

# 大型工件热处理过程中的内裂及其预防

牛俊民

多年来,人们对于大型工件中的内裂十分重视,因为内裂难于被发现且在使用中易造成突然事故。通常人们把未延伸至表面的内部断裂统称为内裂,大型工件由热处理应力引起的内裂是主要的一种,我们叫它为热应力型内裂。近年来,由于无损探伤技术的发展和运用,对于内裂等严重缺陷的检测有了一定的手段,但内裂还是时常出现,由此造成的突然断裂也不断发生。因此研究热应力型内裂的成因,寻求预防热应力型内裂产生的措施,是十分必要的。

为了寻求热应力型内裂的成因,先分析这种内裂的断口特征,进而分析热应力与内裂的关系。

## 一、热应力型内裂的断口特征

热应力型内裂多出现在热处理过的大型轴类锻件中;在大型铸钢件中,在方形截面的零件以及大型齿圈中也有时出现。其纵断面形态如图1所示。

已产生热应力型内裂的大型工件,由于断面上有效受力面积减小和产生了严重的应力集中,所以在使用中往往会突然断裂。图2所示的带有横向内裂纹的劳特轧机上轧辊的断裂就是一例。该轧辊规格为 $\text{Ø}780 \times 1100 \times 2950\text{mm}$ ,60CrMnMo钢锻制,单重7.4吨。轧辊工作时,压下量正常,轧制温度正常,安全销未断。新辊初上轧机第一支坯未轧完就发生断辊。该轧辊曾经两次检查均未发现表面裂纹和内部白点缺陷。轧辊的热处理工艺如图3所示;金相组织如图4。从图2断口上看,它明显分为两个区域,中心部位(区域1)呈纤维状,放射状裂痕起源于心部;边缘有一圈20~25mm厚度的较细断口(区域2),为宏观脆性断口。

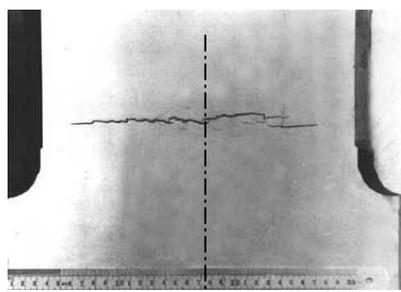


图1 热应力型内裂的纵向特征



图2 劳特轧机上轧辊断口实照

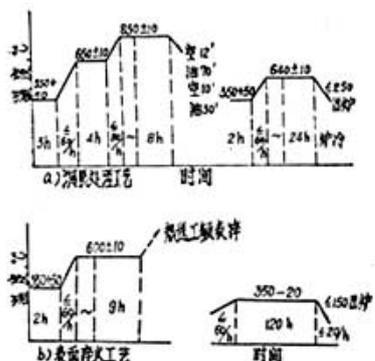


图3 劳特轧机轧辊热处理工艺曲线

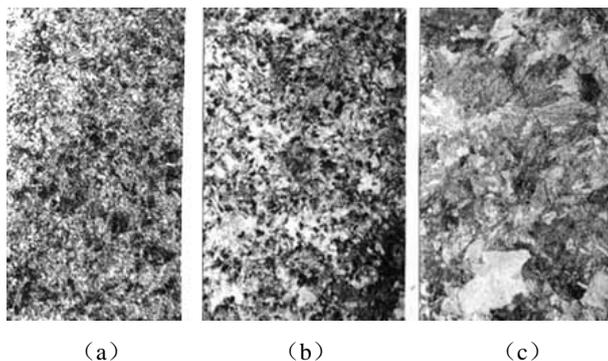


图4 劳特轧机上轧辊的金相组织

图4说明：(a) 表面(0—25mm) 细回火隐晶马氏体+少量屈氏体  $\times 200$   
 (b) 过渡区(距表面25mm左右) 回火马氏体+屈氏体+珠光体  $\times 100$   
 (c) 心部(距表面240mm处) 珠光体  $\times 200$

图5是45钢锻制柱塞，淬火时产生的横向内裂断口。柱塞规格为 $\varnothing 500 \times 5000\text{mm}$ ，单重6吨。热处理工艺为 $860^\circ\text{C}$ 加热，水淬， $450^\circ\text{C}$ 回火。在井式淬火槽中淬火时，吊钩上下使工件串动，以使工件均匀冷却。入水10分钟后天车突然停电，这时听到一次裂响。10分钟后天车修好，之后又有两次停电停串，并听到两次裂响。淬火后14小时进行了回火，回火后发现一条450mm长的横裂纹，图5就是撞断后的断口。从图中可以看出，断口呈纤维状，明显分为四个区域：区域1是淬火时第一次裂响形成的内裂，它并未暴露表面，放射状裂痕起源于心部；由于淬火过程中又出现两次天车停电停串，内裂也两次扩展形成了区域2和区域3，呈松针状裂痕，它是以前次裂纹边缘作为许多新的裂源起点形成的；区域4是在回火后撞断的新鲜断口。区域1、2中靠表面有一部分断口颜色为黑色，是由于第二次断裂延伸到表面，淬火时水渗入回火时变黑所致。

