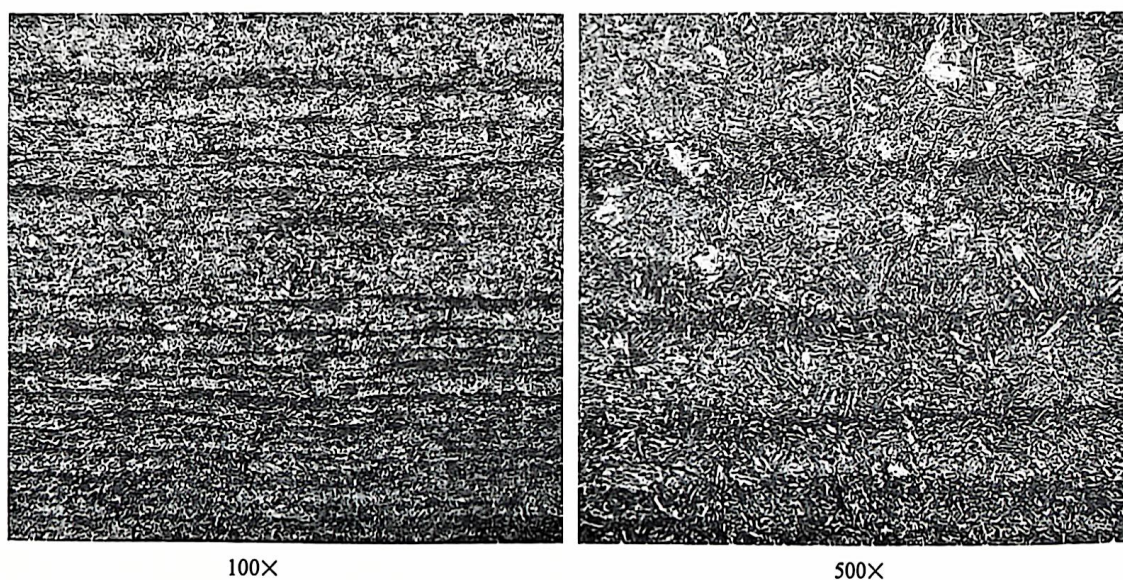


图 8-7 螺栓基体的显微组织

图 8-9所示，断口邻近螺纹根部存在多条细小裂纹，裂纹起始段呈沿晶扩展，扩展段呈穿晶扩展，裂纹两侧未见氧化脱碳现象，该细小裂纹具有疲劳特征。

(4) 硬度检查 分别在螺栓心部和螺纹处进行硬度测试，其测试结果见表 8-1。硬度测试结果表明，其硬度指标均符合 GB/T 3098.1—2010 中关于 8.8 级螺栓的硬度要求，其中第 3 测试点维氏硬度大于第 1 测试点，这是由于螺栓滚压螺纹工艺导致的加工硬化。

