# 锻造齿轮轴断裂的失效分析

朱杰

**摘要**：通过对锻造齿轮轴失效分析，找出产品中的缺陷，为以后生产质量控制，提高产品质量积累重要的经验，具有重要的生产指导意义。

**关键词**：锻造齿轮轴；失效分析；质量控制

我公司为客户生产制造的240t起重机减速机，在使用6年后，齿轮齿部及轴的变截面轴径台阶处发生断裂，齿轮材料为42CrMo，热处理方式为调质处理（淬火+回火），主要生产工序：锻造毛坯→粗车→粗开齿→调质热处理→精车→滚齿等。为评定生产责任及提高产品过程质量监督，特对该齿轮轴进行了失效分析，确定开裂性质及产生原因。

## 1. 失效分析

（1）宏观分析　由齿轮轴断裂位于齿部及轴径的变截面台阶处，断面呈锥形，深入齿端内部，轮齿部位也有大块开裂。断口分析表明：断裂起源于工件内部，属由内而外脆性断裂，如图1所示。

（2）化学成分分析　材料化学成分检测分析，看到Mo含量为0.14%略小于要求值的0.15%，考虑到一定的偏差范围，也在合格范围之内。结果表明，42CrMo材料成分符合要求，具体数据如表1所示。

（3）低倍试验分析　做齿轮径向全截面低倍热酸浸试验，结果如表2所示。

从试面上可见，整个试面除边缘20mm一圈外，有严重的粗大枝晶偏析；从边缘到内部可见大量细针眼状缺陷，应为非金属夹杂物在横向面上的体现；截面上$R/2$半径范围内有十余条锯齿状连续小裂纹，最长约8mm。试验结果表明，锻件偏析严重，均匀性、纯净性差，内部有多条裂纹，锻件质量不合格，如图2所示。

（4）显微组织分析　做齿轮轴轴身从外到内微观试验，结果如表3所示。

可以看到，钢中有大量的粗大未变形硫化物夹杂和聚集分布的氧化物夹杂。结合低倍情况，钢中夹杂物级别虽在合格范围内，但纯净度较差。表面组织正常调质热处理过程正常；但基体组织偏析严重，

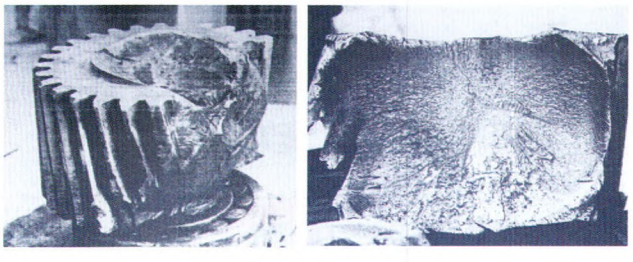

图 1

表1　检测结果　（%）

| C | Mn | S | P | Si | Cr | Mo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.43 | 0.58 | 0.013 | 0.021 | 0.30 | 1.00 | 0.14 |

依据标准：GB/T 20123—2006、GB/T 20125—2006

表 2

| 项 目 | 一般疏松/级 | 中心疏松/级 | 区域偏析/级 | 点状偏析/级 | 缺陷 |
|---|---|---|---|---|---|
| 结 果 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 有 |

晶粒度不够均匀。

取低倍试片上小裂纹进行微观裂纹分析，可以看到裂纹曲折、断续，沿晶分布，旁边有少量夹杂相伴，裂纹旁组织无变化，具有白点裂纹微观形貌，如图3所示。

（5）力学性能试验和硬度测试　对齿轮轴轮齿近表面显微硬度测试，硬度值（HBW）为：302.73、305.59、303.13，硬度值高于图样中302~341HBW中最低值要求。

做工件力学性能试验，可以看到其中：$R_{eL}$值为585MPa，小于要求值700MPa；*KU*值为32J，小于规范中的要求值50J；工件力学性能不符合要求。

**2. 分析讨论**

齿轮轴材料为42CrMo中碳合金钢，材料成分符合要求。钢中有大量的粗大未变形硫化物夹杂和聚集分布的氧化物夹杂；从边缘到内部可见大量细针眼状缺陷，应为非金属夹杂物在横向面上的体现；结合高低倍观察，可以说明钢中纯净度较差，同时表明锻件变形不足，夹杂物未变形。

齿轮轴低倍截面整个试面除边缘20mm一圈外，有严重的粗大枝晶偏析，对后续热处理效果造成了很大影响，造成了组织的偏析、晶粒的不均匀，降低了材料的力学性能；在低倍试片上从边缘到内部可见大量细针眼状缺陷，应为非金属夹杂物在横向面上的体现，也破坏了基体的连续性和致密性，降低了材料的力学性能。

截面上*R*/2半径范围内有十余条锯齿状连续小裂纹，从低倍酸浸形貌到宏观断口形态再到微观组织形态，可以确定小裂纹为白点裂纹。白点裂纹产生的原因，通常是钢中氢含量较高和内应力较大共同作用的结果。白点裂纹破坏了钢材内部连续性，含有白点的钢材，其伸长率、断面收缩率和冲击韧度都急剧下降，所以白点属于钢中不允许的缺陷。

齿轮轴断裂源于内部，由于锻件本身存在严重质量问题，锻件致密性差、均匀性差、纯净度差，存在不同方向分布的白点裂纹缺陷，造成锻件性能指标差，内部不连续。在长期的使用过程中，在内部裂纹处产生应力集中，进而扩展，达到材料性能极限后，快速脆裂，导致断裂。

