

# 花键轴断裂失效分析

## Fracture Analysis of Spline Shaft

胡春燕<sup>1</sup>, 刘德林<sup>1</sup>, 万 方<sup>2</sup>, 陶春虎<sup>1</sup>  
( 1 北京航空材料研究院, 北京 100095;  
2 景德镇陶瓷学院, 江西 景德镇 333403)

HU Chunyan<sup>1</sup>, LIU De lin<sup>1</sup>, WAN Fang<sup>2</sup>, TAO Chunhu<sup>1</sup>  
(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;  
2 Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China)

摘要: 对断裂的花键轴进行了断口宏观观察、化学成分分析、金相组织检查、硬度检测及静态拉伸测试。结果表明: 花键轴的断裂性质为疲劳断裂; 花键轴的显微组织中存在魏氏组织, 导致其硬度和强度低于技术要求, 是造成花键轴断裂的根本原因。

关键词: 花键轴; 疲劳断裂; 魏氏组织

中图分类号: TG142.33 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)05-0057-03

**Abstract:** The fracture reason of the spline shaft was analyzed by fracture observation, chemical composition analysis, metallurgical structure observation, hardness test and tensile test. The result shows that the fracture mode is fatigue fracture. The fracture is mainly caused by the lower hardness and strength which resulted from the Widmanstatten structure existing in the structure of the spline shaft.

**Key words:** spline shaft; fatigue fracture; Widmanstatten structure

42CrMo 钢是一种典型的中碳合金钢, 具有强度高、淬透性好、韧性好、淬火时变形小等特点, 被广泛用于制造强度、塑性和韧性综合指标要求高的轴、齿轮、连杆以及发动机气缸等重要零件<sup>[1]</sup>。这些构件的主要破坏形式通常是疲劳破坏<sup>[2]</sup>。某装甲车的花键轴材质为 42CrMo 钢, 在工作过程中发生断裂。花键轴的制造工序如下: 锻造→正火→粗加工→淬火+ 高温回火→精加工。

本工作对断裂的花键轴进行了断口宏观观察、化学成分分析、金相组织检查、硬度检测以及静态拉伸测试, 确定了花键轴的断裂性质, 并对其断裂原因进行了综合分析。

### 1 实验过程与结果

#### 1.1 断口宏观观察

花键轴断裂位于螺杆一侧的花键末端过渡区, 见图 1。图 2 是花键轴断口的宏观形貌, 断口具有明显的疲劳区和瞬断区, 齿间可见清晰的疲劳弧线, 呈典型的疲劳断裂特征, 断口的宏观特征表明, 疲劳区面积较大。在 6 个断裂的花键齿中, 其中 1<sup>#</sup> 花键齿位置较低, 齿部可见明显的疲劳弧线, 疲劳源区位于齿根部;

其他 5 个齿基本处于同一高度, 表面已磨得光亮。每相邻两齿间均存在疲劳区, 疲劳裂纹均起源于齿的同一侧。花键轴心部较粗糙, 为瞬断区。



图 1 断裂花键轴外观形貌  
Fig. 1 Macrograph and fracture position of spline shaft

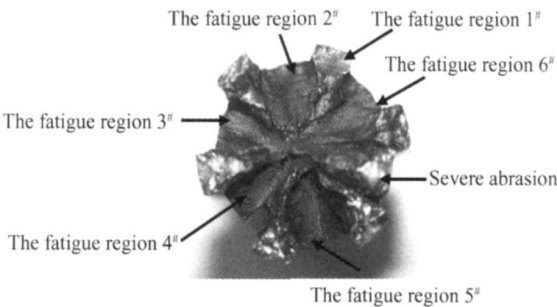


图 2 花键轴断口宏观形貌  
Fig. 2 Macrograph of spline shaft fracture

1.2 断口微观观察

采用 JSM-5600LV 型扫描电镜对断口进行微观观察。1<sup>#</sup> 疲劳区低倍形貌见图 3, 可见收敛于花键齿根部的放射棱线, 疲劳裂纹起源于花键齿根部, 呈点源, 源区擦伤较严重。疲劳扩展区可见清晰的疲劳弧线, 见图 4。扩展区的疲劳条带和二次裂纹形貌见图 5。2<sup>#</sup> - 6<sup>#</sup> 疲劳区形貌与 1<sup>#</sup> 疲劳区基本相同, 疲劳裂纹均起源于花键齿根部, 呈点源。花键齿根部未见较深的加工痕迹, 见图 6。花键轴心部为瞬断区, 擦伤严重, 局部可见韧窝断裂特征。