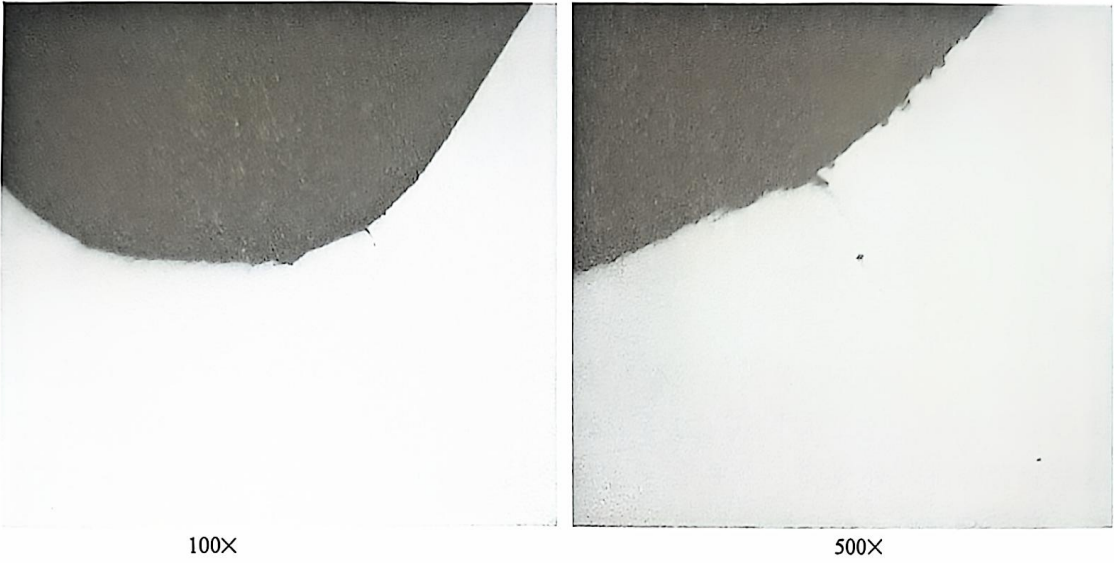


图 8-8 螺栓断口邻近螺纹根部的微观形貌

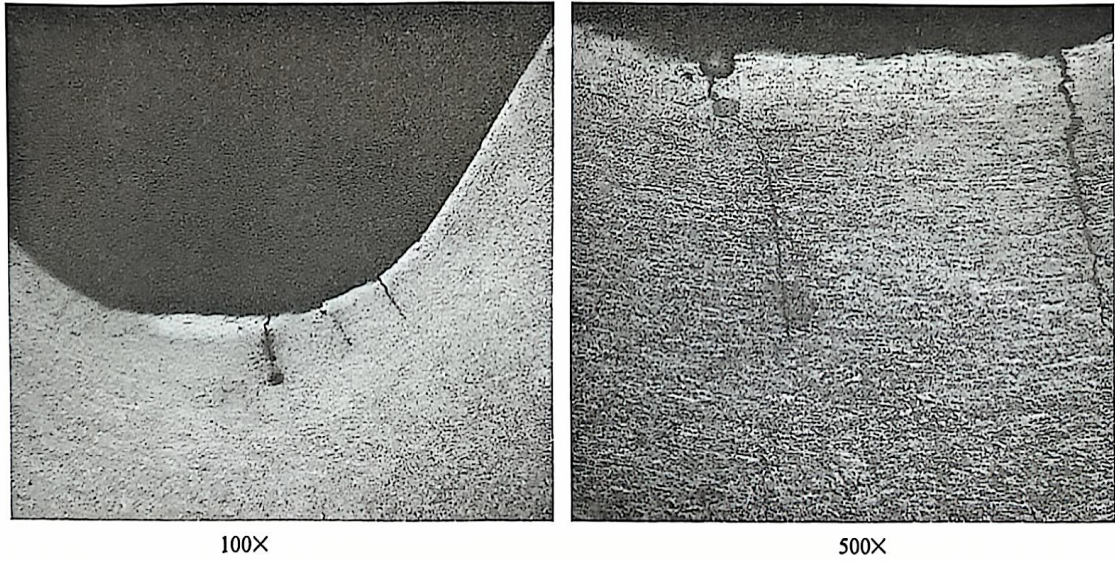


图 8-9 螺栓断口邻近螺纹根部的显微组织

表 8-1 螺栓各区域硬度测试结果

类别	螺栓心部硬度		螺纹处硬度(测试位置见图 5-23) HV0.3		
	HRC	HBW10/3000	第 1 测试点	第 2 测试点	第 3 测试点
1#试样	31.0、31.0、31.5	285	300、301、302	298、308、305	317、316、317
2#试样	30.5、30.5、31.0	—	298、296、301	307、306、307	316、318、318
GB/T 3098.1—2010 中 关于 $d>16\text{mm}$ 的 8.8 级螺栓相关要求	23~34	250~331	未脱碳:第 2 测试点的维氏硬度值应等于或 大于第 1 测试点维氏硬度值减去 30HV0.3 未增碳:第 3 测试点的维氏硬度值应等于或 小于第 1 测试点维氏硬度值加上 30HV0.3		

