

# 中轧机齿轮轴断裂失效分析

牛俊民 林侠

**关键词** 机械制造 失效分析 齿轮轴 热应力型内裂

**摘要** 全连轧棒材生产线中轧 6<sup>#</sup> 轧机减速机过桥齿轮，投产不久在大直径处产生横向断裂。经分析主要原因是，齿轮轴在热加工过程中因热应力的作用生成了横向内裂，由于表面承受压应力的缘故，内裂未延伸至表面，因而出厂前难于发现，导致使用中突然断裂。预防横向内裂的主要措施是减小热应力，辅助措施为增加无损检测工序，以保证内裂纹被早期发现。

## 一. 概况

我公司为南钢棒材厂生产的全连轧棒材生产线，中轧 6<sup>#</sup> 轧机减速机过桥齿轮，在试生产阶段发生断轴事故，现场发现断裂发生在大直径处，属横向断裂，裂痕由内向外呈放射状，心部较边缘颜色深（见照片 1）。

齿轮轴材质为 20CrMnMo，重量 454Kg，工艺路线为：锻-金-热-金-热-金-装。齿轮轴整体为调质处理，齿表面渗碳淬火+低温回火。

齿轮轴简图及断裂位置见图 1（绘图比例 1：10）；取样位置见图 2。

在调质处理后的超声波探伤中发现有  $> \Phi 3$  当量的条状缺陷并存在  $\geq \Phi 6$  当量缺陷，底波衰减明显。

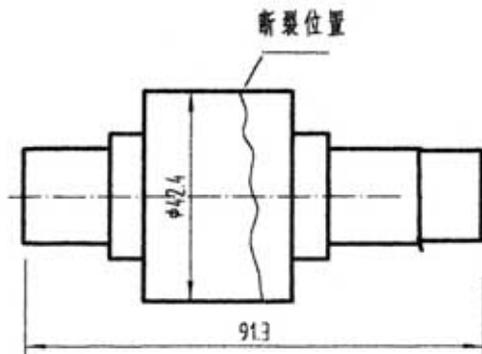


图1 工件尺寸示意图及断裂位置

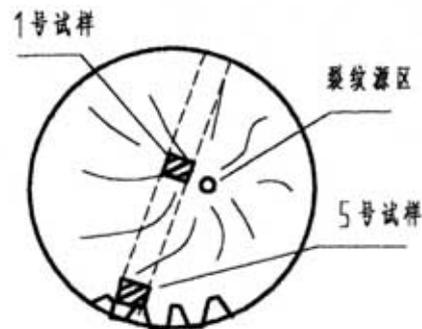


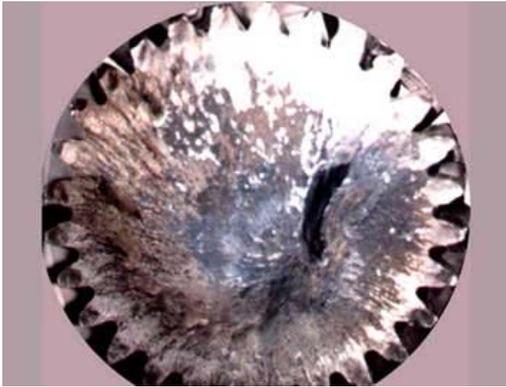
图2 取样位置示意图

## 二. 电镜能谱分析

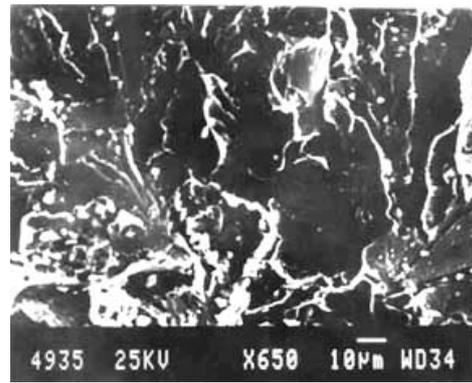
断面裂源区位于齿轮轴中心部位，该区域呈暗兰色，无金属光泽，裂纹从心部向周围发散状扩展，（见照片 1）。在裂源区取 1<sup>#</sup> 试样，断面平整无塑性变形，呈宏观脆断特征，微观特征为解理形貌，在解理面上有蚀坑，个别晶粒出现解理面烧熔特征，晶粒大小约 100 $\mu\text{m}$ ，局部晶面有烧蚀坑及变形线（鸡爪痕），见照片 2、照片 3、照片 4。