图6是9Cr2钢芯棒在调质处理过程中产生的横向开裂断口。该锻件规格为 $\varnothing 300 \times 4500\text{mm}$ ，单重3吨，调质工艺为 $880^\circ\text{C}$ 油淬， $700^\circ\text{C}$ 回火，淬火与回火间隔4小时。淬火后在吊坑中放置时断掉一段，在回火时又断成四段，其断口形式都相同。从图6看出，断口上的放射状裂痕，从心部开始一直延伸到表面。由未回火的部分取样金相分析，工件表面也没有淬硬，组织为淬火索氏体，硬度有HB300左右。

图7是铸钢80CrMo轧辊的横向内裂断口。由于轧辊已由 $\varnothing 560\text{mm}$ 加工成 $\varnothing 390\text{mm}$ ，内裂已暴露于表面。虽然该铸钢轧辊的断口较粗，仍可以看出从心部开始的放射状裂痕。

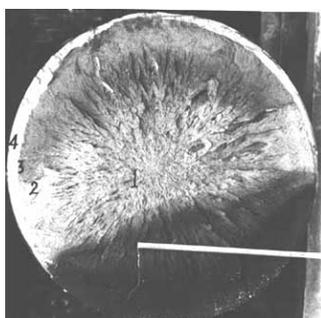


图5 45钢柱塞断口实照

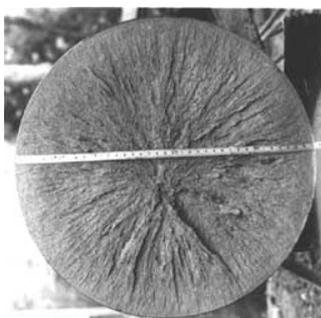


图6 9Cr2 芯棒断口

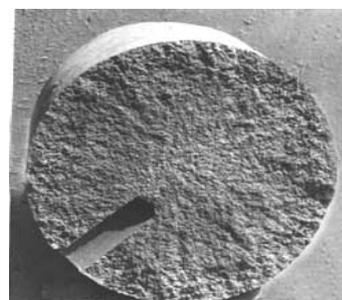


图7 ZG80CrMo 轧辊断口

通过对以上断口的分析，我们可以看出，热应力型内裂断口具有以下特征：

- ①大多数系横向断裂，断口齐整；
- ②断裂起源于截面（或厚度）的中心附近；
- ③裂痕从心部始，向外呈放射状；
- ④一次断裂的面积较大，但一般不易延伸到表面，多以内裂形式存在；

⑤对9Cr2钢芯棒及ZG80CrMo钢轧辊断口的扫描电子显微镜观察表明，芯棒的断口大部分为解理和准解理断口（图8）；轧辊的断口大部分为解理断口（图9），并伴有沿晶断口（图10）。这说明热应力型内裂多系淬火后的脆性断裂。

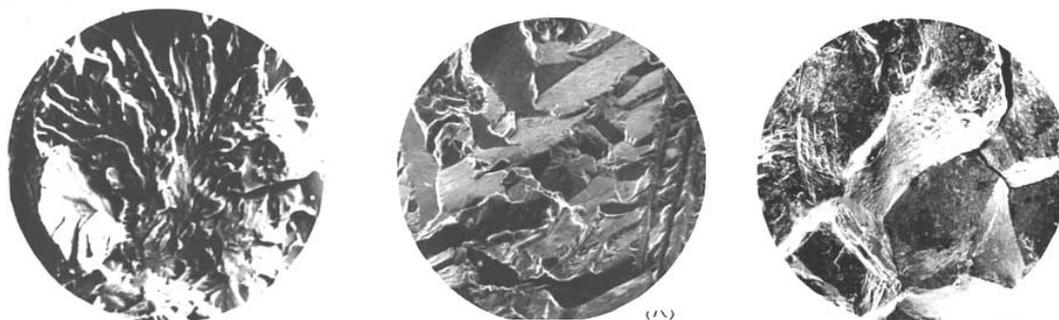


图8 9Cr2 芯棒断口 (SEI) ×800 图9 ZG80CrMo 解理断口×320 图10 ZG80CrMo 沿晶断口×40

## 二、热应力型内裂形成分析

从材料学的观点来看, 工件之所以产生内裂及断裂, 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 11 (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 11 (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。表 1 列出了钢的各种组织的比容。

