

## 高强螺栓断裂失效分析

姜成利 申志清

通标标准技术服务(青岛)有限公司, 山东 青岛 266101

**[摘要]**某公司在对桥梁使用螺栓进行紧固时发现原始状态已经松动, 可以直接用开口扳手拆卸, 拆卸完成后, 用开口扳手紧固时螺栓断裂, 螺栓规格是 M30×160 10.9, 螺栓产品标准是 ISO 4014:2011(E)。现对该断裂螺栓进行失效分析, 找出螺栓失效原因。分析项目主要包含断口分析、化学成分分析、力学性能分析、硬度分析、非金属夹杂物分析和金相组织分析。通过对断裂的高强度螺栓的失效分析, 发现断裂产生的原因为淬火裂纹。

**[关键词]**高强度螺栓; 失效; 淬火裂纹

DOI: 10.33142/ec.v3i2.1460

中图分类号: TG142.15

文献标识码: A

## Fracture Failure Analysis of High Strength Bolt

JIANG Chengli SHEN Zhiqing

SGS-CSTC Standard Technical Services (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266101, China

**Abstract:** A company found that original state of bridge bolt was loose while it was used for fastening and it can be disassembled with an open spanner directly. After disassembly, the bolt broke when it was fastened with an open spanner, which specification is M30 × 160 10.9 and standard is ISO 4014:2011 (E). Now the failure analysis of broken bolt is carried out to find out failure reason of the bolt. Analysis items mainly include fracture analysis, chemical composition analysis, mechanical property analysis, hardness analysis, non-metallic inclusion analysis and metallographic structure analysis. Through failure analysis of the broken high strength bolt, it is found that cause of fracture is quenching crack.

**Keywords:** high strength bolt; failure; quenching crack

某公司在对桥梁使用螺栓进行紧固时发现原始状态已经松动, 可以直接用开口扳手拆卸, 拆卸完成后, 用开口扳手紧固时螺栓断裂, 螺栓规格是 M30×160 10.9, 螺栓产品标准是 ISO 4014:2011(E)。现对该断裂螺栓进行失效分析, 找出螺栓失效原因。分析项目主要包含断口分析、化学成分分析、力学性能分析、硬度分析、非金属夹杂物分析和金相组织分析。



图1 样品照片

### 1 断口形貌分析

采用扫描电镜(SEM)对螺栓断裂表面进行观测。为了便于观察, 分别在断口上进行标记 A、B 区域。由图 2 宏观形貌可知, 裂纹表面共存在 3 处裂纹源。由图 3~图 5 可知, 裂纹源 1 位于外表面, 裂纹主要呈现沿晶断裂形貌<sup>[1]</sup>, 并且裂纹存在二次裂纹。由图 6~图 8 可知, 裂纹源 2 位于外表面, 裂纹主要呈现沿晶断裂形貌, 并且裂纹存在二次裂纹。由图 9~图 11 可知, 裂纹源 3 位于外表面, 裂纹主要呈现沿晶断裂形貌, 并且裂纹存在二次裂纹。由图 12 可知, A 区