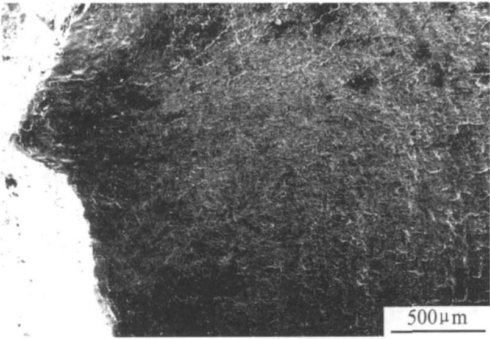


图 3 1<sup>#</sup> 疲劳区低倍形貌  
Fig. 3 Low magnification of No. 1 fatigue region

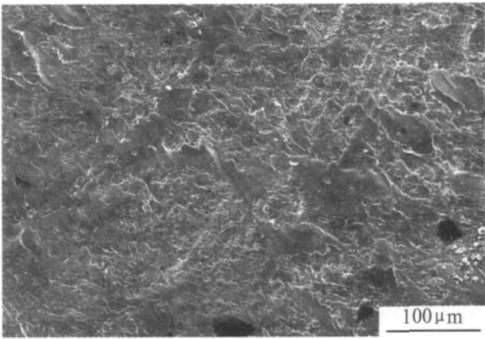


图 4 疲劳弧线形貌  
Fig. 4 Morphology of beach marks

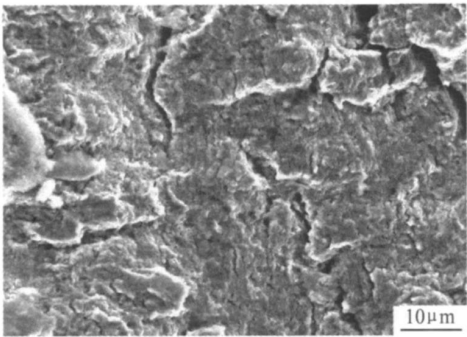


图 5 疲劳条带和二次裂纹形貌  
Fig. 5 Morphology of striation and secondary crack

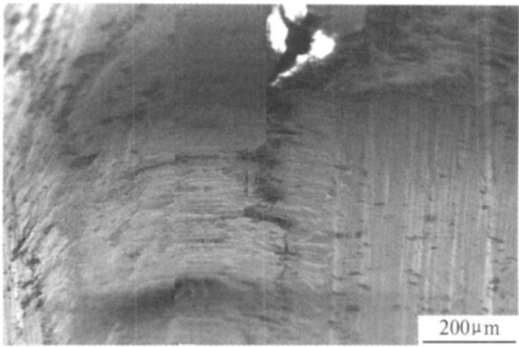


图 6 疲劳源区的加工痕迹  
Fig. 6 Process trace of fatigue source region

1.3 金相组织观察

在花键轴断口附近沿垂直轴向截取金相试样, 经磨抛腐蚀后采用 OLYMPUS PME3 型光学显微镜进行金相组织观察。

花键轴表面及心部的金相组织分别见图 7 和图 8, 除了具有细小的针状索氏体外, 还有块状、针状分布的先共析铁素体, 针状铁素体呈魏氏组织分布, 而且从表面至心部, 魏氏组织的数量增加。

