

## □ 专题研讨

## 斗轮机悬臂支撑轴 40Cr 钢断裂失效分析

贵州电力试验研究院 代发明 陈 涛 班新华 [550002]

**摘 要** 利用断口宏观分析,硬度分析,断口金相分析,化学元素分析等方法,分析断裂产生的主要原因。**关键词** 金相分析;硬度;断裂;化学元素分析;夹杂物

## 1 概 述

某厂煤场斗轮机悬臂支撑轴运行 2 年后发生断裂,断裂成 3 节,见图 1,该轴选用 40Cr 钢制造,该轴 2 个部位的断裂准确时间不确定,送样也不及时,造成了来样锈蚀严重,断面不清晰,会给断口分析带来极大的困扰。

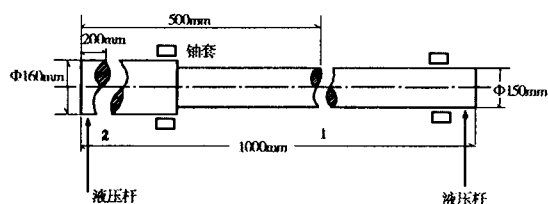


图 1 斗轮机悬臂支撑轴断裂示意图

## 2 原断口宏观形貌分析

从轴宏观断口形貌(图 2、图 3)上可以看到,两节断口截然不同。

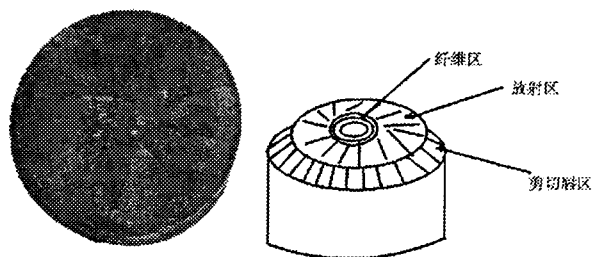


图 2 1 位置断口宏观照片 图 3 1 位置断口断裂特征示意图

图 2 光学照片可见,该断口为韧性(塑性)断裂特征:有 3 个明显的区域:可分为三个宏观特征区,即中间的纤维区,然后是放射区和剪切唇区。

纤维区的宏观平面与拉伸应力轴垂直,呈粗糙的纤维状,断裂从这一区开始。放射区是裂纹由缓慢扩展向快速的不稳定扩展转化的标志,其特征是放射线花样,放射线方向为裂纹扩展方向。剪切唇区是最后断裂区,表面较光滑,与拉伸应力轴的交角约 45°。由于该轴为低合金钢,低温断口的纤维区

较小,放射区的放射线较粗,剪切唇区较小。

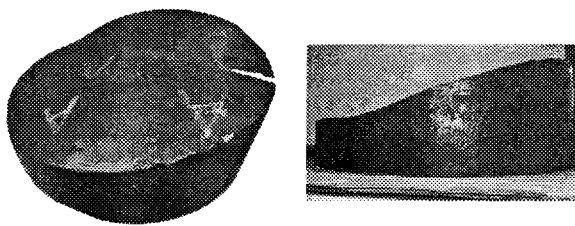


图 4 2 位置断口宏观照片 图 5 2 位置断口侧面宏观照片

由图 4 的 2 号断口的光学照片可见,该断口为脆性断口,疲劳断裂,其特征为:

- (1) 断裂处很少或没有宏观塑性变形。
- (2) 断口平坦,无剪切唇,断口与应力方向垂直。
- (3) 断裂起源于变截面,表面缺陷和内部缺陷等应力集中部位。

(4) 咨询该厂人员得知,该断面断裂时颜色较光亮,光亮断口是细瓷状,对着光线转动,可见到闪光的小刻面。

(5) 脆性断裂的扩展速率极高,断裂过程在瞬间完成,有时伴有大声响。

## 3 理化检验

## 3.1 化学成分分析

断轴表面用德国 SPECTRO 直读光谱仪对其作化学成分定量分析,主要化学成分(质量分数,%)见表 1:

表 1 断轴化学成分定量分析

| 元素     | C     | Si    | Mn    | Cr    | S     | P     |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 含量 (%) | 0.930 | 0.263 | 0.310 | 1.231 | 0.019 | 0.023 |

参照国标 GB/T20066-2006《钢的化学分析用试样取样法及成品化学成分允许偏差》

表 2 40Cr 标准化学成分

| 元素     | C           | Si          | Mn          | Cr          | S       | P       |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| 含量 (%) | 0.37 - 0.44 | 0.17 - 0.44 | 0.50 - 0.80 | 0.80 - 1.10 | ≤ 0.035 | ≤ 0.035 |