在靠近齿根部取 5<sup>#</sup> 试样，该样品代表裂纹最后断裂区断口形貌，断面平整呈暗灰色，其微观形貌特征为解理断裂，5<sup>#</sup> 试样解理面大小较 1<sup>#</sup> 试样小，晶面无烧蚀形貌，见照片 5、照片 6。

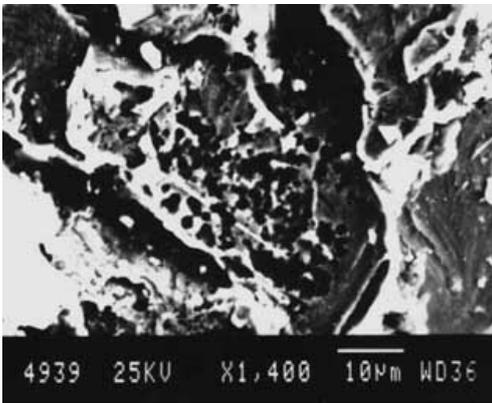
该轴为解理脆性断裂，在热加工时先形成了热应力型内裂，后续加热时造成解理面烧蚀。



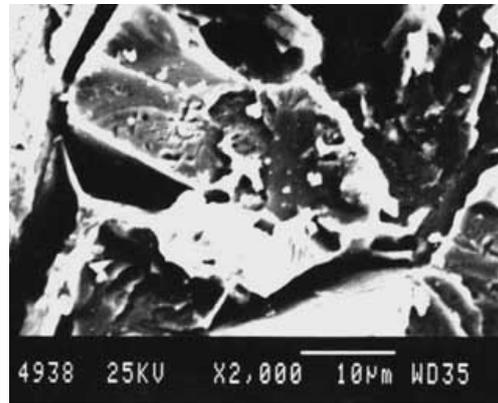
照片 1 齿轮轴宏观断口



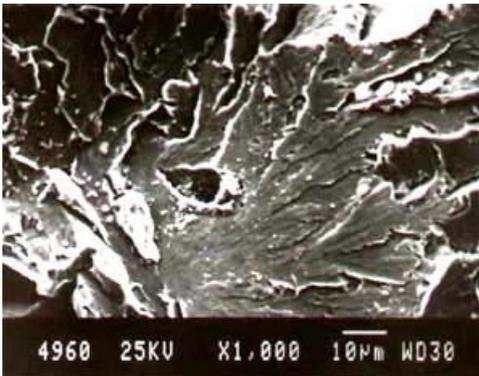
照片 2 1# 试样解理面上有蚀坑



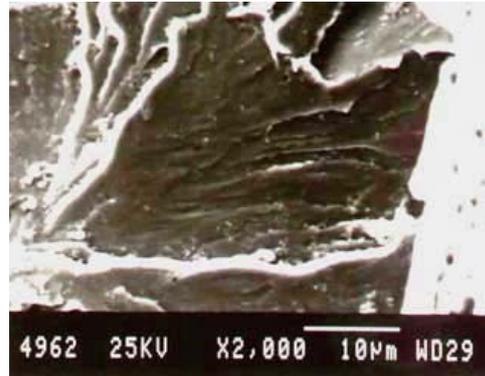
照片 3 1# 试样晶面烧蚀形貌



照片 4 1# 试样烧蚀坑及变形线



照片 5 5# 试样解理断口



照片 6 5# 试样解理面上无烧蚀坑

### 三. 对断轴事故的分析

#### 1. 对热应力型内裂成因的分析

大型工件内裂的产生,从材料学的观点来看,是由于材料所承受的应力超过了材料本身的破断抗力。因此,我们的分析也必须从热处理淬火和加热时的应力及材料的强度和塑性两方面考虑。

