

# 含表面缺陷扭力轴的断裂失效分析\*

李 礼, 朱有利, 黄元林

(装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

**摘 要:** 通过扫描电子显微镜和 X 射线能谱仪对某型履带车辆含表面缺陷扭力轴的正断型断口进行了失效分析, 结果表明, 扭力轴的断裂属于早期低周疲劳断裂, 裂纹起源于扭力轴表面的微损伤, 冶金过程中产生的微观孔洞和夹杂聚集于扭力轴表面及次表面影响了裂纹的扩展方向并形成了特殊的微观特征。在此基础上, 分析了表面缺陷使疲劳寿命降低的原因, 对扭力轴的生产、使用和维修提出了建议。

**关键词:** 扭力轴; 疲劳; 断裂; 失效; 寿命

中图分类号: TJ810.332

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005) 01-0047-03

## Fracture Failure Analysis of Torsion Bar with Surface Defects

LI Li, ZHU You-li, HUANG Yuan-lin

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Scanning electronic microscope (SEM) and X-ray energy dispersive analysis (EDX) were used to investigate fatigue failure of the torsion bar with surface defects of a tracked vehicle, results show that the crack initiation at surface and propagation of the crack were influenced by accumulated residue stress at the surface and sub-surface. The reasons of life decline of torsion bar with defect were analyzed and some advices were given to the process of manufacture and maintenance.

**Key words:** torsion bar; fatigue; fracture; failure; service life

## 0 引 言

一般来说, 韧性材料的损伤和断裂破坏是由于材料内部微缺陷不断生长、合并、形成宏观裂纹并进一步扩展所引起的。零部件或结构在制造过程中, 由于加工工艺和质量检验方面的失误, 可能存在微裂纹、孔洞和冶金夹杂物等缺陷; 在服役过程中会因为疲劳、腐蚀和磨损等因素形成微裂纹、微孔洞、腐蚀坑、磨痕以及由于偶然因素而造成的各种表面划伤、局部塑性变形等缺陷。这些缺陷由于尺度较小, 一般不会引起结构或零部件有效承载面积的大幅减小, 因此对结构的静强度不会造成太大的影响, 但是对于承受交变载荷作用的结构, 因这些缺陷而造成的局部应力集中往往会导致裂纹的萌生和扩展, 并最终造成疲劳断裂失效。

扭力轴是一根特殊钢制的实心圆杆, 工作时承受纯扭矩作用, 实际上是一根用来减轻车辆运动时地面对车体冲击的扭杆弹簧。在车辆行驶过程中,

扭力轴受到大应力和交变载荷的作用, 疲劳断裂是其主要的失效形式, 一般有剪断型、正断型、复合型<sup>[1]</sup>等 3 种。某型履带车辆在使用过程中, 扭力轴的断裂现象常有发生, 尤以第六位置扭力轴的断裂情况最为严重。扭力轴的设计寿命大于 10 000 km, 但最短的只有 2 060 km<sup>[2]</sup>, 扭力轴达到受力极限状态时最大剪应力为 1 323 MPa, 低于其弹性极限 1 470 MPa, 因此, 扭力轴的断裂并非因过载而引起。

## 1 断口宏观分析

图 1 中, (a) 图为某履带车辆左六扭力轴断口的宏观形貌, 裂纹在正应力作用下沿着与轴线成 45° 角的方向扩展, 为典型的正断型断口。在分析前暴露了较长一段时间, 表面已经因氧化发生了锈蚀。氧化层清楚地显示了疲劳特征。A 区为半圆形的疲劳源区; B 区为以 A 为中心呈放射状向外扩展的裂纹扩展区, 图中可见清晰的放射状条纹; C 区是瞬断区, 粗糙度较大; D 为扭力轴最后破断时产生的剪切唇。(b) 图为(a)图所对应的断口向下翻转 90 度后表面缺陷的宏观形貌, 在 A 区轴的外表面, 可见数

收稿日期: 2004-10-25; 修回日期: 2004-12-29

基金项目: \*总装备部“十五”预先研究项目(41327040101)