该钢 C 含量为 0.930%, 大大的超过了 0.37 - 0.44%, 与 40Cr 材质不符。

### 3.2 硬度测定

硬度测定: 用 EQUOTIP2 型里氏硬度计从外表面往内部(见示意图 6)进行硬度(HB)测定, 结果见下表 3。

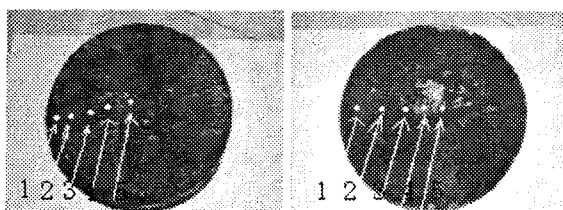


图 6 硬度测点示意图

表 3 硬度测定数据表

| 项目       | 硬度值(HB) |     |     |     |     |
|----------|---------|-----|-----|-----|-----|
| 测点<br>编号 | 1       | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 1 号试样    | 354     | 341 | 324 | 317 | 320 |
| 2 号试样    | 329     | 321 | 315 | 308 | 304 |

按要求, 该轴热处理后调质(正火 + 高温回火)硬度应为 HB241 ~ 286, 从表 3 可以看出, 2 个试样的硬度值均超过标准值, 硬度偏高。

### 3.3 金相分析

在断裂面附近及其他部位制备金相试样, 采用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀, 侵蚀前先观察非金属夹杂物级别, 金相照片见下图 7、图 8。

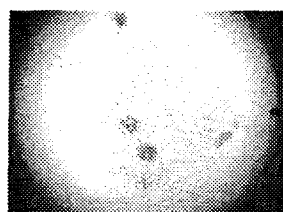


图 7 1 号样未侵蚀前  
图片 500 ×

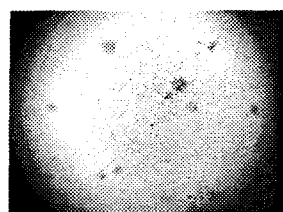
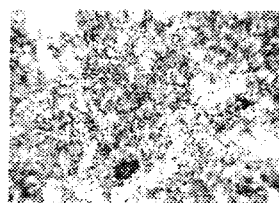


图 8 2 号样未侵蚀前  
图片 500 ×

从图 7、图 8 可以看出, 该轴材料内部局域性的存在夹杂物, 当外来夹杂物中的镁、钙和材料内部的硫、锰、铬等元素向晶界的偏聚, 导致了在局部地区出现了晶界脆化, 其效果相当于潜在的裂纹, 可能成为了该轴断裂的策源地。

从图 9 图片可以看出: 1 号样金相组织: 回火索氏体 + 铁素体 + 夹杂物

从图 10 图片可以看出: 2 号样金相组织: 回火索氏体 + 铁素体 + 夹杂物



4% 硝酸酒精 500 ×



4% 硝酸酒精 500 ×

图 9 1 号样侵蚀后图片

图 10 2 号样侵蚀后图片

## 4 分 析

### 4.1 从 1 号样断裂失效的载荷性质分析

由于不同类型载荷所造成的韧性断裂其断口特征不同, 因此反过来可根据零件断口宏、微观特征来分析判定该零件所承载荷的类别。

(1) 拉伸载荷引起的韧性断裂, 宏观断口往往呈杯锥状或呈 45° 切断外形, 断裂处一般可见缩颈, 断口上具有大面积的韧窝, 且大都呈等轴韧窝或呈轻微拉长韧窝。

(2) 扭转载荷引起的韧性断裂, 宏观断口大都呈切断型, 微观上是拉长韧窝, 匹配面的韧窝拉长方向相反。

(3) 冲击载荷引起的韧性断裂, 在宏观上有冲击载荷作用留下的痕迹, 断口周边有不完整的 45° 唇口, 微观上呈撕裂拉长韧窝, 匹配面上的韧窝拉长方向相同。

金属零件韧性断裂的本质是零件危险截面处的实际应力超过材料的屈服强度所致。因此, 下列因素之一均有可能引起金属零件韧性断裂失效。

- (1) 零件所用材料强度不够。
- (2) 零件所承受的实际载荷超过原设计要求。
- (3) 零件在使用中出现了非正常载荷。
- (4) 零件存在偶然的材质或加工缺陷而引起应力集中, 使其不能承受正常载荷而导致韧性断裂失效。
- (5) 零件存在不符合技术要求的铸造、锻造、焊接和热处理等热加工缺陷。

通过以上试验分析, 该钢 C 含量为 0.930%, 大大的超过了 0.37 - 0.44%, 与 40Cr 材质不符, 硬度超标, 强度较高, 材料内部局域性的存在夹杂物等热加工缺陷, 而且在使用中可能出现了非正常载荷, 导致该轴首先断裂。