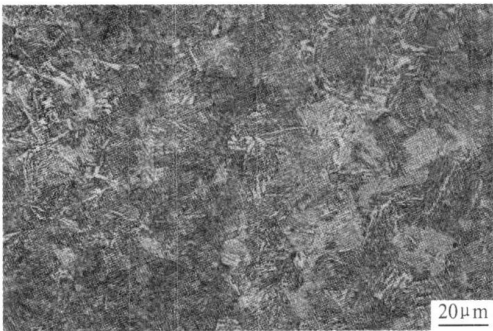


图 7 花键轴表面的金相组织  
Fig. 7 Surface microstructure of spline shaft



图 8 花键轴心部的金相组织  
Fig. 8 Heart microstructure of spline shaft

1.4 硬度检测

在花键轴断口附近沿垂直轴向截取硬度试样, 采

用 WOLPERT 930 型洛氏硬度计对其进行洛氏硬度测试, 结果见表 1。由表 1 可知, 断裂花键轴的硬度低于技术要求 HRC30~ 37 的下限。

表 1 花键轴的硬度测试结果(HRC)

Table 1 Hardness of spline shaft(HRC)

Position	1	2	3	Average
Surface	27. 8	27. 8	27. 1	27. 6
Core	27. 4	27. 1	27. 3	27. 3

1. 5 拉伸性能测试

沿断裂花键轴轴向截取标准拉伸试样进行静态拉伸测试, 结果见表 2。由表 2 可知, 花键轴的延伸率  $\delta_5$  和断面收缩率  $\Psi$  符合技术要求, 但抗拉强度  $\sigma_b$  和屈

服强度  $\sigma_{0.2}$  分别比技术要求低了约 11% 和 14%。

表 2 拉伸测试结果

Table 2 Tensile properties of spline shaft

Number of sample	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\Psi$ /%
1	967	805	18. 3	61. 8
2	942	772	17. 1	61. 0
3	980	816	16. 6	60. 4
Technical requirement	$\geq 1080$	$\geq 930$	$\geq 12$	$\geq 45$

1. 6 化学成分检测

从断裂花键轴上制取化学试末, 用化学分析的方法进行成分分析, 结果见表 3。由表 3 可知, 1<sup>#</sup> - 3<sup>#</sup> 花键轴的化学成分均符合技术要求。

表 3 花键轴的化学成分检测结果(质量分数/%)

Table 3 Chemical composition of spline shaft(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	Mo	Cr
Spline shaft	0. 42	0. 20	0. 64	0. 21	1. 04
Technical requirement	0. 38-0. 45	0. 17-0. 37	0. 50-0. 8	0. 15-0. 25	0. 9-1. 2

2 分析讨论

2. 1 花键轴的断裂原因分析

花键轴断口呈典型的疲劳断裂特征, 每相邻两齿间均存在疲劳区, 宏观可见明显的疲劳弧线, 微观可见疲劳条带特征; 疲劳裂纹均起源于花键齿根部, 且位于键槽的同一侧。由以上特征判断, 该花键轴的断裂性质为疲劳断裂。

断口源区未见较深的加工痕迹, 初步排除机加方面的因素。花键轴的硬度低于技术要求的下限, 抗拉强度和屈服强度也低于技术要求。疲劳极限与抗拉强度存在着经验关系<sup>[3]</sup>, 由此表明花键轴的疲劳强度也应低于设计值。因此, 花键轴的断裂与其疲劳强度偏低有关。

42CrMo 钢经淬火+ 高温回火调质热处理后, 其显微组织为较细小、均匀的回火索氏体, 材料具有较好的综合力学性能<sup>[4]</sup>。而金相观察结果表明, 花键轴的显微组织中存在较多的铁素体, 并基本呈魏氏组织分布。魏氏组织的存在对材料的力学性能不利, 并会严重降低晶界结合力<sup>[5]</sup>, 使材料的断裂韧度大幅度降低。因此带有魏氏组织的零件将不再遵循一般的疲劳裂纹扩展速率, 而会迅速地失稳扩展导致破坏。