大型工件热处理淬火过程中的应力,主要由三种应力组成,即热应力、组织应力以及由于截面上转变组织的比容不同引起的应力。下面我们分别加以讨论。

热应力是热处理过程中,工件表面和中心或薄厚之间,由于加热或冷却速度不一,导致

体积膨胀不均匀而产生的内应力。

一个一定尺寸的圆形工件，从高温快速冷却，表面冷却快，心部冷却慢，内外之间存在较大的温差。由于表面先冷却要收缩，仍然处于较高温度的心部将阻止它的收缩，所以心部使表面受拉，相反表面使心部受压，这种应力随着工件内外温差的加大而增加。但是，钢在高温塑性阶段屈服强度低，塑性变形后应力将得到松弛，这时的热应力不可能很大。当外部先进入弹性阶段形成冷硬外壳后，将不允许按照心部需要收缩的要求改变容积和形状，对心部的收缩将产生阻碍作用。这时工件中的热应力分布将发生改变，表面由原来的受拉转变为受压，心部则由受压转变为受拉，而且随着冷却的继续进行而不断增大。这就形成了残余热应力，如图 3 (a) 所示。

组织应力是钢在淬火冷却时，由于表面冷却得快先发生组织转变（膨胀），中心或冷却较慢的部分后发生转变（亦膨胀），从而造成体积转变的不等时性所产生的内应力。仍以圆形工件为例，当淬火时，它从高温急冷，表面先发生组织转变（膨胀），未发生组织转变的心部将阻碍其膨胀，因而表面受压，心部受拉。由于这时心部温度较高而且处于奥氏体状态，塑性较好，将发生不均匀的塑性变形使应力松弛。继续冷却，当心部也开始转变并体积膨胀时，由于表面已形成弹性的外壳，将阻碍它的膨胀，应力反转为心部受压，表面受拉，形成残余组织应力，如图 3 (b) 所示。

大型工件由于截面较大，不容易完全淬透，往往只淬透一定深度的表层，这样就产生了沿截面上组织比容差异引起的应力。

我单位曾解剖分析过的大锻件淬火组织分布情况。从试验结果中看出，完全淬为马氏体的层深距表面不过 10mm 左右，马氏体消失一般都在 25~50mm 以内<sup>[1]</sup>。

由于组织转变的比容不同，以及在随后冷却过程中残留奥氏体的分解，便形成了表面马氏体层受压，心部受拉的残余应力，如图 3 (c) 所示。

大型工件淬火后的残余应力主要是以上三种应力的叠加，其叠加结果如图 3 (d) 所示。它的淬火应力属热应力型的，其最大拉应力峰值位于圆形截面的中心区或壁厚的 1/2 处。

图 4 是文献<sup>[2]</sup>介绍的 $\varnothing 150\text{mm}$ 碳钢在未淬透情况下的残余应力曲线。从图中看出，内应力的分布是热应力型的，中心拉应力达到最大值，并且轴向拉应力大于切向与径向拉应力。这就是大型工件在淬火内应力作用下容易产生横向内裂的原因。

由于大型工件在淬火后的特殊应力分布，加之表面的淬硬层有较高的强度，所以从心部拉应力峰值区开始的断裂一下延伸至表面比较困难，从而常常形成内裂。

在淬火以后，一般都进行回火处理，回火加热的升温速度控制也十分重要。因为截面大的工件，表面先受热膨胀，心部仍是“冷”的并不膨胀，这时工件又处于低温弹性状态，因此加热时内外温差形成的应力仍是表面受压、心部受拉的热应力。它与淬火时的残余应力正好叠加，故此时最易在工件心部形成开裂。对于那些含合金元素较高的材料，由于导热性差，加热时更要特别注意。

一般说来，回火对消除热处理残余应力是有利的。文献<sup>[3]</sup>介绍，对于含碳量 0.4% 的碳钢，400℃回火能使残余应力减少到 1/3；500℃回火则减少到 1/5 以下；600℃回火则能基本

