

“钢中的裂纹与白点”是在陕西省机械工程学会金相学术交流会和陕西金属学会物理检测学术委员会年会上的专题讲座。由讲座提纲与典型照片两部分组成。

## 钢中的裂纹与白点 一牛俊民

### 一、钢中白点

#### 1、白点的危害

白点是在第一次世界大战期间铬镍钢中首先发现，1917年美国发现所有铬镍钢制成的飞机曲轴都有白点。白点缺陷在钢中造成应力集中，并使钢性能变脆。白点的存在容易使工件在热处理时开裂并经常造成突然破坏的人身设备事故。

例如美国芝加哥瑞吉南电站一台 16 万 5 千瓦汽轮机低压缸主轴，因有白点，1954 年 12 月 9 日突然发生爆裂事故。发生事故时仅运转三个月。

我们也曾遇到多起白点引起的破坏，例如 1976 年我厂供攀钢轧制 I<sub>56</sub> 字钢大型轧辊  $\Phi 800\text{mm}$ ，由于内部存在白点而发生断裂（照片 1）断裂时第一辊坯未轧完。

照片 2、3 都是白点引起的热处理开裂。

白点对钢的机械性能影响很大。其中断面收缩率、延伸率和冲击值降低较多，对强度的影响取决于所取试样有无白点及白点与试样轴线的相对位置。

白点的存在严重地降低了钢的抗疲劳性能。我们曾做过纯弯曲疲劳试验证明，白点对 40 钢车轴钢纯弯曲疲劳寿命影响极大，以破断的循环次数来看，无白点试棒与有白点试棒相比可差几倍到几十倍甚至更多。同时随着施加应力的减小，倍数有明显增加的趋势。这说明在应力作用下（一般使用应力都较小），白点对循环次数的影响更大。同时有白点的试棒都断与白点处。

白点有如此之大的危害，有人称它为钢的缺陷中的“癌症”，一般标准中都规定，发现白点都要报废。

#### 2、白点特征

##### (1) 白点的纵向端口特征及白点的定义

白点的纵向端口特征是呈圆形或椭圆形的银白色斑点，因此取名“白点”，他实际上是存在于钢中的片状裂纹群。

白点的纵向端口有以下四个特征：

- a) 形状为斑点状、圆形、椭圆形伸长的雪片状及其它形状。
- b) 颜色一般是银白色的，随化学成分及加工条件不同也可能是灰色的。
- c) 白点的大小由于钢种及形成条件不同而差别很大，从零点几毫米到几十毫米，白点面积大小与白点裂纹长短相对应，白点裂纹的宽度极小。

d) 白点区域的断口与其周围基体断口有明显区别。由于打断口时的热处理状态不同，白点区的晶粒可以比基体金属的粗，也可能比基体金属的细。在淬火后打断的断口上，白点区是粗晶粒的，而且经常是有光泽的和未变形的，有时白点较基体显著凹陷。当出现与折断方向相垂直的白点时，端口上看到一条裂纹，裂纹两侧断口有突跳，有时两侧的金属会随着裂纹突出金属断口表面，形成所谓“鸭嘴形”。

白点的纵向断口可见照片 4、5。

白点的垂直断口平面时的情况，见照片 6、7。

(2) 白点的横向低倍特征：（指受蚀平面垂直于白点裂纹）

白点试验的试片应在规定部位切取，以保证所取试片上确有白点，在刚材中，一般要离开端头一定距离。或用超声波探伤确定有白点的位置。表面 $\nabla 6\sim\nabla 7$ ，用热蚀或冷蚀均可。

白点在酸浸后的横向低倍试片上表现为锯齿状裂纹，或称发丝状裂纹，因此也有人称它为“发裂”（也有人误称为发纹，现在多数人不这样叫）。裂纹的两端与两壁很明显，由裂纹到正常金属是突变而不是逐渐过渡（与夹渣偏析区别）。

白点裂纹多数位于试样的心部或心部附近，靠近（锻坯）试样的表面不会有白点。由于生成条件的不同，白点有呈无位向分布的；有呈辐射状分布的；有呈同心圆状分布的；有的则沿锻造十字的偏析区分布。除此之外，钢的某些低强度区（象区域偏析），单向延伸造成的各向异性等都对白点的位置方向形状产生影响。照片 8、9、10、11、12、13 是各种白点的分布特征。

碳素钢中的白点一般较合金钢中的白点短小和不明显，它多分布于中心附近和近中心附近；而合金钢中白点多呈“环状分布”（照片 12）。

在小型锻件中，并未发现白点与偏析有什么关系。在大型锻件中，白点位于或起始于偏析区，在这个区域里富有碳、磷、硫和合金元素。由于元素的偏析使得偏析区较基体组织硬度高，所以在车光后的硬度试片上常看到许多亮点，这些斑点与偏析区及白点对应。

照片 14 是白点裂纹与偏析（点）的关系。

(3) 白点的显微组织特征

对白点裂纹的光学金相显微镜观察表明，白点裂纹呈锯齿状，裂纹多半是穿晶的，裂纹附近并不发生塑性变形，没有夹杂物和氧化脱碳现象。白点附近的金相组织与基体部分的正常组织没有什么不同。

进入七十年代以来，由于电子显微镜的大量使用，为观察白点断口的显微形貌提供了分析手段，北京钢铁研究总院，中国科学院金属研究所等单位先后对不同钢种白点的断口微观形貌进行大量的观察和分析研究，发现：无论什么

合金或处于什么状态，它们的白点形貌均为穿晶脆性断裂和沿晶脆性断裂。

我们也对 50Mn 钢锻件（淬火状态）的白点断口进行了扫描电子显微镜观察，白点区除发现有沿晶脆断外，还发现解理断口。

其主要形貌见照片 15、16、17、18。

(4) 白点的可锻合这是它与夹杂物，夹渣缺陷相区别的重要特征。由于白点是钢内部的小面积开裂，其表面未被氧化和沾染，所以只要改锻时锻造方向合适或锻比足够大，白点完全可以锻合，并且机械性能完全合格。

为使钢中白点焊合，需要一定的锻造比，不同材质，不同级别的白点，锻比也不相同，可由 1.8~7.3 不等。

#### (5) 钢的白点敏感性

白点主要产生在珠光体、珠光体—马氏体和马氏体级合金钢中，碳素钢中也产生白点；铁素体钢、奥氏体钢及莱氏体钢(例：Cr12、W18Cr4V、Cr12MoV)在生产中未发现过白点，他们被公认为，没有白点敏感性。

