

# 钢中缺陷及对机械制件的影响

牛俊民

## Effect of defect in steel on machine parts

Niu Junmin

(xi'an Metallurgical Machinery Works)

机械零件的使用寿命与钢中缺陷有着密切的联系，且设备事故多数与钢中存在着不允许的缺陷有关。

### 1. 缩孔与缩孔残余

铸件在冷却和凝固过程中，由于合金的液态收缩和凝固收缩的结果，往往使铸件在最后凝固的地方出现孔洞（容积大而集中的孔洞称为缩孔，细小而分散的孔洞称为缩松）。

铸件中也常常遇到蜂窝状缺陷，它的形状象蜂窝，主要出现在铸件的热节处或冒口下方，它由缩孔、气孔及夹渣组成。

重要的钢材或大型锻件大都使用镇静钢，浇注镇静钢的铸型除一部分采用敞口小钢锭外，绝大部分采用带保温帽的上大下小的，通常为四方形和多边形的铸型。镇静钢的上部都有一个大的盆腔式的缩孔，如果在锻造时冒口处的缩孔切除不足，便在锻件中形成缩孔残余缺陷。当锭型设计不合理，冒口材料保温效果不良，发热剂配制不好以及出现浇注事故等原因，缩孔有时深入锭身或产生二次缩孔，切除不足也会在钢坯或锻件上产生缩孔残余。

在锻件切头时缩孔残余一般都能发现，它多呈扁状的空洞或呈鸡爪状裂纹。在横向酸浸的低倍试片上，缩孔残余的主要特征是呈现鸡爪形中心裂纹，且伴随有大量的夹渣、夹杂物以及较严重的缩松（见图1）。

缩孔及缩松是锻材中的不允许缺陷，它破坏了钢的连续性，易造成应力集中，有时使锻件在淬火时产生开裂或形成更大的内部裂纹。

缩孔与缩孔残余的出现有一定的规律，即多数出现在冒口端，并且一直延伸至端头，所以在零件加工过程中容易被发现，即使存在于工件内部，经过探伤也不难检查出来。

### 2. 白点

白点为金属内部缺陷，其形状为不同长度和不同方向的裂纹群。在淬火打断后的平行于白点方向的断口上，白点是在纤维断口的基体上呈圆形或椭圆形银白色斑点（图2）。

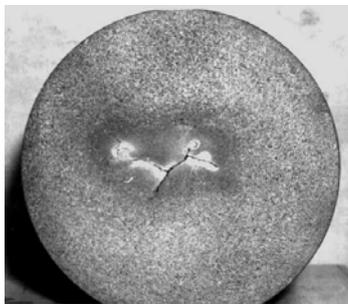


图1 42CrMo 轴上的缩孔残余

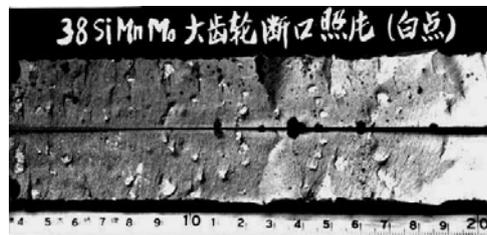


图2 白点的断口形态

白点在酸浸后的横向低倍试片上表现为锯齿状裂纹，即发丝状裂缝，又称“发裂”。

白点可以锻合是它与夹杂物、夹渣缺陷的主要区别之一。由于白点是钢材内部的局部小面积开裂，其表面未被氧化和沾染<sup>[1]</sup>，所以只要重新锻造时轧制方向合适或锻造比足够大，

白点可以锻合，并且其机械性能完全合格。为使白点锻合所需要的锻比随材料及白点级别而变化，一般锻比需在2~7之间。

白点的产生与钢中的氢含量及应力有关，钢中氢含量越高，越容易产生白点。钢中的氢使钢变脆，应力的存在使钢破裂。

白点对钢的机械性能的影响与取样位置及方向有关。我们曾在有白点的40Cr边辊上截取试样做机械性能试验，虽然制取试样上没有白点，但除强度值合乎标准之外，韧性指标和塑性指标大幅度下降，冲击值由规定的 $\geq 3$ 降为0.9~1.5；延伸率值由规定的 $\geq 13$ 降低为2.7~3.5；断面收缩率下降最多，由规定值 $\geq 40$ 下降到1.9~2.2。

白点对纯弯曲疲劳寿命影响极大，它使试棒在低应力低周次断裂。我们曾对有白点的38CrMnMoSi和对有白点与无白点的40#车轴钢，做纯弯曲疲劳寿命的对比试验，试验结果分别列于表1和表2。