2. 2 魏氏组织形成的原因分析

钢中魏氏组织的形成, 主要取决于其含碳量、转变温度(冷却速率)和奥氏体晶粒大小<sup>[6]</sup>。在连续冷却

时, 魏氏组织只能在一定的冷却速率下形成, 过慢或过快的冷却都会阻止它的形成, 因为过慢的冷却有利于铁原子的扩散而形成网状铁素体, 过快的冷却致使碳原子来不及充分扩散而阻止魏氏体的形成。另外在正常的奥氏体晶粒度的情况下, 只有在狭窄的含碳量范围内(0. 15% ~ 0. 35%, 质量分数)和较快的冷却速率下(约 140℃/s)才会形成魏氏组织; 而在奥氏体晶粒度粗大时, 即使在较宽的含碳量范围内和较低的冷却速率下, 都可形成魏氏组织<sup>[7]</sup>。

当加热温度高于  $A_{c3}$  温度较多或保温时间较长时, 奥氏体晶粒将粗化。当奥氏体晶粒比较粗大, 而冷却速率不适当时, 就会在晶粒内部产生魏氏组织。花键轴的制造加工工艺: 锻造→正火→粗加工→淬火+ 高温回火→精加工。由于锻造、正火与淬火都需要将 42CrMo 钢加热到  $A_{c3}$  以上, 因此这三个环节都会对材料的组织有影响, 其中锻造加工时的温度最高, 最有可能出现过热组织。对 42CrMo 钢, 始锻温度为 1180℃, 终锻温度为 800℃。如果锻造时始锻温度过高或终锻温度过高, 必然造成奥氏体晶粒粗大, 为魏氏组织的产生创造了条件, 若锻后冷却速率又较快, 便产生了严重的魏氏组织。又由于 42CrMo 材料中添加了适量的 Mo, 其组织遗传性现象较为严重, 就形成了稳定过热组织<sup>[8]</sup>。这时采用正火热处理无法消除严重的魏氏组织, 在随后的淬火和高温回火热处理过程中, 粗

(下转第 64 页)

- 化性能研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 25- 29.
- [6] 张晓燕. 耐高温有机硅树脂及其固化体系的研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2000.
- [7] 付善菊, 韩哲文, 吴平平. 聚硅氧烷热稳定性研究进展[J]. 高分子通报, 2001, (1): 40- 47.
- [8] 罗运军, 桂红星. 有机硅树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 239.
- [9] PETAR R D, LENZ R W. Exactly alternating silarylene siloxane polymers. 2. the condensation polymerization of arylenedisilanol and bisureidosilanes[J]. J Polym Sci: Polym Chem Ed, 1982, 20: 951- 966.
- [10] ZHANG L X, XU Z, WEI Q, et al. Effect of 200 keV proton irradiation on the property of methyl silicone rubber[J]. Radiat Phys Chem, 2006, 75: 350- 355.
- [11] 黄玮, 傅依备, 邢丕峰, 等.  $\gamma$  辐射场中硅橡胶泡沫的辐射效应研究[J]. 原子能科学与技术, 2002, 36(6): 503- 507.
- [12] ZHANG L X, HE S Y, XU Z, et al. Damage effects and mechanisms of proton irradiation on methyl silicone rubber[J]. Mater Chem Phys, 2004, 83: 255- 259.
- [13] DI M W, HE S Y, LI R Q, et al. Resistance to proton radiation of nan  $\sigma$  TiO<sub>2</sub> modified silicone rubber[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 2006, 252: 212- 218.
- [14] CHIEN A, MAXWELL R, CHAMBERS D, et al. Characterization of radiation induced aging in silica reinforced polysiloxane composites[J]. Radiat Phys Chem, 2000, 59: 493- 500.
- [15] 黄玮, 傅依备, 许云书, 等. 两种硅泡沫材料耐电子束辐射性能的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(3): 102- 105.
- [16] 黄玮, 傅依备, 王朝阳, 等. 甲基乙烯基硅橡胶泡沫的辐射效应[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2001, 19(2): 99- 104.
- [17] JOVANOVIĆ J D, GOVEDARICA M N, PETAR R D, et al. The thermogravimetric analysis of some polysiloxanes [J]. Polym Degrad Stab, 1998, 61: 87- 93.
- [18] 王清正, 师彤, 谢择民, 等. 硅氮化合物交联剂交联的室温硫化硅橡胶的热稳定性[J]. 高分子学报, 1994, (5): 573- 577.
- [19] PATEL M, MURPHY J J, SKINNER A R. Volatile evolution from room temperature cured polysiloxane rubber induced by irradiation with He<sup>2+</sup> ions[J]. Polym Test, 2003, 22: 923- 928.
- [20] 王庚超, 刘飏, 史宇正, 等. <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线辐照对 PTMPS DPS 共聚物形态结构及性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2000, 18(4): 241- 245.
- [21] MATHIVANAN L, SELVARAJ M, AZIM S S, et al. Evaluation of heat resistant properties of silicone based coatings by SEM and a.c impedance techniques[J]. Prog Org Coat, 1996, 28: 113- 116.
- [22] 贾梦秋, 白红英, 王金玲. 环氧有机硅防腐涂料耐热性的研究[J]. 材料保护, 2003, 36(4): 54- 56, 59.
- [23] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 156- 160.