白点主要产生在经锻轧等热变形后的钢材中，在钢锭难得发现白点，即使有，主要是在钢锭头部。铸钢中虽然也发现白点，但较为罕见；焊接工件的熔焊金属中，偶尔也会产生白点。

在其它条件相同的情况下，钢材截面越大越容易产生白点。一般说来横断面直径或厚度小于 30mm 的钢材不易产生白点。

由于碱性炉钢比酸性炉含有较多的氢，使用碱性炉冶炼的钢比酸性炉钢容易产生白点。

目前，对钢的白点敏感性尚无确切的定义，我们现在把在相同条件下（指钢中氢含量相同，钢的截面相同、夹杂物与偏析程度相同，热处理或锻后冷却条件相同），不同钢中产生白点的难易程度定义为钢的白点敏感性。

根据有关资料和生产实践经验，我们把不同钢种白点敏感性由强到弱列于下面：

白点敏感性高的钢——34CrNi3Mo、34CrNi3W、37CrNi3Al、34CrNiMo、20Cr3Ni4A 等。

白点敏感相比较高的钢——5CrNiMo、5CrNiB、5CrMnMo、12CrNi3Mo、18CrNiBA、GCr15、GCr6、9Cr2、9Cr、9CrMoV、9Cr2W。

白点敏感性中常的钢——60CrNi、60CrMnMo、50CrNi、55Cr、50Cr、50Mn2、40CrMo、40CrNi、60CrMo、45CrNiMoV、40Cr、38CrMnMoSi、38SiMnMo、38CrMnNi、42CrMo、35CrMo、34CrMoA、35SiMn。

白点敏感性较低的钢——碳钢：60 钢、55 钢、50 钢、45 钢、40 钢、35 钢、30 钢。

30Cr、20MnMo、20Cr、20CrMo、20CrNi、20CrMn、20CrV、20MnV、20MnMoV。

低碳的 10 钢、15 钢、20 钢的白点敏感性极低。

### 3、白点在钢中的分布规律

#### (1) 白点的成因：

白点的成因目前尚无公认的理论，四十年代“白点热”时期提出的许多假说，比较有说服力的有以下几种：

分子氢假说——高温时钢中溶解有大量的氢，随着温度的降低，溶解度减小，当冷却速度较快时，氢来不及扩散至大气中，聚集在钢的显微空隙中并结合成分子状态，形成巨大的局部压力，使钢产生内部破裂——白点。

原子氢——组织应力假说：这种假说认为钢中原子状态的氢使钢变脆，组织转变先后不同形成的应力是使钢破裂的动力。

除以上两种假说之外，尚有分子氢——成分假说；甲烷假说；原子氢——容积假说；氢——甲烷——热力假说等。

我们认为下面的观点比较说明问题。即钢中原子状态的氢使钢变脆，钢在冷却时的应力使引起破裂的动力，这个应力包括有热应力、组织应力，氢结合成分子状态形成巨大的局部压力，这些应力可能是共同作用、也可能是单独起作用。

无论那种假说，都与钢中氢有关。实践证明，氢含量低于 2.5ml/100 克钢，便不再产生白点，因此，必须设法降低钢中的氢含量，其中，使氢从钢中逸出是很重要的环节。