域裂纹主要呈现等轴韧窝形貌。由图 13 可知，B 区域裂纹主要呈现剪切韧窝形貌。

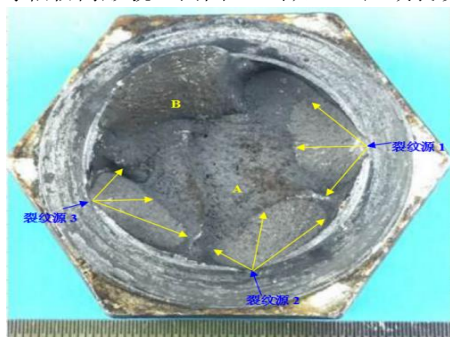


图 2 断口宏观形貌

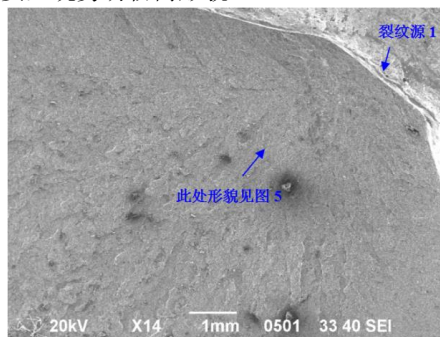


图 3 图 2 中裂纹源 1 处形貌，主要呈现沿晶断裂形貌

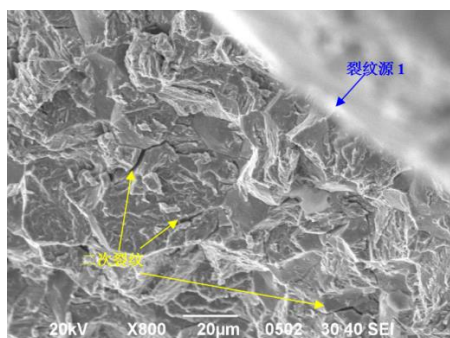


图 4 图 3 中裂纹源 1 处形貌放大图，呈现沿晶断裂形貌，存在较多的二次裂纹

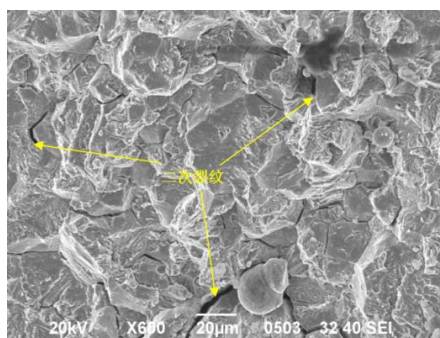


图 5 图 3 中指定位置处放大形貌，呈现沿晶断裂形貌，存在较多的二次裂纹

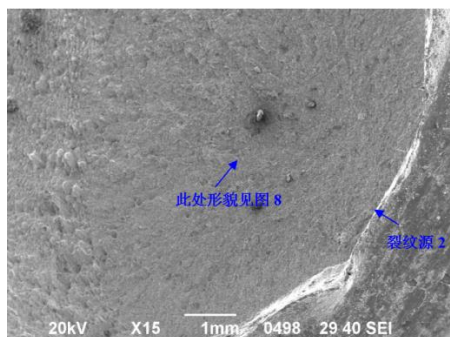


图 6 图 2 中裂纹源 2 处形貌，呈现沿晶断裂形貌

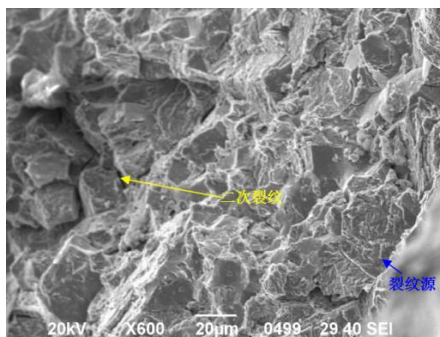


图 7 图 6 中裂纹源 2 处形貌放大图，呈现沿晶断裂形貌，存在二次裂纹

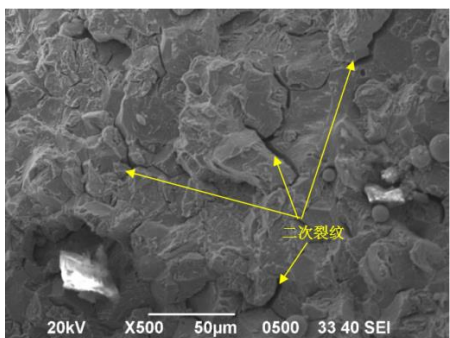


图 8 图 6 中指定位置处放大形貌，呈现沿晶断裂形貌，存在较多的二次裂纹

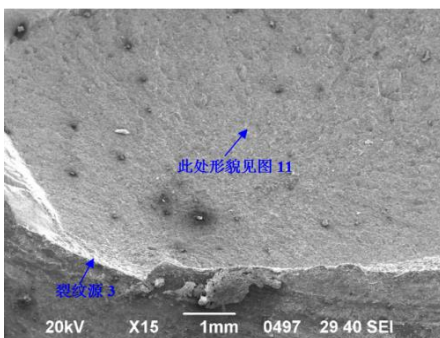


图 9 图 2 中裂纹源 3 处形貌，呈现沿晶断裂形貌

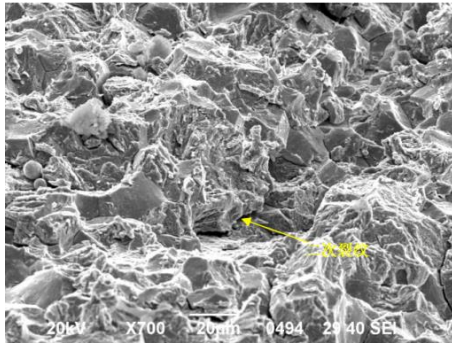


图10 图9中裂纹源3处形貌放大图, 呈现沿晶断裂形貌, 存在较多的二次裂纹

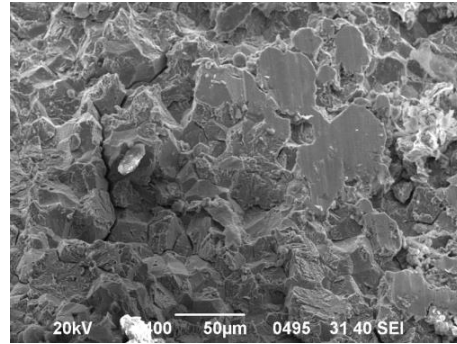


图11 图9中指定位置处放大形貌

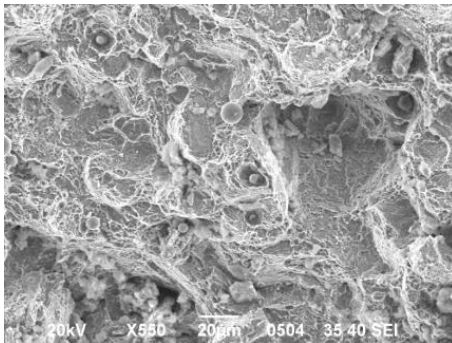


图12 图2中区域A放大形貌, 呈现等轴韧窝形貌