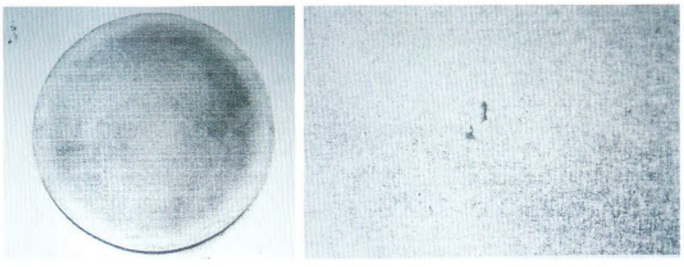

图 2

表 3

| | 非金属夹杂/级 | | | | | 显微组织 | 晶粒度/级 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | Ds | | |
| 表明 | 2.5S | 2.0S | 1.0 | 0.5 | 2.5 | 索氏体+贝氏体 | 7.0，部分5.0 |
| *R*/2 | 2.5S | 1.5S | 0.5 | 0.5 | 2.0 | 贝氏体+铁素体+珠光体 | 6.5，部分5.0 |
| 心部 | 2.5S | 2.0S | 1.0 | 0.5 | 2.0 | 贝氏体+铁素体+珠光体 | 6.5，部分5.0 |

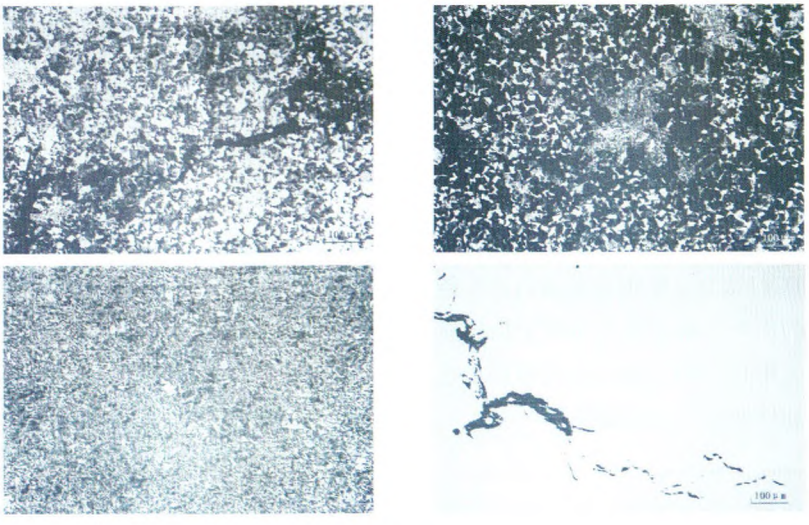

图 3

**3. 结语**

齿轮轴材料成分符合要求。齿轮轴锻件致密性差、纯净度差、均匀性差，内部存在多条白点裂纹、晶粒粗大、组织偏析，显著降低了材料力学性能，锻件严重不合格。

此次齿轮轴断裂说明我公司

# 锻造与热处理工艺对TC11合金显微组织和力学性能的影响

魏丽，李晓婷，封嗣虎，仲惟光，杨恩超

**摘要：** 研究了不同锻造加热温度、热处理温度对TC11合金显微组织和力学性能的影响。结果表明，$T_\beta$-10℃锻造（$T_\beta$-30℃，100min，风冷+530℃，360min，空冷）热处理后可获得等轴α相含量为5%~10%的双态组织，这种组织具有较好的综合力学性能，室温抗拉强度达1105MPa，断后伸长率达15%，冲击韧度达45J。

**关键词：** TC11合金；锻造；热处理；显微组织；性能

TC11钛合金属于马氏体型（α+β）两相热强钛合金，是一种重要的航空和宇航材料，通常采用β/（α+β）转变点以下30~50℃加热变形的常规锻造。航天用某TC11钛合金锻件技术条件中规定，锻件的室温抗拉强度不小于1060MPa。而常规锻造生产的TC11钛合金锻件达到一定尺寸后，整体热处理获得的室温抗拉强度很难满足该指标要求，从而致使无法向客户交付合格的锻件。鉴于此，本文研究近β锻造加热温度、退火一热处理温度对TC11钛合金组织和室温力学性能的影响，研究成果可用于指导航天用TC11钛合金锻件的最佳锻造和热处理工艺的制订。

## 一、试验材料与内容

### 1. 试验材料

试验采用西部钛业提供的φ145mm TC11合金棒材，其化学成分（质量分数，%）如表1所示，用金相法测得的合金相变点温度为1000℃。棒材经常规锻造成尺寸为φ265mm×100mm的试验用中间饼坯。

### 2. 试验内容

（1）锻造　将试验用的2件中间饼坯（尺寸均为φ265mm×100mm）在40MN螺旋压力机上分别按表2中的锻造

表1　棒材化学成分（质量分数）　（%）

| 元素 | Al | Mo | Zr | Si | 杂质 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Fe | C | N | H | O |
| 含量 | 6.58 | 3.42 | 1.62 | 0.23 | 0.03 | 0.018 | 0.00831 | 0.00378 | 0.112 |

表2　锻造工艺参数

| 试样编号 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 锻造加热温度/℃ | $T_\beta$-10 | $T_\beta$-20 |
| 变形程度（%） | 30 | 30 |
| 锻后冷却方式 | 水冷 | 水冷 |
| 锻后饼材尺寸/mm | φ316×70 | φ316×70 |

的锻件把关仍需加强，锻件对产品的质量至关重要。建议从源头冶炼开始控制，如对炉料烘烤、冶炼时充分沸腾、采用真空除气技术；锻造过程严格把关，比如高温下锻造加快扩散过程、增加镦粗工序提高锻造比、锻后及时装炉退火；严格把关锻件超声波检测等。通过严格控制提高产品质量、减少损失。

### 参考文献

[1] 张彦敏. 锻造工工作手册[M]. 北京：化学工业出版社，2009.

作者简介：朱杰，太原重型机械股份有限公司。

MW 20170705