#### (2) 白点在钢中的分布规律

鉴于白点的形成与氢的逸出和材料的变形方向有关。白点在钢中分布有以下几种特点：

a)、白点的出现往往具有批量特性，即相同冶炼炉次，相同处理工艺，相同锻件和段后冷却工艺，往往都会出现白点。

b)、白点容易出现在大截面部分。

c)、由于氢的扩散外逸，靠近锻坯端头及表面不会产生白点（经机加工后白点暴露至表面的情况例外）。

概括起来，白点在钢中的分布大体有以下几种形式：（为清晰起见，剖面线省去）

有时因特殊的冷却条件白点也可能分布在工件的长度的一半上或在圆形截面的半圆上，但比较罕见。（见下图）

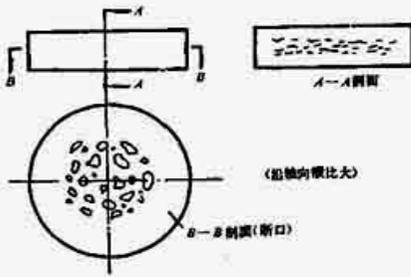


图 7-3 圆饼形锻件中白点的分布

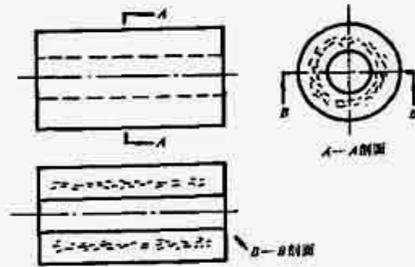


图 7-4 厚壁管形锻件中白点分布形式之一

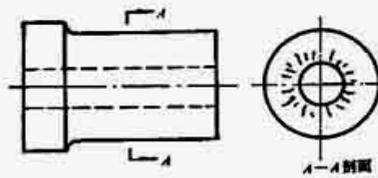


图 7-5 厚壁管形锻件中白点分布形式之二

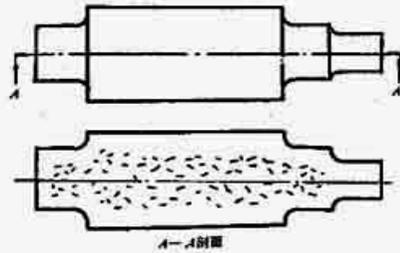


图 7-6 轴类锻件中白点分布形式之一

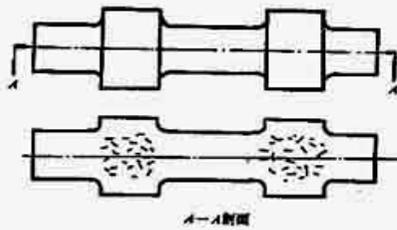


图 7-7 轴类锻件中白点分布形式之二

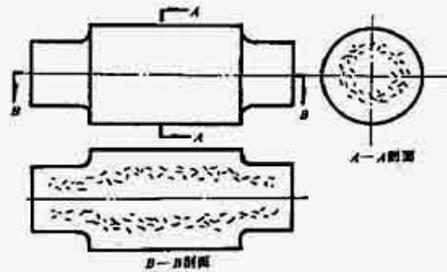


图 7-8 轴类锻件中白点分布形式之三

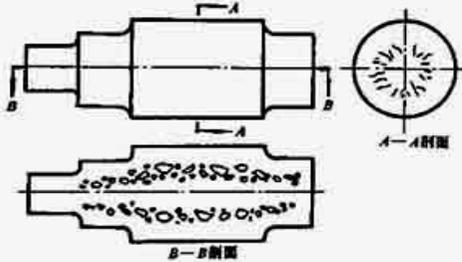


图 7-9 轴类锻件中白点分布形式之四

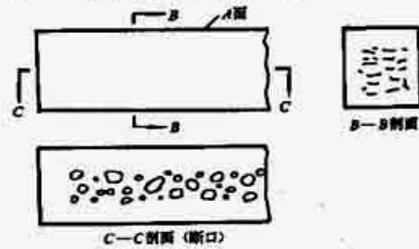


图 7-10 长条形方截面锻件中白点的分布

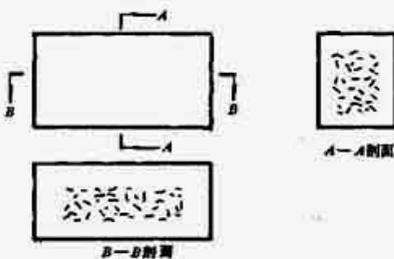


图 7-11 方形锻件白点的分布形式之一

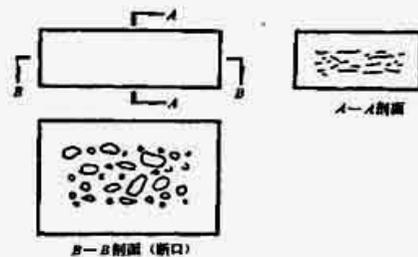


图 7-12 方形锻件白点的分布形式之二(单方向锻比大)

### (1) 超声波探伤法:

根据多次反射底波多少,掌握白点在钢中的分布特征,便比较容易对白点进行判断,照片 19。

### (2) 富利试剂检验法:取样方法与低倍相同,它可以区分是白点还是疏松。

配方:盐酸 1000ml、水 1000ml、CuCl<sub>2</sub>100 克。

操作:用脱脂棉蘸取富利试剂溶液在试样表面擦拭 10~40 分钟,然后用无水乙醇洗去铜的沉淀。

### (3) 磁粉探伤

注意磁力线与白点裂纹垂直。照片 20。

### (4) 金相显微镜与电子显微镜检验。

照片 21 是有白点的 45 钢瓦座在淬火过程中开裂的断口,中心银白色区域除小白点外,还有大面积区,颜色与白点相同,为鉴别是否白点,做了扫描电镜观察,发现该区域以解理为主,有准解理和微裂纹,它与白点区断口形态相同,照片 22。

## 二、钢中裂纹

### 1、 铸钢中的裂纹

热裂——热裂是铸钢件,特别是合金铸钢件生产中常见的铸造缺陷之一,热裂是在高温下形成的,所以裂口表面往往被氧化呈氧化色。热裂又是沿晶粒边界产生和发展的。故裂口外形曲折而不规则(照片 23)。热裂又分外裂与内裂两种,照片 24 就是内裂的例子。

关于热裂的形成机理,多年来主要有两种理论流行,一种是强度理论,他认为铸件在凝固末期,当结晶骨架已形成并开始线性收缩后,由于受阻产生应力,这时钢的高温强度很低,塑性很差,当应力超过强度时便产生裂纹。

另一种理论叫液膜理论,它认为铸件在凝固过程中必然要经过一个“液膜”期,即低熔点的成分在晶粒间形成一层膜,当铸件收缩受阻时,液膜被拉断形成热裂纹。

1981 年第 6 卷第 1 号国际铸造金属杂志(International Cast Metals Journal) Dr——Eng. kigoshi Kita 发表了他用扫描电子显微镜研究铸钢热裂的成果,研究发现, MnS 液膜对形成热裂起非常重要的作用。观察表明,在热裂纹与基体金属相连接的微观区域内 S 和 Mn 元素较高,而在裂纹的中心区则富集有大量的 MnO 和 MnO·SiO<sub>2</sub>(照片 25)。

冷裂——它是在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。冷裂纹的特征与热裂纹不同,外形是圆滑直线或连续直线状,往往是穿

晶断裂，断口表面干净，具有金属光泽或有轻微的氧化色。

冷裂有外表可见的与外表不可见的内冷裂两种。前者多是在拉应力大的部位或铸件应力集中的薄弱部位；后者则产生在大型铸件（特别是合金钢铸件）中，它主要是由于冷却时的热应力造成的。内裂在圆柱形铸造截面上多系横向内裂。照片 26 是铸钢 80CrMo 轧辊内冷裂的横向断口。

## 2、 钢的热处理裂纹

### (1) 钢的淬火应力与残余应力

热应力——它是热处理过程中，钢件的表面和中心或薄的地方与厚的地方之间，由于加热或冷却速度的不一致(形成温差)导致体积胀缩不均匀产生的应力。

组织应力——由于相变引起的比容变化的不等时性所产生的内应力。

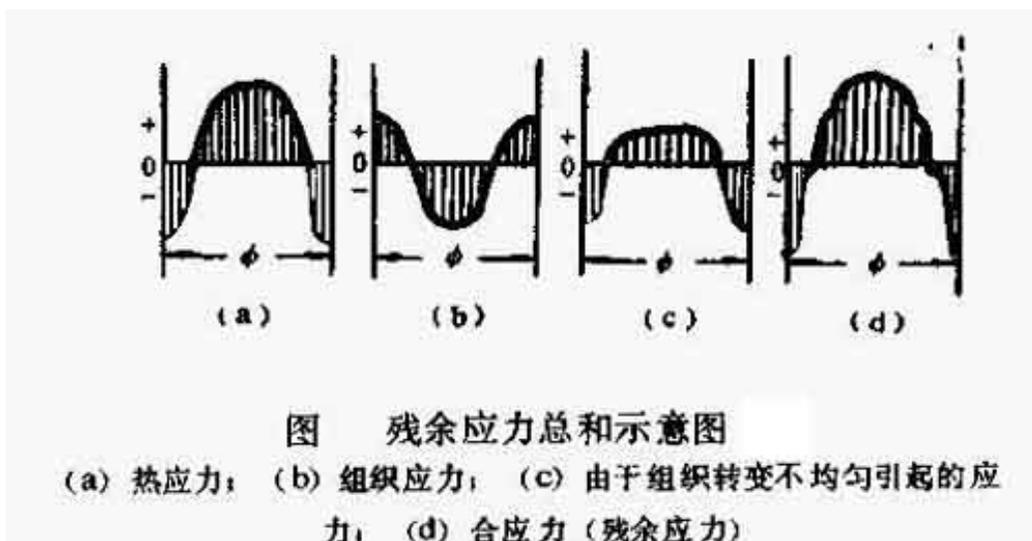
马氏体比容： $0.1271+0.0025(\%C)$  厘米<sup>3</sup>/克

