

汽车后桥稳定杆螺栓断裂失效分析

□ 合肥美桥汽车传动及底盘系统有限公司 焦东风
□ 东莞市星仁杰金属材料科技有限公司 金林奎



金林奎 高级工程师

摘要：阐述了40Cr钢稳定杆螺栓断裂的原因。经过理化检测分析，失效件开裂是由于螺母受纵向拉伸和侧向牵引的拉应力，使工件表层产生拉应力开裂。工件表面较严重的脱碳层以及酸洗腐蚀的凹坑，是疲劳裂纹的策源地，服役承载的交变应力使疲劳裂纹源继续扩展，沿同心圆的弧形推进线继续向前延伸。当疲劳裂纹扩展至峰值，引起裂纹迅速扩展至瞬间断裂。轧制过热造成的粗大组织以及非金属夹杂物熔融的晶间熔洞组织，显著降低材料强度，增加材料脆性，进一步推动裂纹的扩展和断裂。

关键词：拉应力；表面脱碳层；酸洗腐蚀坑；疲劳裂纹；晶间熔洞

1. 状态说明

40Cr钢稳定杆螺栓，在汽车后桥上起到支撑稳定杆的作用，并以锁紧螺母将稳定杆固定。稳定杆螺栓的加工工艺流程为：锯床下料→锻造→调质处理→杆部搓丝→镀锌处理。在服役过程中，稳定杆螺栓在锁紧螺母的作用下，产生一个拉伸的纵向应力。随着工件的服役承载，稳定杆产生较强的牵引，螺栓受到向右的侧向拉应力。整车试行过程中，螺栓的杆部发生早期失效断

裂。该螺栓的使用周期极短，持续时间不足24h。断裂部位位于图1中的A处，与杆部纵向近似垂直地横向断裂。

2. 宏观检测

目测断口的左侧一半以上面积的区域色泽较浅，右侧部位的色泽较深。断口宏观检测，图2所示左侧为同心圆的多条圆弧推进线，这是疲劳扩展的断口特征形貌，同心圆的圆心为疲劳源。断口的右侧呈放射状快速断裂特

征，右侧边缘的倾斜部位为终断区剪切唇^[1]。



图1 螺栓断裂部位（实物）



图2 螺栓失效断口（实物）

3. 化学分析

断裂失效件截取样块进行化学成分检测^[2]，见表1。

4. 力学性能

库存产品抽取3件进行力学性能试验检测^[3]，见表2。

5. 金相检验

用扫描电镜对断口进行检查，在裂纹源附近可见大量放射状条纹。放射状条纹的收敛处，明显指出裂纹源位于稳定杆螺栓的表面。工件的表面有许多断续分布的大小不一的凹槽及剥落坑，在裂纹源左侧有两块较大的并排分布的剥落坑，剥落坑的下面可见多源台阶条纹，这种多源台阶条纹属于应力集中的典型特征。在放射状条纹的突起处，明显分布数量众多的颗粒状产物，这种细小的颗粒状产物，经检测确认为A类非金属夹杂物，属于典型的硫化物夹杂（见图3）。心部调质区域的断口检查，扫描电镜观察结果显示为韧性断裂，图4显示以韧窝及撕裂棱的特征形貌为主。在韧窝的底部同样存在颗粒状及条状硫化物夹杂。

在试样的表层存在一条细微的倾斜裂纹，且裂纹两侧有较严重的脱碳层。裂纹间隙内明显可见凸出的圆弧状晶粒自由表面，裂纹内为断续分布的孔洞，这是组织疏松和气泡的特征形态。综合以上组织特征可以断定，该裂纹为原材料表层皮下气泡引起的折叠裂纹^[4]（见图5）。折叠裂纹的表层附近，有一条与工件表面垂直的微裂纹，裂纹扩展呈周期往复的曲折状穿晶形态，这种形