表1 38CrMnMoSi 钢白点对纯弯曲疲劳寿命的影响

试样号	施加应力 (MPa)	循环次数	断口情况
2~3	192	$5914 \times 10^2$	断于白点
2~2	192	$5298 \times 10^2$	断于白点
2~4	240	$2437 \times 10^2$	断于白点
2~1	240	$2727 \times 10^2$	断于白点

表2 40车轴钢有白点与无白点试样的疲劳寿命

施加应力 (MPa)	缺陷情况	试样号	循环次数	断裂情况
192	有白点	1~4	$4252 \times 10^2$	断于白点
		1~2	$5028 \times 10^2$	断于白点
	无缺陷	3~5	$> 10^7$	试样未断
		3~9	$> 10^7$	试样未断
216	有白点	1~7	$1979 \times 10^2$	断于白点
		1~8	$1177 \times 10^2$	断于白点
	无缺陷	3~12	$> 10^7$	试样未断
		3~13	$18264 \times 10^2$	断在R上
240	有白点	1~9	$902 \times 10^2$	断于白点
		1~10	$1391 \times 10^2$	断于白点
	无缺陷	3~6	$9850 \times 10^2$	
		3~8	$6037 \times 10^2$	

有白点的钢不仅降低钢的机械性能，而且在热处理（特别是淬火）时，易产生裂纹及开裂，图3是38SiMnMo钢大齿轮在淬火时开裂的情况。

### 3. 夹杂物与夹渣

钢中的夹杂物通常为非金属夹杂物和异性金属夹渣，其中常见的是非金属夹杂物。钢中的夹杂物中断了钢的连续性，它们在钢中的形态、含量和分布情况都不同程度地影响着钢的各种性能。

夹杂物的来源大体可以分为两大类。一类为内在夹杂物，例如用硅或铝脱氧后，在金属内形成了氧化硅或氧化铝夹杂物；又如钢料中的非金



图3 38SiMnMo大齿轮开裂实验照

属杂质在高温熔化于液态金属内，随着温度下降，脱溶析出，形成夹杂物；另一类称作外来夹杂物，这是由于冶炼或浇注过程中从设备或容器上剥落下来掺于液态金属内的杂质，例如耐火材料等，它们的特点是无一定形状，而且尺寸特别大。

异性金属夹杂属于低倍夹杂范围，钢坯（材）中的异性金属夹杂，在酸蚀试片上呈色泽、性质与基体金属显然不同的金属块，形状不规则，但边缘比较清晰，周围常有非金属夹杂物伴随出现。

钢中夹杂物与夹渣的存在，破坏了钢的连续性，影响零件的使用性能，在某些情况下，变形后的夹杂物引起应力集中，常常成为破断的裂纹源。在重要的设备零件中，对夹杂物有一定的级别要求，超过标准后材料应报废或改作他用。在一般的机器零件中对夹杂物都没有作金相检查的要求，而超声波探伤所能发现的单个夹杂物，只能是夹渣，微观夹杂物在探伤中难于发现。

变形后的夹杂物虽然肉眼难于发现，但磁粉探伤可以发现沿金属流线方向细而长的磁痕，通常称作发纹。发纹对承受疲劳载荷的车轴疲劳寿命影响不显著，我们的试验证明了这一点（见表3）。

**表3 发纹对纯弯曲疲劳寿命的影响**

施加应力 (MPa)	缺陷情况	试样号	循环次数	断裂情况
192	发纹	3~2	$>10^7$	试样未断
		3~3	$>10^7$	试样未断
	无缺陷	2~5	$>10^7$	试样未断
		2~9	$>10^7$	试样未断
216	发纹	3~7	$24466 \times 10^2$	断在发纹上
		3~11	$17484 \times 10^2$	未断发纹上
	无缺陷	2~12	$>10^7$	试样未断
		2~13	$18264 \times 10^2$	断在R处
240	发纹	3~1	$5383 \times 10^2$	断在R处
		3~10	$8673 \times 10^2$	未断发纹上
	无缺陷	2~6	$9850 \times 10^2$	
		2~8	$6037 \times 10^2$	

#### 4. 裂纹

裂纹是钢中不允许缺陷之一，它的危害不仅在于它减小了零件的截面积，而且造成了严重的应力集中现象，容易使材料发生突然断裂，造成重大事故。钢中裂纹有铸钢中的裂纹、热处理裂纹和疲劳裂纹等种类，它们的形态和危害不尽相同。