奥氏体比容： $0.1212+0.0035(\%C)$  厘米<sup>3</sup>/克

大型工件截面上组织不同产生的应力——大型工件不易淬透，表面一层为马氏体（贝氏体），心部则是珠光体（铁素体+渗碳体）。

（铁素体+渗碳体）比容： $0.1271+0.0005(\%C)$

淬火残余应力——热处理只要伴随有相变过程，热应力和组织应力将同时发生。钢的最终残余应力取决于各种应力作用之和，残余应力一般都比较复杂，用图表示之。



### (2) 钢的热处理裂纹的形态

钢的热处理裂纹主要有纵向裂纹，它是由于组织应力引起的开裂多从表面往里裂，裂纹平直，有时贯穿整个工件。纵向裂纹产生在淬透性好的合金钢

中小锻件（零件），见照片 27、28。

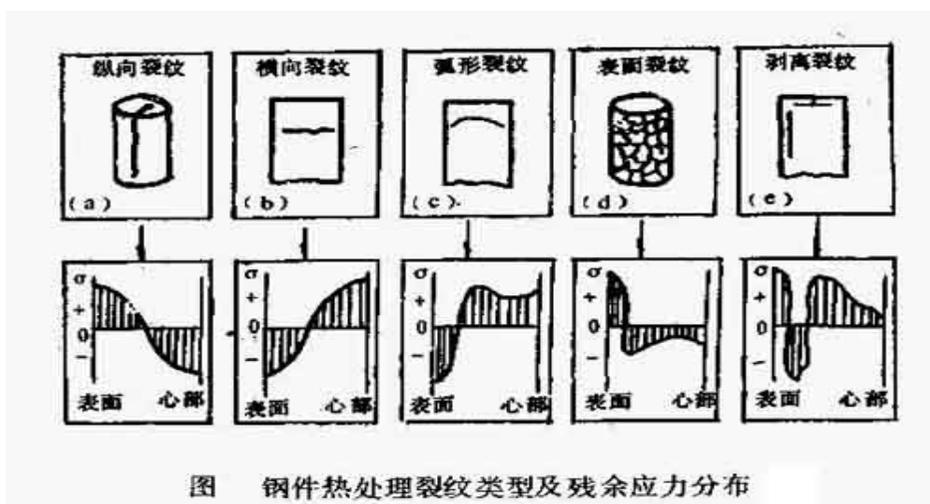
纵向裂纹，多产生在大截面的零件中，它是大型工件在淬不透的情况下由心部较大的拉应力引起的内部开裂。它的纵向低倍特征是裂纹垂直于轴线，一般不延伸到表面（离表面一般 30~40 毫米）。其横向断口特征是裂痕从中心附近开始，向外呈辐射状，辐射状裂痕一般不延伸到表面。（见照片 29、30）

弧形裂纹——它往往出现在工件未淬透或渗碳淬火的工件上。裂纹多出现在表面一定深度的拉应力峰值区。它易于出现在工件棱角处，它处于三向拉应力作用。弧形裂纹有时在内部，有时也会伸到边缘成为刷边。

表面裂纹——它是分布在金属表面深度不大的裂纹，产生这种裂纹的原因主要是在材料的表面或近表面产生拉应力，并且表面层的金属材料塑性又很差引起的。表面裂纹的分布形态与工件形状无关而与表面裂纹的深度有关。

照片 31、32 就是淬火引起的表面裂纹的形态，磨削裂纹也是表面裂纹，但其形态不同，照片 33。

剥离裂纹——表面淬火工件淬硬层的剥落或者化学热处理后沿扩散层的剥落均属于剥离裂纹。剥离裂纹严重时可使工件掉皮，这是因为表皮下面有较大的拉应力引起的。有剥离裂纹的工件在受力时（挤压应力）容易产生表面裂纹甚至剥落。金相显微镜观察发现，剥离裂纹的走向基本平行于表面，照片 34。