收稿日期: 2008-09-03; 修订日期: 2008-12-17

作者简介: 吴超波(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事硅树脂的合成与性能研究, 联系地址: 北京市朝阳区北三环东路15号北京化工大学308信箱(100029), E-mail: jing\_chaobo@163.com

通讯作者: 贾梦秋, 教授, 联系地址: 北京市朝阳区北三环东路15号北京化工大学40信箱(100029), E-mail: jiamq@mail.buct.edu.cn

(上接第59页)

大的奥氏体晶粒仍将遗传下来, 致使组织中的魏氏组织被保留下来。

综上所述, 花键轴组织中存在魏氏组织, 导致其硬度和强度低于技术要求, 是造成花键轴断裂的根本原因。

### 3 结论

(1) 花键轴断裂性质为疲劳断裂, 断口宏观可见明显的疲劳弧线, 微观可见疲劳条带特征。

(2) 花键轴的显微组织中存在较多的铁素体, 并基本呈魏氏组织分布, 魏氏组织的存在对材料的力学性能不利, 并会严重降低晶界结合力, 使材料的断裂韧性大幅度降低, 导致其硬度和强度低于技术要求, 是造成花键轴断裂的根本原因。

(3) 钢中魏氏组织的形成, 主要取决于其含碳量、转变温度(冷却速率)和奥氏体晶粒大小。

#### 参考文献

- [1] 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.

- [2] 尹志新, 于维成, 姚戈, 等. 循环淬火细化对 42CrMo 钢组织及疲劳性能的影响[J]. 钢铁, 2002, 37(10): 52- 54.
- [3] 胡世炎. 机械失效分析手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998. 227- 229.
- [4] 朱大滨, 王志文, 潘辑编, 等. 压缩机活塞杆断裂失效分析[J]. 理化检验-物理分册, 2006, 42(3): 140- 143.
- [5] 唐川江, 刘向东, 胥勋文, 等. 魏氏组织对齿轮强度的危害及其控制方法[J]. 汽车技术, 2000, 31(6): 26- 28.
- [6] 魏玉芝, 魏鹏, 张玉强. 低碳热轧钢管中魏氏组织的形成及影响[J]. 钢管, 2001, 30(6): 31- 33.
- [7] 胡进. 42CrMo 钎焊钢内在性能综合分析[J]. 特钢技术, 2002, (1): 16- 22.
- [8] 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.

收稿日期: 2008-05-08; 修订日期: 2009-03-18

作者简介: 胡春燕(1983—), 女, 硕士, 主要从事失效分析及计算机辅助失效分析研究工作, 联系地址: 北京 81 信箱 4 分箱(100095), E-mail: huchunyanlyx@163.com