式的穿晶微裂纹，属于疲劳扩展的特征形貌^[5]（见图6）。

样块左侧的表层相距不足10mm长度范围内，断续分布数十条表面微裂纹，裂纹沿表层圆弧状凹坑底部开裂。根据金相组织检查初步推断，表层的凹坑是工件表面镀锌过程中，酸洗时间过长留下的腐蚀坑^[6]。表面微裂纹的深度在0.10~0.20mm。表层密集分布的黑色点状组织

是表面镀锌层，白亮色块状组织为脱碳层中的铁素体组织。经测量镀锌层为0.04mm，脱碳层为0.10mm，其中全脱碳层为0.04mm，半脱碳层为0.06mm（见图7）。样块右侧的表层灰黑色镀锌层更加明显。右侧的脱碳层深度与左侧的脱碳层相近，心部组织仍然是保持马氏体位向的索氏体组织（见图8）。

断口开裂初期呈平直的穿晶

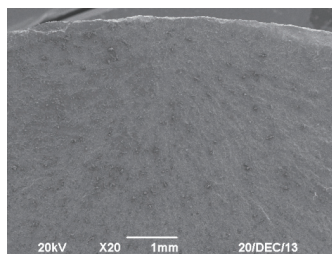


图3 裂纹源断口形貌

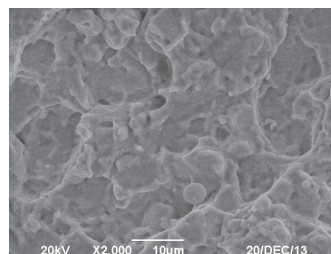


图4 心部断口形貌

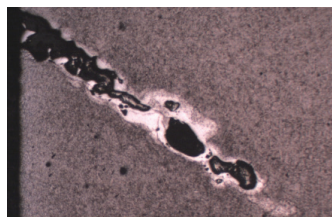


图5 折叠裂纹全貌 (40×)

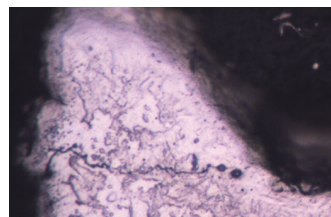


图6 折叠裂纹开口 (400×)

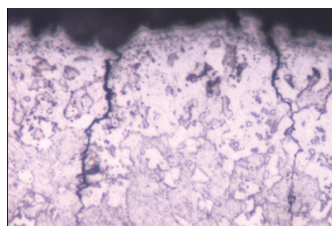


图7 左侧表层组织 (400×)

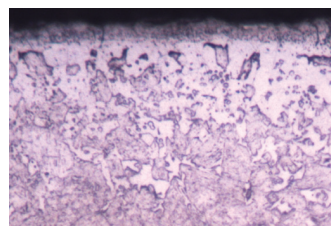


图8 右侧表层组织 (400×)

表1 断裂件化学成分 (质量分数) (%)

40Cr	C	Si	Mn	Cr	S	P
标准值	0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	≤0.035	≤0.035
实测值	0.37	0.18	0.66	0.97	0.008	0.019

表2 抽样力学性能检测

项目		抗拉强度 $\geq 1039.66\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	表面硬度32~39HRC	结论
实测值	1 [#]	1141	37.4	合格
	2 [#]	1164	37.1	合格
	3 [#]	1149	37.2	合格

状态,这种穿晶形态属于疲劳扩展的特征形貌。表层及次表层组织为调质状态的马氏体位向索氏体,马氏体位向的组织较为粗大(见图9)。裂纹扩展后期,断口呈凹凸不平的沿晶断裂特征。沿粗大断口的凸出晶粒表面,断续分布大小不等的圆弧凹坑,这是典型的沿晶韧窝断口形貌,属于过热特征组织^[7]。断口附近有非金属夹杂物熔融的孔洞,表明原始轧制或锻造温度过高,硫化物夹杂已经熔化为孔洞,显著降低了材料强度,增加材料脆性^[8](见图10)。