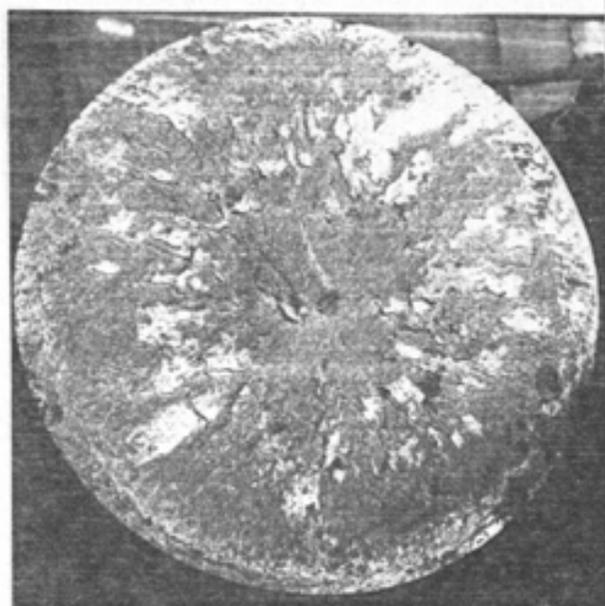


参考文献（略）



访问我们的官方网站了解更多内容

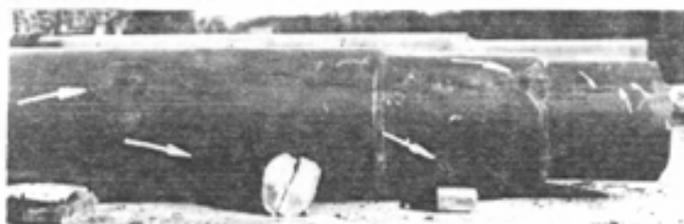
扫描二维码关注



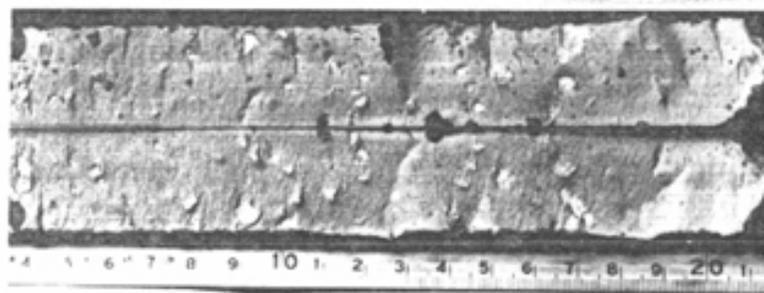
照片1. 白点引起的中800mm  
大型轧辊的断口



照片2. 白点引起的大齿轮  
淬火开裂



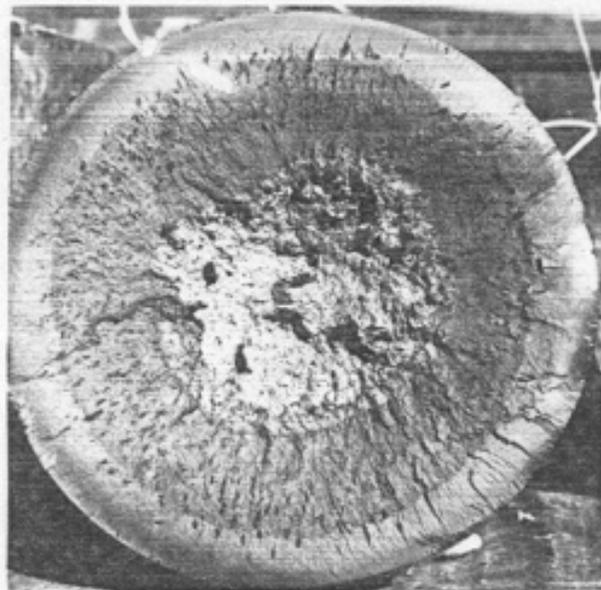
↑ 照片3. 白点引起的捲筒  
轴淬火开裂



← 照片4. 38SiMnMo大齿轮  
白点断口

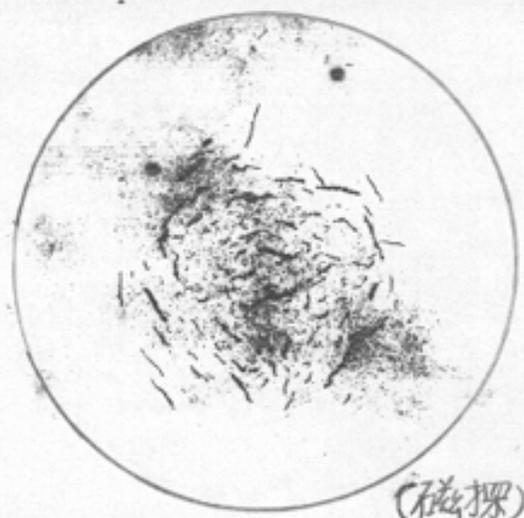


照片5. 50Mn2齿轴淬火时纵向开裂的断口(白点)



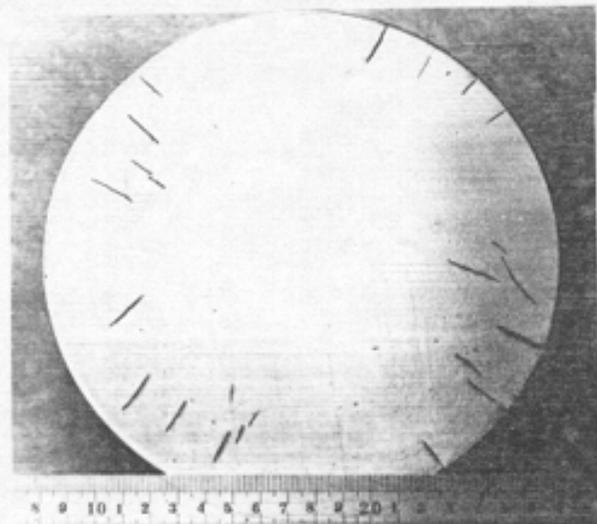
↑ 照片7.“鸭嘴形”的白点

← 照片6. 开裂金属于白点时的情况

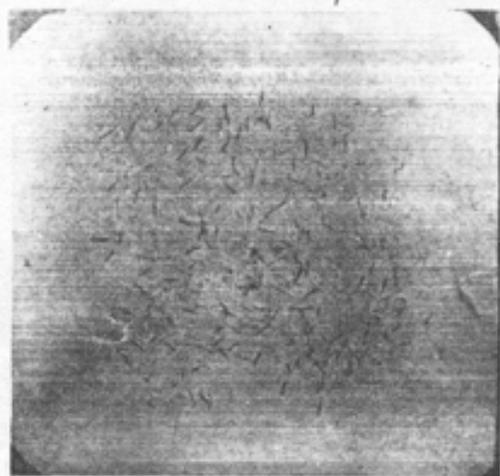


(磁探)

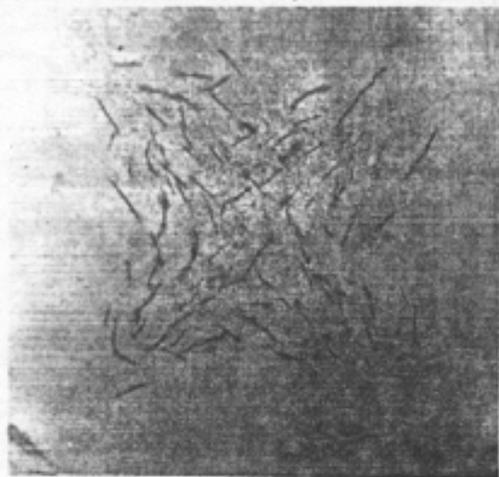
照片8. 呈同心圆状分布的白点



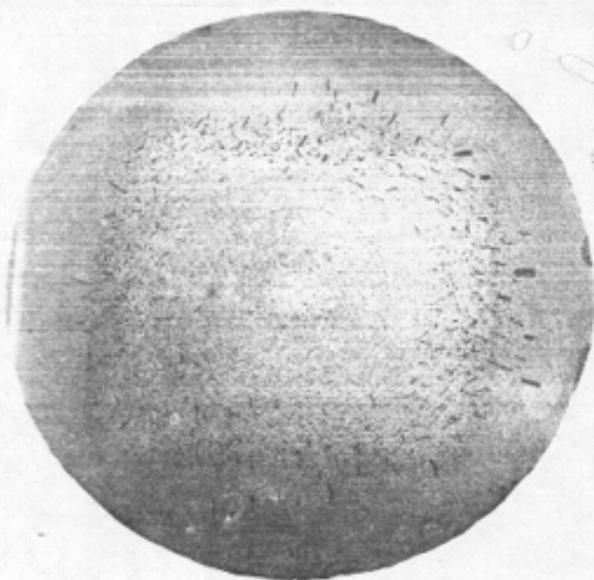
照片9. 呈辐射状分布的白点(磁探)