作者简介: 李礼(1981-), 男(汉), 湖南永州人, 硕士生。

个直径 1~3 mm、深度约为 0.5 mm 的小坑，坑内有亮黄色的夹杂物，成瘤状。

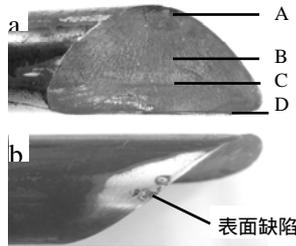


图 1 扭力轴断口(a)及表面缺陷(b)宏观形貌

Fig.1 Macrofractograph(a) and areal defects(b) of the torsion bar

## 2 断口显微分析

显微分析前对断口表面进行清理，用醋酸纤维素覆膜技术反复几次粘去表面的氧化产物。断口清理后，用 Quant 200 型扫描电子显微镜对断口微观形貌进行分析，用 GENESIS 型 X 射线能谱仪对裂纹源区的夹杂物和表面缺陷进行成分分析。

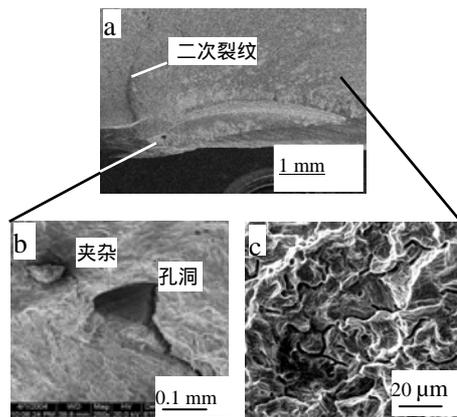


图 2 疲劳源区 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphology of the fatigue initiation region

图 2 为裂纹源区的 SEM 形貌，可以看出，裂纹源区存在明显的贝壳状花纹（弧形轮廓）、山包状突起和垂直于主裂纹扩展方向的二次裂纹（图 2(a)）。贝壳状花纹可能起因于服役时疲劳断口表面

的摩擦或当裂纹前进时断口表面不同程度的腐蚀

[3]，当裂纹扩展到夹杂及孔洞（图 2(b)）处时，由于夹杂和空洞的存在使应力重新分布，产生了二次裂纹。山包状突起的下方也存在数个夹杂物，裂纹折向这些夹杂物形成了山包状突起。夹杂和孔洞距表面约 100 μm，孔洞至扭力轴外表面的区域呈现纤维状开裂的特征（图 2(b)），说明裂纹源区表面的材料分布极其不均匀。孔洞的直径约为 60~70 μm，内壁有解理条纹，孔洞一侧有延伸至轴表面的裂纹。裂纹源区其余部分断裂形式为晶间脆性断裂（图 2(c)）。

能谱分析结果表明，裂纹源区夹杂物成分主要是 O、C 和 Fe 元素（见表 1），因此可以判定夹杂物是冶炼过程中由于炼钢还原期脱氧反应不充分、扒渣不净而残留于钢内形成的。

表面缺陷凹凸不平，带有气孔（见图 1(b) 中环状孔洞及突起物），厚度约为 0.5 mm，主要成分是铜和铁的氧化物（见表 2）。在生产、使用和维修过程中，扭力轴表面产生了微缺陷，缺陷处的材料不连续，并使表面缺陷处产生较大的应力集中，因而疲劳裂纹更易萌生。由于铜和铁存在电极电位差，还容易发生电位腐蚀，形成腐蚀和疲劳耦合的工况<sup>[4,5]</sup>，致使扭力轴的使用寿命降低。

图 3 为裂纹扩展区典型的微观形貌，裂纹扩展区存在大量的撕裂棱（图 3(a)），撕裂棱顺着主裂纹扩展方向排列，在宏观上显示为放射状条纹（见图 1(a)）。撕裂棱之间较平坦区域为典型的韧窝破裂、“轮胎轨迹”（图 3(b)）和个别的“泥坑”花样（图 3(c)），“轮胎轨迹”这一特征是因嵌在另一表面上的颗粒对此表面反复碰撞而形成的<sup>[3]</sup>，“泥坑”花样则是由于第二相硬质点导致的显微开裂所造成的。

图 4 是瞬断区的 SEM 形貌，瞬断区主要的微观形貌特征是细长的撕裂棱（图 4(a)、(b)）和细小的韧窝（图 4(c)），具有准解理的特征。相对而言，扩展区的撕裂棱较宽，棱角较为分明，显示了裂纹扩展和闭合作用对断口表面的影响；而瞬断区的撕裂棱较为细长和低矮，显示了快速开裂的特征。