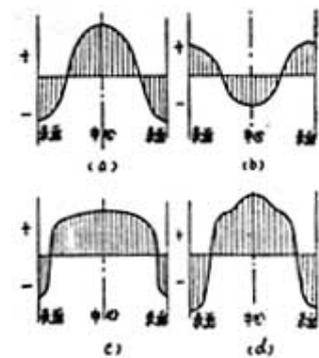


图 3 大型工件淬火残余应力

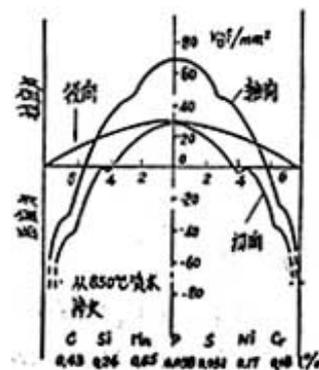


图 4  $\varnothing 150$  碳钢淬火残余应力

上完全消除。而在实际生产中,为了保持工件有足够的硬度,往往采取低温回火,这时的残余应力还保持了一个相当大的数值。

从材料角度来讲,大型工件中常存在各种内部缺陷,这些缺陷破坏了工件的连续性。往往在淬火应力作用下成为断裂起源。在产生热应力型内裂的工件中有的有白点,这是由于在残余应力作用下,氢含量过高引起材料变脆、破断抗力降低所致。但值得注意的是,有些内裂的方向与白点裂纹方向相垂直,而与残余拉应力的最大方向相吻合。

在热应力型内裂中,断裂起源于中心附近,而中心部位又常出现冶金缺陷,因而夹杂类缺陷,常被认为是引起开裂的主要原因,但是,在中心钻孔的大型轧辊中,热处理淬火拉应力峰值在 1/2 壁厚处,而开裂也常起源于壁厚的一半处,这就难于用中心夹杂来解释了。

实践证明,在我们遇到的热应力型内裂与断裂中,低倍检验与高倍检验也有未发现异常缺陷的。它们的开裂主要是由于淬火操作不当或回火不及时,致使工件中残余应力过大所致。

## 2. 齿轮轴断裂分析

齿轮轴常见的失效方式是断齿、剥落、点蚀、胶合等情况,断裂失效较为少见,况且是断于大直径处。从受力分析来看,断裂应该发生在小直径与大直径交接处,常常是疲劳断裂,断口上有疲劳辉纹。该轴断口属解理脆性断裂,裂痕从心部向外呈放射状,说明开裂起源于心部并迅速扩展至表面附近,受到表面压应力的阻止,才未延伸至表面。内裂形成以后又经过一次加热相变,在高温作用下,已经形成内裂的表面在封闭缺氧的情况下,表面低熔点的化合物熔化并从表面剥落,形成了烧蚀断口特征。表面的断裂是使用中受外力的情况下发生的,它是新断口,因此没有烧蚀特征。由于两次断裂发生的时间不同,加热后冷却速度不同,因此两者断口晶粒大小不同。带有大面积横向内裂纹的齿轴,在外力的作用下,出现裂纹顶端的应力集中,使裂纹迅速扩展,最终导致破断并失效。

## 四.预防措施

齿轮轴的失效是因为热应力型内裂造成的,预防措施也主要从预防热应力型内裂为主,应从降低心部拉应力和提高材料破断抗力两方面加以考虑。

1. 适当降低淬火温度,可以减小热应力,对防止内裂有利。
2. 淬火时,注意工件的均匀冷却。
3. 及时回火是预防内裂的有效措施。特别是合金钢大锻件,淬火后必须及时回火。
4. 控制加热升温速度十分重要,快速加热会导致内外温差加剧,热应力增大。特别是含碳与合金元素高的大型锻件,低温阶段的升温速度要严加控制。
5. 减少材料中的缺陷,提高材料本身的强度对防止淬裂也很重要。为了提高材料本身的强度,对于晶粒粗大的工件,可先进行一次正火,以便细化晶粒,提高强度。
6. 为了防止有内裂的产品进入下一道工序,增加调质后的超声波探伤。探伤时,采用沿轴向的横波入射和纵波贯穿入射,以便预防内裂纹的漏检。

## 参 考 文 献

- [1] 牛俊民:“大型工件热处理过程中的内裂及其预防”,《金属热处理》,1979,10
- [2] 浙江大学新技术译丛编译组:《热处理变形与开裂》,1973
- [3] 朱荆璞:“谈谈热处理应力及其作用”,《金属热处理》,1979,2

此项试验得到华山机械厂黎晓华等同志支持,在此一并表示谢意!



访问我们的官方网站了解更多内容

扫描二维码关注