##### 1) 铸钢中的裂纹

铸钢中的裂纹主要是热裂和冷裂。

热裂有外裂和内裂两类。在铸件表面可以看到的热裂纹称为外裂，裂口从铸件表面开始，逐渐延伸到内部。表面宽而内部窄，裂口有时会贯穿铸件整个断面。外裂常产生在铸件的拐角处、截面厚度有突变处或局部冷凝慢以及可以产生应力集中的地方。内裂产生在铸件内部最后凝固的部位，常在缩孔附近。裂口表面很不平滑，常有很多分叉。外裂大部分用肉眼就能观察出来，细小的外裂则需用磁力探伤或着色探伤检查；内裂则必须用射线或超声探伤才能检查出来。

外裂一般容易发现，如铸件本身的焊接性好，裂纹经焊补后可使用。内裂隐藏在铸件内部，不易被发现，它的危害较大。

冷裂是铸件处于弹性状态时，铸造应力超过合金的强度极限而产生的。冷裂往往出现在铸件受拉伸的部位，特别是在应力集中的地方，如内尖角处和缩孔、非金属夹杂物的附近。

大型复杂的铸件容易形成冷裂，有些裂纹往往在打箱清理后即能发现，有些是因铸件内部已有很大的残余应力，在清理及搬运时受到震击或出砂后受到激冷才开裂的。

冷裂纹的特征与热裂纹不同，外形常是圆滑曲线或连续直线状。而且往往是穿晶而不是沿晶断裂。冷裂纹断口表面干净，具有金属的光泽或呈轻微的氧化颜色，这说明冷裂是在较低温度下形成的。

在大型的铸钢件中，由于特殊的残余应力分布常常出现内冷裂，内冷裂多数是横向裂纹，一般不会延伸至工件表面，裂纹面积较大，未断部分从横断面上看是一个圆环。由于内裂纹面积较大，离表面较近，往往在出厂前加工时发现，这时看到的是圆周向裂纹，有时甚至会断在车床上。当内裂面积较小，加工时未发现，工件也可能出厂，这时会在使用中发生断裂。作者曾多次遇到这种现象。例如皮尔格轧机 ZG80CrMo 轧辊，就几次发生断辊，多数是冒口端的横向断裂。

2) 钢的热处理裂纹

常见的淬火裂纹有纵向裂纹、横向裂纹和弧形裂纹、表面裂纹以及剥离裂纹等(图 4)。

纵向裂纹是由工件表面裂向心部的深度较大的裂纹。生产实践证明，纵向裂纹往往发生在完全淬透的工件上，而且随淬火温度的提高，形成裂纹的趋向也增大。

淬火引起的表面纵向裂纹在生产过程中很容易发现，但是如果零件形状是管状，热处理淬火时也容易形成内壁的纵向裂纹，由于它裂口很小，不经探伤检查难于发现，容易安装到机械设备上导致设备事故。

图 5 是经磁粉探伤发现的内壁纵向裂纹。

横向裂纹多数表现为横向内裂纹。在零件纵剖面上是垂直于轴向的横向裂纹，裂纹离边缘有一定距离。从横向断口上看，断口分为两个明显的区域，中心区域裂痕呈放射状，裂源在中心；边缘区域是后断的，其断口与内部不同，断口较细而且是新断口<sup>[2]</sup>。

由于横向内裂纹一般不暴露在工件表面，因而常对机械设备造成严重威胁。图 6 是某钢厂劳特轧机上轧辊断裂后的断口照片。轧辊初上轧机，轧制第一支坯时断裂，断辊发生时操作正常，安全销未断。经分析，该轧辊在表面淬火后残余应力过大，在上轧机前已存在内部横向裂纹。查制造厂原始记录，虽经探伤检查，但因磁粉探伤难于检查离表面较深的内部缺陷，纵波圆周的超声波探伤对内部横向裂纹也很容易漏检，因而未能在上机前检查出来。检查横向内裂纹的最好方法是，横波圆周探伤或纵波贯穿入射的超声波探伤。

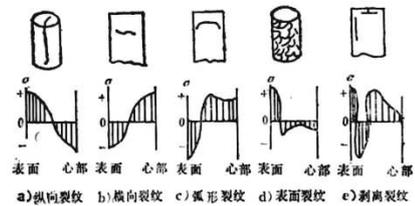


图 4 钢件冷处理裂纹类型及残余应力分布



图 5 管状零件内壁的纵向裂纹



图 6 劳特轧机上轧辊断口实照

弧形裂纹往往发生在未淬透的，或者经过渗碳淬火的工件上。例如，直径或厚度在 80~100mm 以上的高碳钢制件，在淬火加热温度偏低或冷却不充分时，往往易于产生这种弧形裂纹。