在样块的右侧裂纹扩展终断区,晶粒呈脱落状态,晶粒间硫化物夹杂熔融的晶间熔洞组织更为明显。由于晶间熔洞的形成,晶间结合力显著降低,材料组织脆性增大,终断区断口受挤压产生沿晶脆断(见图11)。裂纹终断区的表层处纤维状组织较为严重,脱碳层区域铁素体已经被拉成长条状。外表层的纤维组织是断口延伸的塑性变形层,图12所示上部更加严重的纤维组织是断口挤压的变形层。近表层附近的脱碳层的存在,使强度急剧降低,韧性显著增加,断口撞击挤压处显示出塑性变形的特征。

6. 结论分析

稳定杆螺栓断裂,是由于外表层受到螺母拧紧的纵向拉伸应力,以及稳定杆向右侧牵引的侧向应力,于是在工件的右侧增加了双向的拉应力。表面疲劳裂纹形成于拉应力处,产生在强度最低的缺陷部位,工件的表面脱碳层显著降低材料的表面强度。

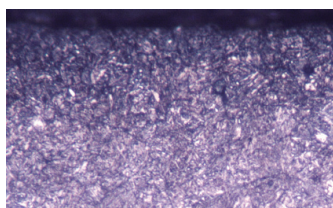


图9 裂纹穿晶组织 (400×)

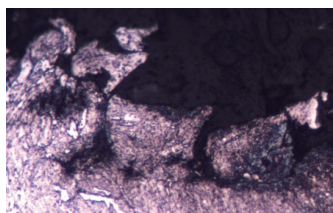


图11 脆性断口组织 (400×)

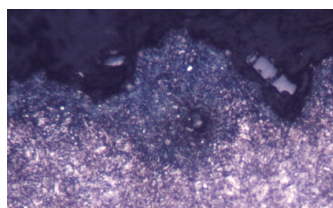


图10 裂纹沿晶组织 (400×)

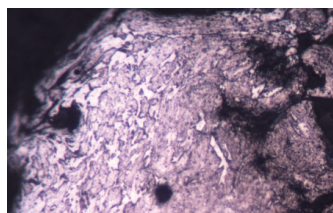


图12 挤压变形组织 (400×)

在服役承载的交变应力作用下,由较深的腐蚀坑底部引发了应力集中而产生疲劳裂纹源。疲劳裂纹沿同心圆的弧形推进线向前延伸,向稳定杆螺栓杆部中心部位扩展。当应力增大到峰值时,便在断口中心部位形成多源台阶的应力集中开裂,并呈放射状条纹迅速扩展至断裂^[9]。轧制或锻造的过热组织晶粒粗大,晶间结合力显著降低。非金属夹杂物熔融的晶间熔洞组织,进一步降低材料强度,增加材料脆性,最终导致工件在极短的时间内,由疲劳扩展至沿晶脆性断裂。

皮下气泡形成的折叠裂纹也会产生疲劳扩展的裂纹源,较深的裂纹造成很高的应力集中,甚至可以使裂纹迅速扩展至断裂。只是由于皮下气泡折叠裂纹未处于拉应力最强的部位,裂纹没有继续扩展的推动力。如果该裂纹位于拉应力中心,失效断裂的时间将会更短。

参考文献

- [1] 孙智,江利,应鹏展.失效分析基础与应用[M].北京:机械工业出版社,2005:

145-155.

- [2] 李春胜,黄德彬.金属材料手册[M].北京:化学工业出版社,2005:262-268.
- [3] 薄鑫涛,郭海祥,袁凤松.实用热处理手册[M].上海:上海科学技术出版社,2009:487-492.
- [4] 吕炎,张国庆,单德彬.锻件缺陷分析与对策[M].北京:机械工业出版社,1990:10-17.
- [5] 张栋,钟培道,陶春虎.失效分析[M].北京:国防工业出版社,2003:130-134.
- [6] 陈南平,顾守业,沈万慈.脆断失效分析[M].北京:机械工业出版社,1993:90-94.
- [7] 马鹏飞,李美兰,戈晓岚.热处理技术[M].北京:机械工业出版社,2013:52-54.
- [8] 张菊水.钢的过热过烧[M].上海:上海科学技术出版社,1984:138-145.
- [9] 张少名.实用应力集中手册[M].西安:陕西科学技术出版社,1987:282-288.

MW 20160512