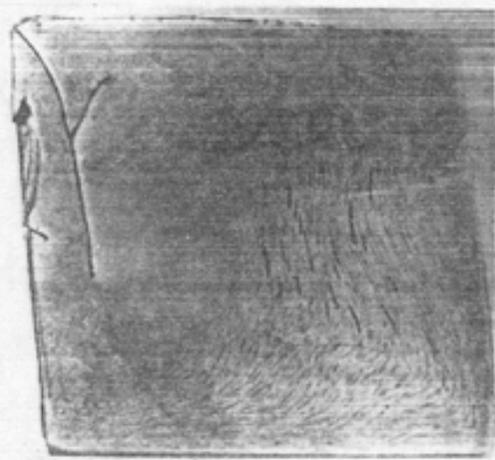
照片10. 呈无位向分布的白点



照片11. 沿锻造十字分布的白点



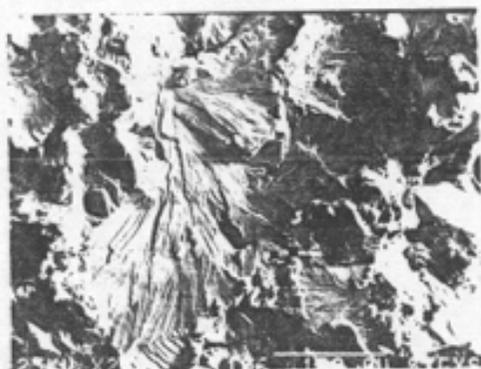
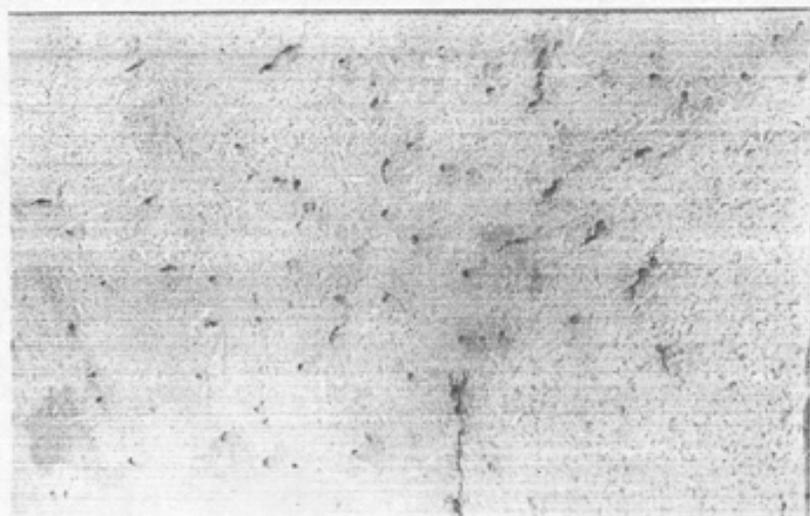
照片12. 沿框形偏析分布的白点



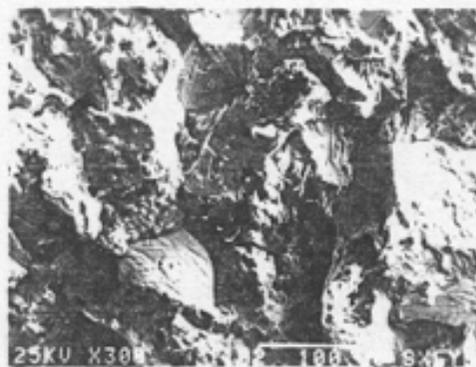
照片13. 沿金属流线分布的白点

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24

照片14. 白点裂纹  
与偏析(点状)  
的关系



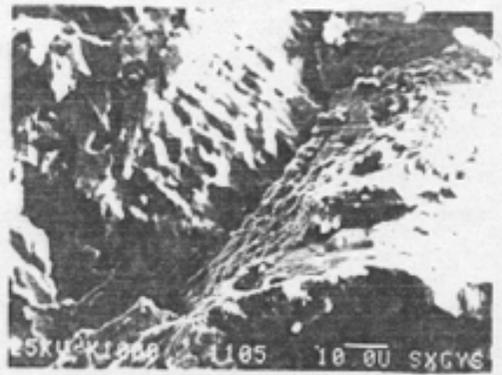
照片15. 白点断口的微观形貌  
——解理断口 SEM 130X



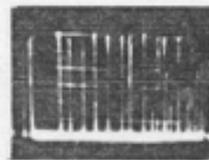
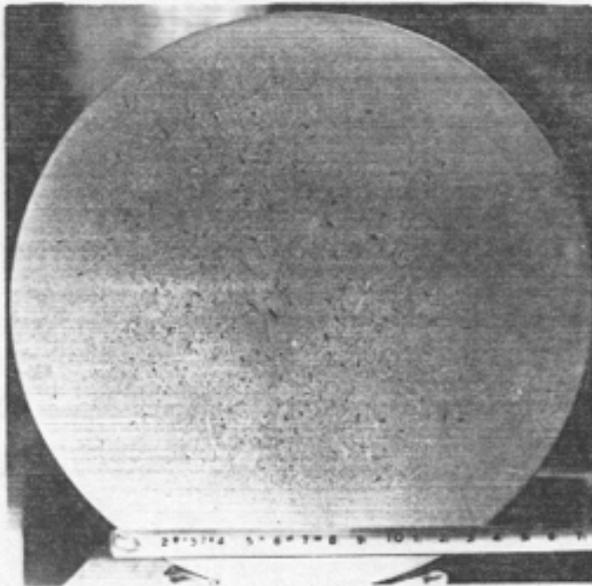
照片16. 白点断口的微观形貌  
——沿晶断口 SEM 150X