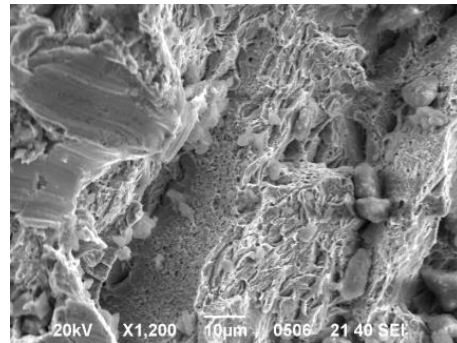


图13 图2中区域B放大形貌, 呈现剪切韧窝形貌

## 2 化学成分分析

从断裂螺栓上取样, 采用斯派克光谱仪(型号是 MAXxLMM15)进行化学成分测试, 测试标准是 GB/T 4336-2016, 由下表1可知, 断裂螺栓的化学成分无异常, 符合标准的要求。

表1 化学成分表

元素	C	P	S	B	结论
要求, %	0.20~0.55	≤0.025	≤0.025	≤0.003	-
结果, %	0.42	0.019	0.007	0.0004	符合

## 3 拉伸试验

从断裂螺栓上取样, 采用美特斯万能拉伸试验机(型号是 CMT5205)进行力学性能测试, 测试标准是 GB/T 228.1-2010, 由下表2可知, 断裂螺栓的力学性能无异常, 符合标准的要求。

表2 力学性能测试结果

测试项目	试样类型	抗拉强度 ( $R_m$ ) (MPa)	规定塑性延伸强度 ( $R_{p0.2}$ ) (MPa)	断后伸长率(A) (%) $L_0=5.65\sqrt{S_0}$	断面收缩率 (Z) (%)	结论
要求	-	≥1040	≥940	≥9	≥48	-
结果	圆形截面试样	1149	1043	15.0	55	符合

#### 4 硬度测试

测试方法:

从断裂螺栓上取样, 采用洛氏硬度计(型号是 600MRD)进行硬度性能测试, 测试标准是 GB/T 230.1-2009, 由下表 3 可知, 断裂螺栓的力学性能无异常, 符合标准的要求。

表 3 硬度性能测试结果

测试项目	样品	测试部位	结果			要求	结论
HRC	-	心部	35.4	35.2	35.3	32-39	符合

#### 5 非金属夹杂物分析

从断裂螺栓上取样, 将样品经镶嵌, 清洁, 打磨, 抛光后在金相显微镜下(型号是 IMAGER. A2M)观察, 测试标准是 GB/T 10561-2005 方法 A, 由下表 4 可知, 断裂螺栓的非金属夹杂物相对较少, 无明显的异常。