表 1 裂纹源区夹杂物成分分析结果（质量分数/%）

Table 1 EDX analysis results of inclusion at the fatigue initiation region (w/%)

元素	C	O	Na	Mg	Al	Si	Mo	Cl	K	Ca	Fe
质量分数	08.39	28.71	01.21	00.67	00.69	01.30	01.85	00.86	00.94	00.81	54.57

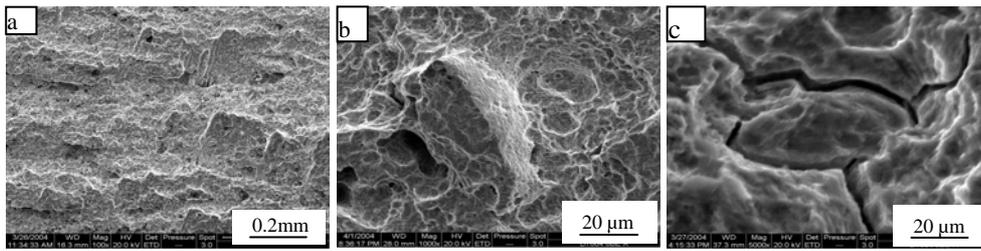


图 3 裂纹扩展区 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology at the crack propagation region

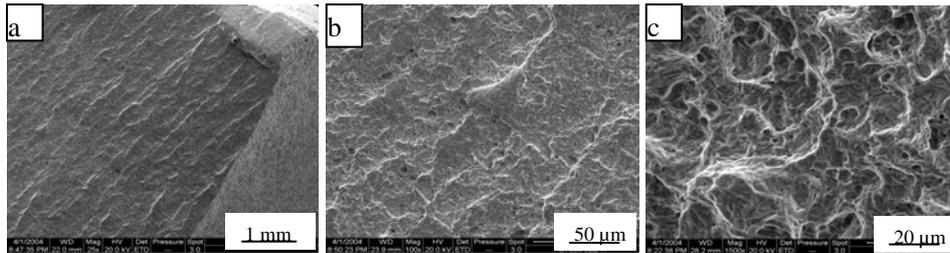


图 4 瞬断区 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology at the fatigue rupture region

表 2 表面缺陷能谱分析结果(质量分数/%)

Table 2 EDS analysis on areal defects(w/%)

元素	C	O	Fe	Cu
质量分数	12.33	08.74	08.95	69.97

### 3 结 语

(1) 扭力轴的断裂形式为低周扭转疲劳断裂, 集中分布于表面和次表面的微观孔洞和夹杂导致疲劳裂纹萌生和扩展, 造成了扭力轴的早期疲劳断裂。

(2) 表面缺陷处由于存在较大的应力集中, 发生局部塑性变形而成为疲劳危险部位, 降低了扭力轴的使用寿命。

(3) 建议冶炼厂在炼钢过程中还原期反应时间要充分, 掌握好扒渣工艺, 尽可能减少钢中的冶金夹杂。生产检验部门严格质量把关, 防止粗检、漏检。

(4) 在使用和维修过程中, 应当防止由于人为因素损伤扭力轴表面, 扭力轴一旦受到损伤, 应该立即更换以提高扭力轴的使用可靠性。

### 参考文献:

[1] 彭日辉, 韩文政, 等. 坦克扭力轴断裂失效分析

[J]. 装甲兵工程学院学报, 1988(2):54-62.

[2] 冯益柏. 履带装甲车辆高强度扭杆弹簧的耐久性研究 [D]. 硕士学位论文, 北京: 北京理工大学, 2003: 13-15.

[3] 谢裴娟, 孙家骥. 工程材料的失效分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003, 12:138-158.

[4] Hoepfner D W, Chandrasekaran V, Taylor A. Review of pitting corrosion fatigue models. structural integrity for the next millennium [C]. Proceedings of the 20th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF, Electronic Print Imaging Corp., Dayton, OH, 1999:253-277.

[5] Craig L Brooks, Scott Prost Domasky, Kyle Honeycutt. Corrosion is a structural and economic problem: Transforming metrics to a life prediction method [C]. NATO RTO's Workshop Two on Fatigue in the Presence of Corrosion, Oct 1998 (Corfu, Greece), North Atlantic Treaty Organization Research and Technology Organization: 14-1 - 14-12.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072

装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室

Tel: (010) 66717168

E-mail: r\_rank@163.com