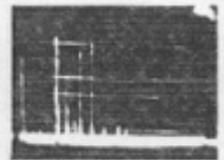
照片17. 白点断口的微观形貌—准解理 TEM 4000X



↑ 照片18. 白点断口的微观形貌  
——沿晶液纹状 SEM 500X



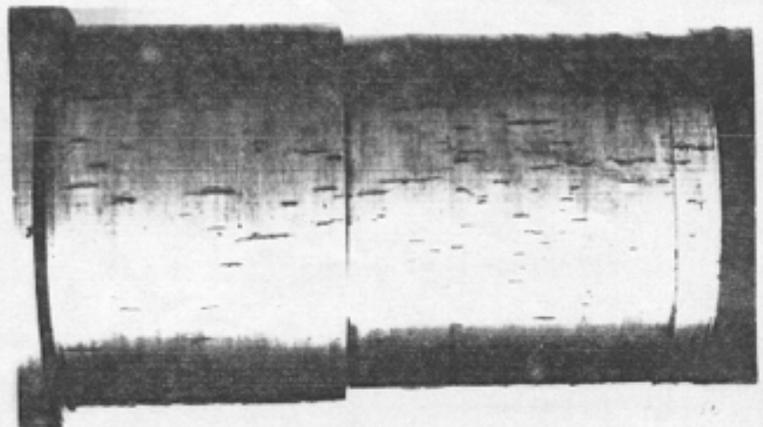
无白点部位

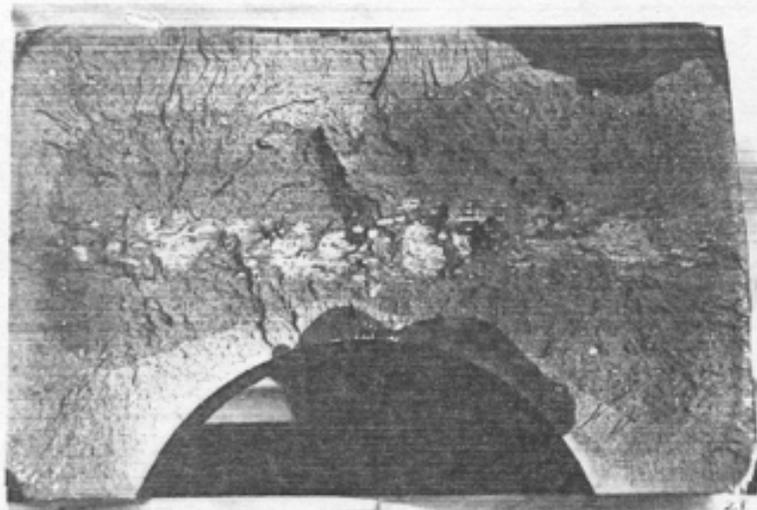


有白点部位

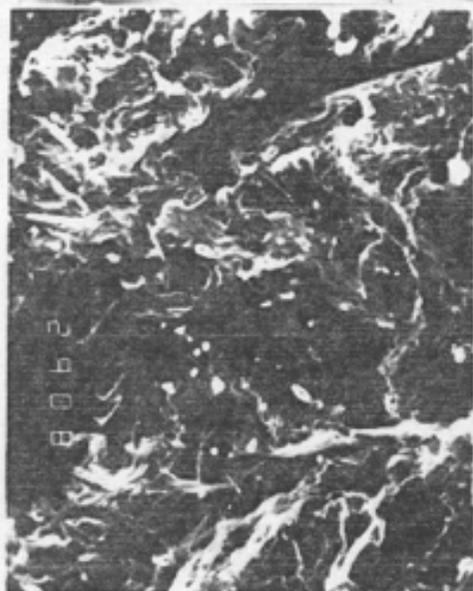
← ↑ 照片19 碳素钢中的白点及  
超声波探伤波形

照片20. 暴露表面的  
白点裂纹的磁粉  
痕迹 →





← 照片21  
45钢瓦座淬裂  
断口上的白点  
比例：1:4

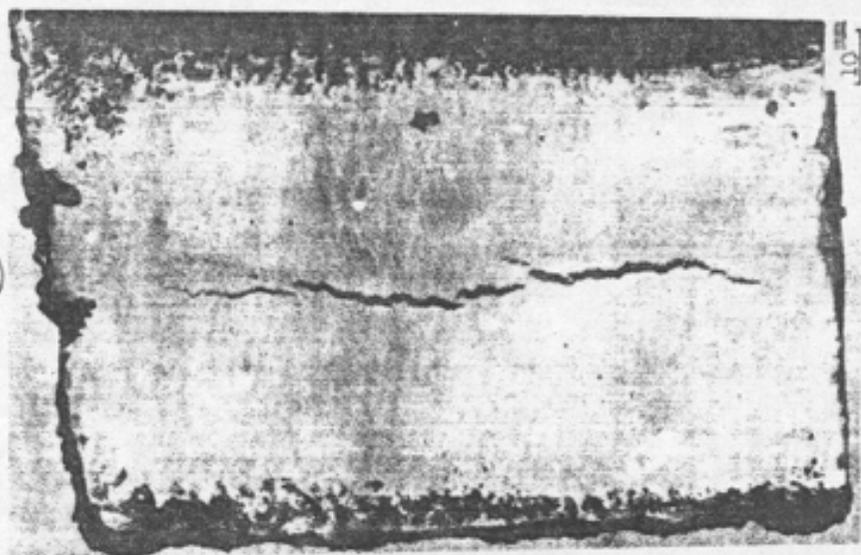


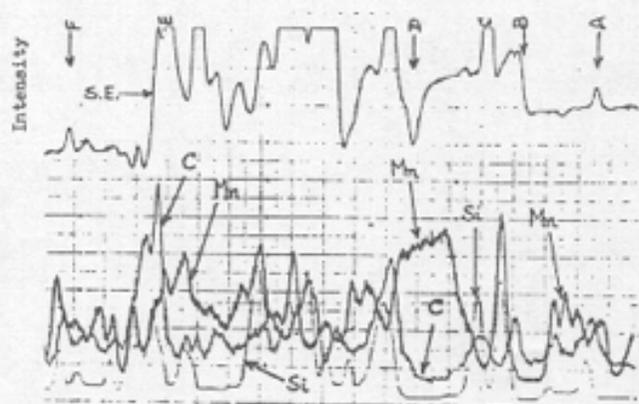
← 照片22. 上图中心银白色区域断口形貌 100X SEM



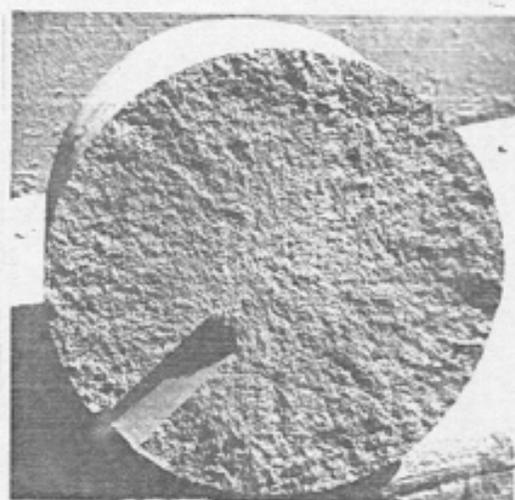
照片23. 铸钢40Cr中的热裂纹(磁探)

照片24 →  
铸钢中的内  
部热裂(磁探)  
0.8X





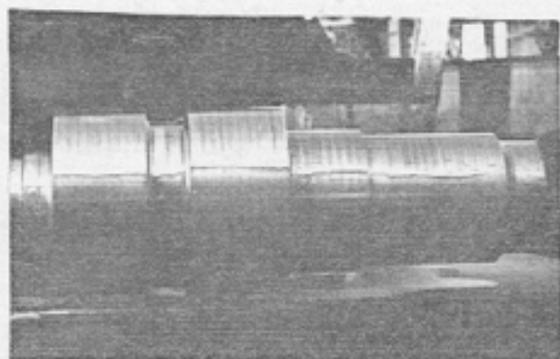
照片25. 热裂纹周围的成分谱线



照片26. Zr80Cr10 轧辊内冷裂横向断面



照片27. 热处理淬火时的纵向裂纹  
(磁探)