表 4 非金属夹杂物测试结果

样品	类型 A		类型 B		类型 C		类型 D		DS 类
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
	0.5	-	-	-	-	1.0	-	1.0	

#### 6 金相分析

从螺栓近断口部位横向剖切螺栓, 经研磨、抛光和腐蚀后, 其金相组织形貌如图 14 所示, 由图 14 可知, 螺栓的外表面存在深入基体内部的裂纹, 同时采用 SEM-EDS 对裂纹内部的物质进行分析可知, 表面裂纹内存在 ZnO, 因此表面的达克罗层已深入至表面裂纹, 同时裂纹末端存在氧化锈蚀, 由此推测, 该裂纹在达克罗工艺之前就存在, 并且裂纹无脱碳, 所以推测裂纹为淬火裂纹, 该部位的金相组织为回火索氏体<sup>[2]</sup>。图 14 中裂纹源部位的金相组织为回火索氏体。



图 14 截面金相组织(放大倍数 100 倍)

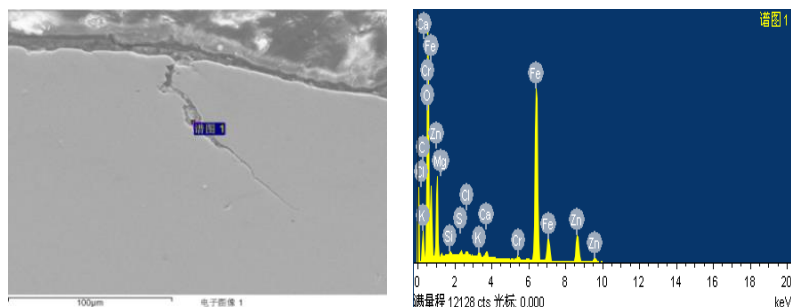


图 15 图 14 中表面裂纹夹杂物成分为(%)C:1.35, O:33.57, Mg:0.55, Si:0.28, S:0.27  
Cl:0.31, Ca:0.56, Cr:0.41, Fe:44.74, Zn:17.60, K:0.35

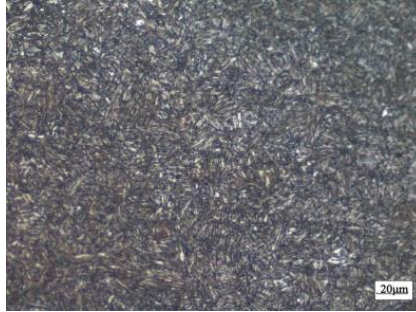


图 16 螺栓截面金相组织（放大倍数 500 倍）

## 7 分析讨论

螺栓的化学成分、拉伸性能、硬度均符合标准要求，并且非金属夹杂物较少；螺栓金相组织为回火索氏体，符合螺栓热处理后特征。沿着靠近裂纹源部位将螺杆横向剖切后发现外表面存在表面微裂纹，并且表面的达克罗层深入至基体内部，裂纹末端也存在氧化锈蚀，由此判定裂纹在达克罗工艺之前就存在。

螺栓断口存在 3 个裂纹源，裂纹均呈现沿晶断裂形貌，并且裂纹存在二次裂纹，这也符合淬火裂纹特征，同时裂纹表面没有脱碳，因此综合上述测试结果判定此表面裂纹为淬火过程中产生的裂纹。

综合上述分析，螺栓的材质无异常，但是热处理品质不高，在头部和杆部的结合部位出现了较多的淬火裂纹，这些淬火裂纹在随后的拧紧过程中成为裂纹源，最终在拧紧力作用下造成螺栓断裂。

## 8 结论

(1) 螺栓的化学成分、拉伸性能、硬度均符合标准要求，非金属夹杂物较少，金相组织也符合热处理特征。

(2) 螺栓在过渡弧部位存在原始淬火裂纹，安装后螺栓沿着表面裂纹处开裂，后续的紧固过程使裂纹沿着开裂的部位扩展，最终螺栓断裂。

### [参考文献]

[1]上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1987.

[2]上海交通大学《金相分析》编写组. 金相分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1982.

作者简介：姜成利（1973.11-），男，毕业于大连水产学院，机械设计与制造专业，本科学历，当前就职于通标标准技术服务（青岛）有限公司，任职材料实验室经理，目前职称高级工程师（副高）。