### 4.2 从 2 号样断裂失效的载荷性质分析

该轴为脆性断裂, 由于脆性断裂大都没有事先预兆, 具有突发性, 对工程构件与设备以及人身安全常常造成极其严重的后果。金属构件脆性断裂失效的表现形式主要有:

(1) 由材料性质改变而引起的脆性断裂, 如兰脆、回火脆、过热与过烧致脆、不锈钢的 475℃ 脆和  $\sigma$  相脆性等。

(2) 由环境温度与介质引起的脆性断裂, 如冷脆、氢脆、应力腐蚀致脆、液体金属致脆以及辐照致脆等。

(3) 由加载速率与缺口效应引起的脆性断裂, 如高速致脆、应力集中与三应力状态致脆等。

该断口断裂时, 颜色较光亮, 光亮断口是细瓷状, 对着光线转动, 可见到闪光的小刻面。

是典型的解理小刻面是解理断裂的典型特征。即小刻面即为结晶面, 呈无规则取向。当断口在强光下转动时, 可见到闪闪发光的特征。在多晶体中, 由于每个晶粒的取向不同, 尽管宏观断口表面与最大拉伸应力方向垂直, 但在微观上每个解理小刻面并不都是与拉力方向垂直。

从载荷性质的判断, 是由冲击载荷和压缩载荷造成的脆断, 断面有放射条纹或人字纹花样, 断口呈 45° 切断形状, 且无塑性变形。

引起解理断裂的主要因素有环境温度、介质、加载速度、材料的晶体结构、显微组织和应力大小与状态等。

(1) 环境温度环境温度影响解理裂纹扩展时所吸收能量的大小, 随着温度的降低, 解理裂纹扩展时所吸收的能量较小, 更容易导致解理断裂。

(2) 加载速度加载速率不同, 不仅影响解理裂纹扩展应力的值, 而且还影响材料应变硬化指数。在高应变速率下, 有利于解理断裂发生, 如图 13 所示。由图可以看出, 在同一试验温度  $T_a$  下, 加载高的  $V_2$  所对应的冲击能  $A_{k2}$  小于加载速率低的  $V_1$  所对应的  $A_{k1}$ 。  $A_{k1}$  为韧性断裂,  $A_{k2}$  则进入脆断区。

(3) 材料的种类、晶体结构及冶金质量对断裂

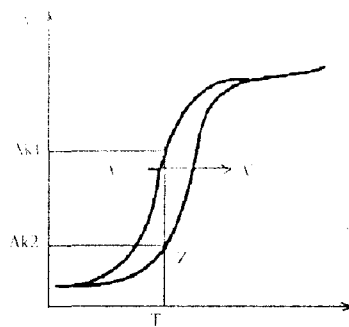


图 13 钢的延性 - 脆性转变曲线

起着重要的作用在通常情况下所遇到的解理断裂, 大多数都是属于体心立方和密排六方晶体材料, 而面心立方晶体材料只有在特定的条件下才发生解理断裂。即使体心立方晶体材料, 由于显微组织不同, 其解理断裂的形貌特征也不相同。材料的显微缺陷或第二相粒子等分布在解理面上, 则有利于解理断裂的发生。

通过以上原因分析, 加载速度和材料的显微缺陷是该轴断裂的发生的主要原因。

## 5 结 论

a. 该轴的化学元素分析表明, 该钢与 40Cr 材质不符。

b. 1 号样断裂在挠度最大处, 微观显示内部局部性的存在夹杂物, 导致了局部地区出现了晶界脆化, 加上整个轴硬度偏高, 轴的韧性不足, 长时运行导致该轴首先断裂。

c. 2 号样断裂是由于 1 号样断裂后, 受力平衡被打破, 经常上下移动斗轮, 使得该轴受交变的剪切应力的影响, 局部载荷可能突然加大时, 金属本身强度和韧性不足以满足使用要求, 导致该轴瞬间断裂。

(收稿日期: 20080110)

(上接 25 页)

## 4 结 语

综上所述, 提高机组经济性和安全性的途径需考虑优化运行方式, 包括各种蒸汽参数和辅机参数的整定、各种阀门的控制, 并加强系统和设备的检修。通过多台机组现场实际的检查和计算, 目前省内的机组在节能降耗工作上都做了比较细致的工作, 提高机组经济性和安全性, 取得了很好的经济效益和社会效益。

## 参考文献

- [1] 郑体宽. 热力发电厂. 中国电力出版社, 1992. 10
- [2] 贵州盘南电厂运行规程.
- [3] 任浩仁等. 600MW 机组中压缸启动过程的优化研究. 动力工程, 2002. 10
- [4] 王家胜等. 国产 600MW 亚临界机组的中压缸启动. 贵州电力技术, 2007. 1

(收稿日期: 20071229)