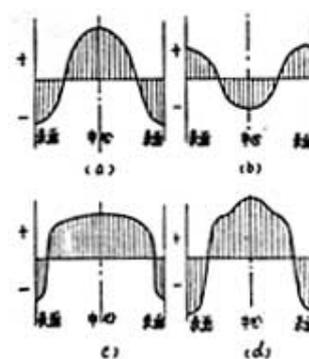


图 11 大型工件淬火残余应力

表 1 钢的各种组织的比容<sup>[1]</sup>

组 织	室温下的比容 (厘米 <sup>3</sup> /克)
奥 氏 体	0.1212+0.0033 (% C)
铁 素 体	0.1271
铁素体+渗碳体	0.1271+0.0005 (% C)
马 氏 体	0.1271+0.0025 (% C)

表2列出了我厂曾解剖分析过的大锻件淬火组织分布情况。从表2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。

表2 大型锻件淬火组织分布情况

工 件	直 径 (mm)	热 处 理	淬火组织分布 距表面距离 (mm)		
			全马氏体层	半马氏体层	马氏体消失
40Cr 钢叉头	Ø640	850℃油淬	10.5	15	25
40CrMnMo 钢连接轴	Ø 818	860℃油淬	10	30	50
			贝氏体出现: 10	78	160
45 钢柱塞	Ø500	860℃水淬	8	—	—
40Cr 钢齿轴	Ø760	840℃水淬油冷	—	—	28
50Mn2 钢齿轴	Ø310	830℃水淬油冷	—	—	25—30

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11(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11(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12是文献<sup>[2]</sup>介绍的Ø150mm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。而9Cr2钢芯棒的断口则是工件表面未淬硬的一个特殊情况。

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。

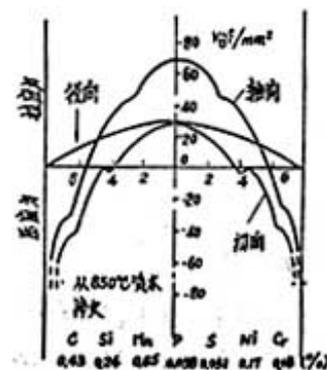


图12 Ø150 碳钢淬火残余应力

### 三、大型工件热应力型内裂的预防

从上面的讨论可以看出，热应力型内裂产生的主要原因是工件淬火时的残余应力，材料中的缺陷是引起开裂的辅助原因。为了预防内裂及断裂的发生，主要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。因为淬火温度越高，热应力越大，同时，加热温度过高也会使奥氏体晶粒粗化，使材料强度变低。工件出炉后淬火前适当预冷，也对减小热应力预防内裂有利。

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。淬火后不及时回火将导致残余应力加剧，并且随着时间的延长，表层的残留奥氏体继续分解，进一步加剧了内部的拉应力。因此，大锻件，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。一般说来，大锻件在低温阶段的升温速度要控制在  $30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}^{[4]}$ 。回火加热时，因工件有很大的残余应力，升温时更要注意。

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. 带有内孔的大型工件淬火时，内孔同时冷却对防止淬裂有利。我们在调质热处理  $\text{O}640\times 1100\text{mm}$ （带有  $\text{O}380\text{mm}$  盲孔）40Cr 钢叉头时，由于吊装时盲孔朝下，盲孔内壁得不到充分冷却，致使4个工件全部在盲孔底部产生裂纹。后来改用盲孔朝上吊装，孔内冷却条件改善，以后处理的6件全部合格。

我们在处理  $\text{O}750\times 4300\text{mm}$  40Cr 钢主减速机大轴时，由于采取了减小热处理应力的措施，取得了满意的效果。该件重10吨，在热处理前的超声波探伤中发现较严重的多处缺陷反射波。2.5MC探伤，发现工件晶粒粗大；1.25MC探伤时缺陷对底波影响很大，并且伴有心部及心部附近的缺陷波，缺陷有一定的方向性，判定为锻造时被打扁的外来夹渣缺陷。鉴于我们在热处理大锻件时曾出现过多次内裂与断裂，该件心部又有较严重的缺陷，对工艺作了认真地讨论并采取了措施。考虑到该件晶粒粗大，在安排调质处理以前先进行一次正火，细化晶粒，减少锻件的不均匀性，以提高材料强度。在装炉温度和升温速度上都做了严格的限制，并在到达淬火温度以前的  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  做了两次等温，淬火前降至  $820\text{ }^{\circ}\text{C}$  进行等温，出炉后又有45分钟的预冷（图13），淬火后3.5h及时进行回火，从而防止了淬火开裂。



图13 40Cr 钢减速机大轴热处理工艺曲线

### 参考文献

- [1] 吉田亨等著，张克俭译：《预防热处理废品的措施》，机械工业出版社
- [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
- [4] 东北重型机械学院等合编：《大锻件热处理》，1974

（文章在这次发表时有局部修改）



↑  
访问我们的官方网站了解更多内容

← 扫描二维码关注