表面裂纹是一种分布在工件表面深度较小的裂纹，其深度是 0.01~2mm，有的地方可能深些。表面裂纹分布的方向、形态与工件的形状无关，但与裂纹的深度有关。

产生表面裂纹的工件，其应力分布往往是在工件不深的表层内出现拉应力（如图 4d），并且具有拉应力表面的金属塑性又很小，即不容易发生塑性变形的情况下，则产生这种裂纹。

图 7 所示是直径  $\varnothing 210\text{mm}$  的 40Cr 柱塞，表面火焰淬火后的表面裂纹（磁粉探伤后的照片，不用探伤方法肉眼很难发现）。图中箭头 1 处是两排火焰喷嘴接头处形成的表面裂纹，其形状是沿圆周一圈。箭头 2 所指呈网状的表面裂纹是磨削裂纹。

剥离裂纹是表面淬火工件淬硬层的剥落，以及化学热处理后沿扩散层出现的表面剥落。钢件经渗碳后淬火时，渗碳层淬成马氏体，其内部过渡层可能得到屈氏体，心部则仍保持低碳钢的原始组织状态（铁素体+珠光体）。由于马氏体的比容大而膨胀受到内部的牵制，使得马氏体层呈现压应力状态，则在接近马氏体层的极薄的过渡层内具有拉应力（图 4e）。剥离裂纹就产生在拉应力向压应力急剧过渡的极薄的区域内。一般情况下，裂纹潜伏在平行于工件表面的皮下，严重时造成表层剥落。

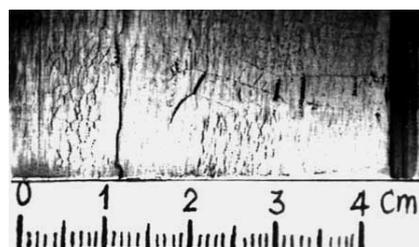


图 7 40Cr 柱塞表面淬火裂纹与磨削裂纹

表面淬火的制件，有时也能形成这种皮下裂纹，甚至形成沿工件整个圆周的皮下裂纹。有时剥离裂纹是在使用过程中发现，如  $\varnothing 900\text{mm}$  ZG55 天车行走轮经表面火焰淬火，使用数天后即发现大量裂纹。车轮已有表面剥落，经金相观察表面，该轮的淬火裂纹贯穿整个淬透层。穿过淬透层之后，由于交界处拉应力的作用，裂纹末端在平行于表面的方向扩展。其发展结果，导致表面淬硬层剥落。

### 3) 疲劳裂纹

金属构件在变动载荷作用下，经过一定周期后所发生的断裂称为疲劳断裂。

疲劳断裂在所有的金属构件断裂中占主要地位，有人曾做过统计，在所有的实物损坏中，疲劳断裂的比例高达 90%<sup>[3]</sup>。疲劳断裂的方式是多种多样的，根据变动载荷的方式可分为拉压疲劳、弯曲疲劳、扭转疲劳、冲击疲劳及复合疲劳等几种。若按循环应力的频率来区分，疲劳又可分为低频疲劳、中频疲劳及高频疲劳。也有按疲劳断裂的总周次来划分的，当断裂的总周次在  $10^4$  以下时称为低周疲劳，这种疲劳是目前研究得最多的一种；当断裂的总周次  $> 10^5$  时称为高周疲劳。根据金属构件运行的环境条件，疲劳又可分为热疲劳（高温疲劳）、冷疲劳（低温疲劳）、冷热疲劳及腐蚀疲劳等。

在工厂的设备检修中常常遇到疲劳裂纹，多数疲劳裂纹都是表面圆周方向的裂纹，因为无论受弯曲应力的制件还是受扭转应力的零件，最大应力多在表面，所以在零件检修时，首先要用磁粉探伤检查工件表面。为了不使内部成核的疲劳裂纹漏检，还必须做超声波探伤以检查零件的内部缺陷。

## 参 考 资 料

- [1] 李敏之等，“白点断口微观形态的初步探讨”，《理化检验》物理分册，1979，No1.
- [2] 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》，1982，8.
- [3] 郑文龙，《金属构件断裂分析与防护》，上海科学技术出版社，1980.

（文章在这次发表时有局部修改）