3. 分析与讨论

断裂螺栓的化学成分符合 40Cr 钢的标准要求，显微组织为回火索氏体，螺纹根部未见脱碳和折叠现象，其硬度值也符合标准要求，表明材料和热处理工艺正常。

断口附近无明显塑性变形，断面平坦，因此螺栓不是由于过载引起的断裂。根据断口宏观形貌中的贝纹线和微观形貌中扩展区的疲劳辉纹，可以推断断口为疲劳断裂。

从疲劳断口可见，疲劳源处存在多次裂纹交汇台阶，属于多源疲劳断裂。疲劳源数目一般受应力水平和应力集中的影响，疲劳断口上往往存在多个疲劳源。这些疲劳源并不处在同一个垂直于主应力的平面上，因此当疲劳裂纹往前扩展时，它们会交汇成单一裂纹继续向前扩展，并在断口上留下交汇台阶。此外，瞬断区只占很小一部分，而疲劳扩展区面积很大，这说明整个螺栓所受应力较小。

4. 结论

螺栓的断裂性质为高周低应力疲劳，造成其早期失效的原因可能与螺栓装配工艺不当有关，可采取如下措施进行改进：

- 1) 加强安装环节的管理，确保螺栓达到设计的预紧力，并采取适当的防松措施。
- 2) 安装螺栓时，保证吊杆安装孔与电动机安装孔的同心度在要求范围内。

8.3.2 轮盘螺栓杆部断裂分析

1. 案例简介

轮盘螺栓的材料为 35CrMo，强度级别为 10.9 级。装配时在轮盘螺栓光杆处发生断裂。

2. 理化检验

(1) 宏观形貌分析 图 8-10 所示为断裂螺栓的宏观形貌。螺栓从最小直径光杆处发生断裂，并发生弯曲变形。断口与最大扭转应力方向呈 45° ，属于切断。螺栓断口的宏观形貌如图 8-11 所示。断口四周较平滑，中心部分断口呈纤维状。



图 8-10 断裂螺栓的宏观形貌

维状，断口具有扭转断裂特征。

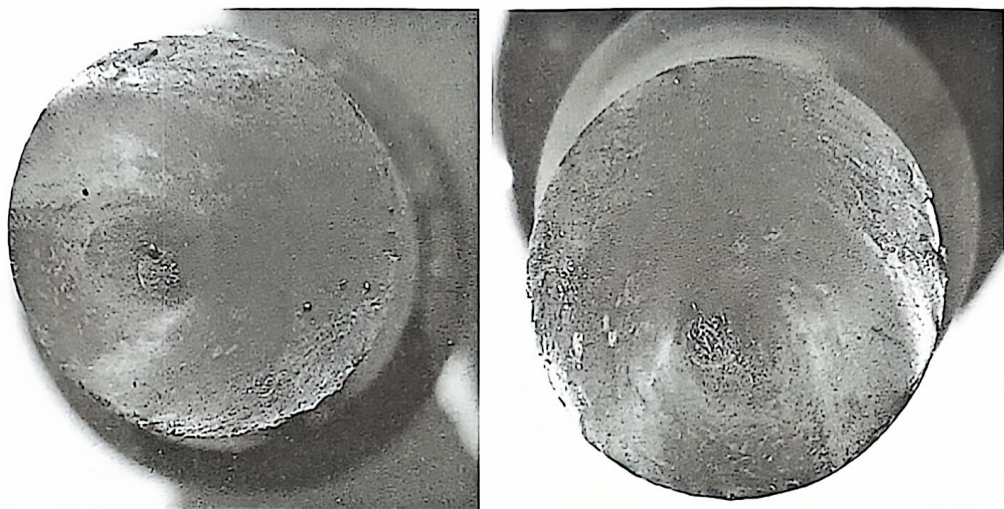


图 8-11 螺栓断口的宏观形貌

(2) 微观形貌分析 通过扫描电子显微镜观察，螺栓断口平滑区的微观形貌如图 8-12 所示。该区域的微观形貌主要为塑性韧窝，具有明显的方向性。螺栓断口心部粗糙区的微观形貌如图 8-13 所示。该区域微观形貌以撕裂韧窝为主，未见明显夹渣、疏松缺陷。