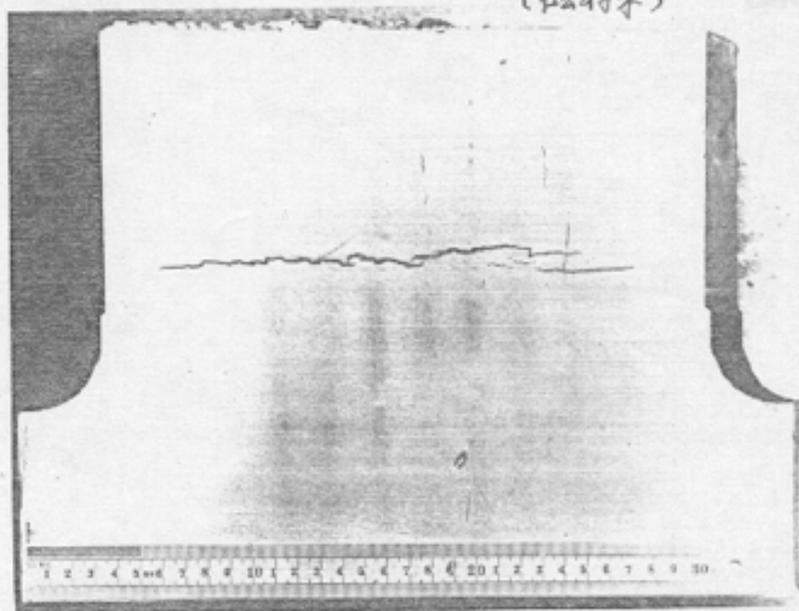


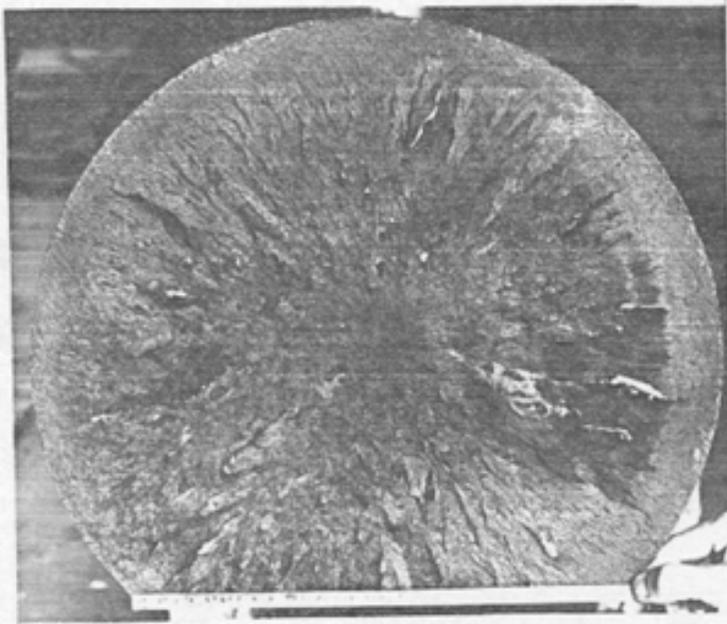
照片28 热处理淬火时的纵向裂纹  
(磁探)

照片29 →

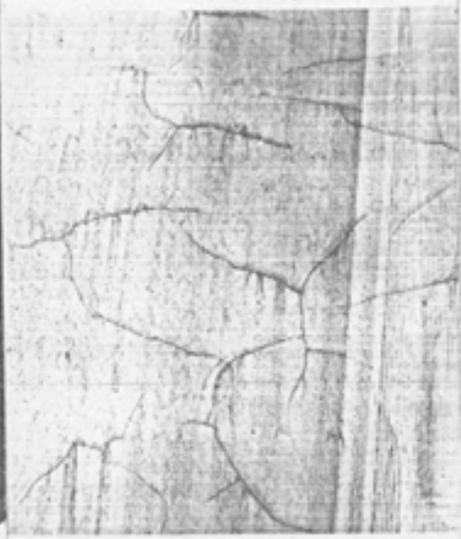
大型工件热处理  
过程中产生的横向  
内裂纹(磁探)

1:3.5

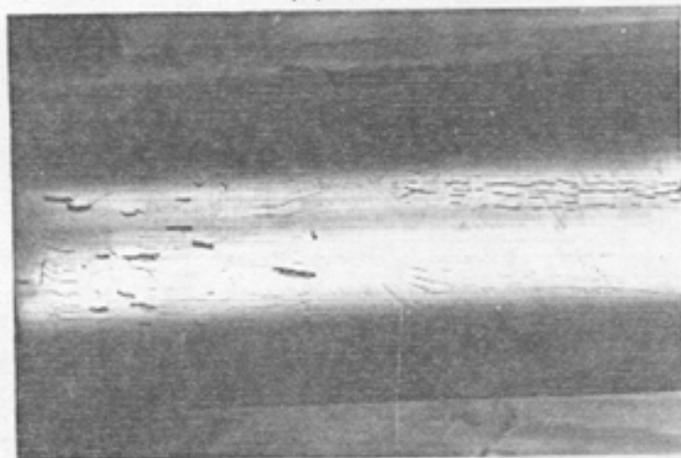




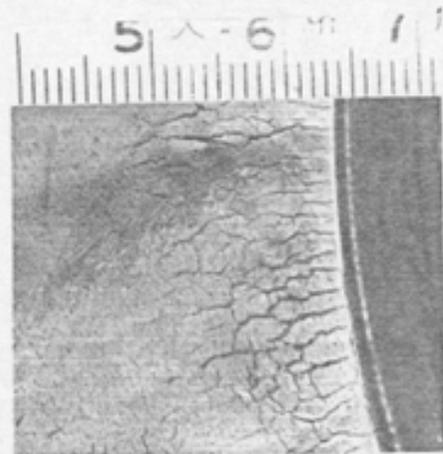
照片30. 大型工件横向内裂纹断口



照片31. 水-空间酸淬火不当引起的表面裂纹(磁探)



照片32. 火焰淬火接头处的表面裂纹(磁探)



照片33. 磨削裂纹(磁探)

照片34 →

剥离裂纹的金相显微形态(上面是工件表面,裂纹在过渡层中拐弯)