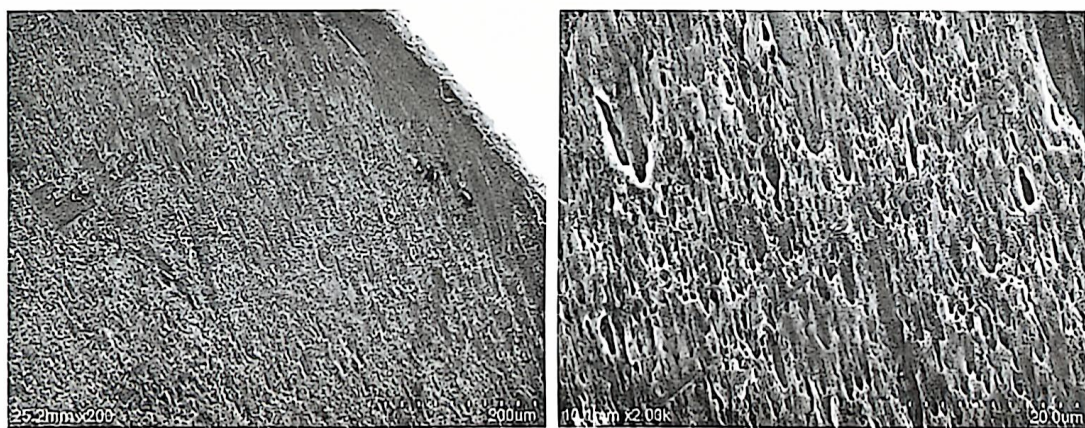


图 8-12 螺栓断口平滑区的微观形貌

(3) 化学成分检查 用光谱法对断裂螺栓进行化学成分分析，各元素成分含量均符合 35CrMo 钢的标准要求。

(4) 硬度检查 对断裂螺栓的表面和心部分别进行维氏硬度测试，表面硬度为 348~356HV0.3，心部硬度为 346~350HV0.3，均符合 10.9 级螺栓的技术要求。

3. 结论

失效螺栓断口韧窝具有明显的方向性，属于典型的扭转断裂特征。这表明该

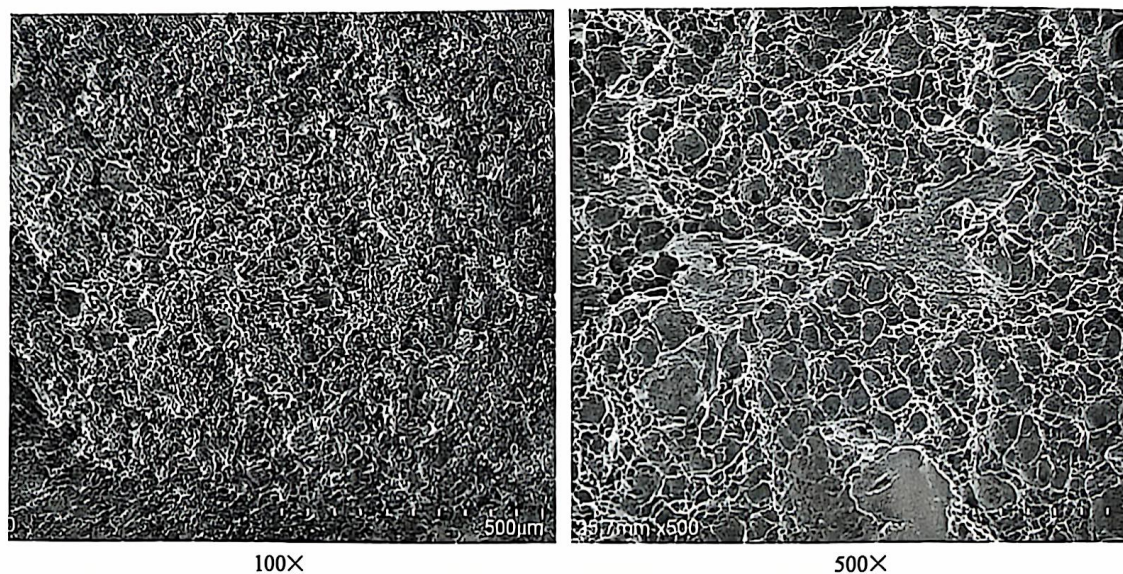


图 8-13 螺栓断口心部粗糙区的微观形貌

螺栓是在装配时，由于装配扭转力过大而发生断裂的。建议制定合适的安装工艺，安装时采用指示式扭力扳手安装，防止安装扭力过大而造成扭转断裂。