

# 金属材料学

Metal Material and Heat Treatment

主讲教师：曾燕屏

# 第五章 工具钢

## 一、工作条件对工具钢性能的要求

- 工业生产中使用最多的工具是刀具、量具和模具等。
- 工具钢按其用途可分为刀具钢、量具钢和模具钢。

- 对于刀具材料

- ✓ 在切削过程中受到弯曲、剪切、冲击、扭转、振动、摩擦等力的作用；
- ✓ 刀刃温度可能升到 $600^{\circ}\text{C}$ 甚至更高；
- ✓ 要求刀具具有高的硬度和耐磨性，适当的韧性和塑性，有时还要求在高温具有高硬度，通常称为红硬性或热硬性。

- 对于模具材料

- ✓ 根据工作状态可分为热作模具钢、冷作模具钢和塑料模具钢。

- ✓ 热作模具钢要求在高温下具有高强度和高硬度、良好的抗热疲劳性(耐急冷急热性)和足够的韧性。

- ✓ 冷作模具钢要求具有高强度、高硬度、高耐磨性和足够的韧性。

- 对于量具材料

- ✓ 要求具有较高的硬度和耐磨性；
- ✓ 一定的强度和韧性；
- ✓ 较高的尺寸稳定性；

## 二、碳素及低合金工具钢

- 碳素工具钢是指含碳在0.65~1.35%的碳钢；
- 主要钢号为T7~T13；
- 淬火并低温回火后的硬度可达HRC58~64；
- 可做低速切削的刀具和简单的冷冲模；
- 成本低，加工性能好，热处理简单；
- 淬透性差，淬火时易变形开裂，工作温度低于200℃。

- 低合金工具钢是在碳素工具钢的基础上加入总量在3%以下的合金元素制得的；
- 常用钢号有Cr2、9Mn2V、9CrSi、CrWMn、CrMn等；
- 可做刀具和量具；
- 工作温度在250℃以下。



合金元素在低合金工具钢中的作用是：

- ① 增大淬透性，为此加入Mn、Cr、Si、Ni、V(一般V和Mn同时加入)；
- ② 增大耐磨性，为此加入V、W、Cr、Mn等；
- ③ 增大抗回火软化的能力，为此加入Si；
- ④ 减少淬火变形，为此增Si减Cr；
- ⑤ 细化奥氏体晶粒，提高韧性，为此加入V、W、Mn、Cr。

### 三、高速钢

- 是适于高速切削的工具钢。
- 在适当淬火、回火后的硬度，一般高于HRC63，高的可达HRC68~70。
- 在600℃左右，仍保持HRC63~65的高硬度。
- 根据钢中主要合金元素的不同，高速钢可分为钨系、钼系和钨钼系三类。
- 钨系的W18Cr4V和钨钼系的W6Mo5Cr4V2应用最普遍。

# 1. 高速钢中的合金相

表5-1 高速钢的成分范围(wt%)

合金元素	C	W	Mo	Cr	V	Co	其它
含 量	0.60~1.60	1.5~20	0.5~10	约4	1~5	0~12	0~2

- 高速钢在平衡状态下的组成相是合金铁素体和合金碳化物。
- 高速钢中的合金碳化物有： $MC$ 、 $M_2C$ 、 $M_6C$ 和 $M_{23}C_6$ 等多种类型。
  - ✓  $MC$ 是以钒为主的碳化物 $VC$ ，其中能溶解少量的钨、钼、铬等元素；

✓  $M_2C$ 和 $M_6C$ 是以钨或钼为主的碳化物  
 $Mo_2C$  或  $W_2C$  、  $Fe_2W_4C$ - $Fe_4W_2C$  或  
 $Fe_2Mo_4C$ - $Fe_4Mo_2C$  、  $Fe_2(W, Mo)_4C$ -  
 $Fe_4(W, Mo)_2C$ , 其中也能溶解一定量的  
铬、钒、钴等元素;

✓  $M_{23}C_6$ 是以铬为主的碳化物 $Cr_{23}C_6$ ,  
其中也能溶解少量的钨、钼、铁等元素。

## 2. 高速钢的铸态组织

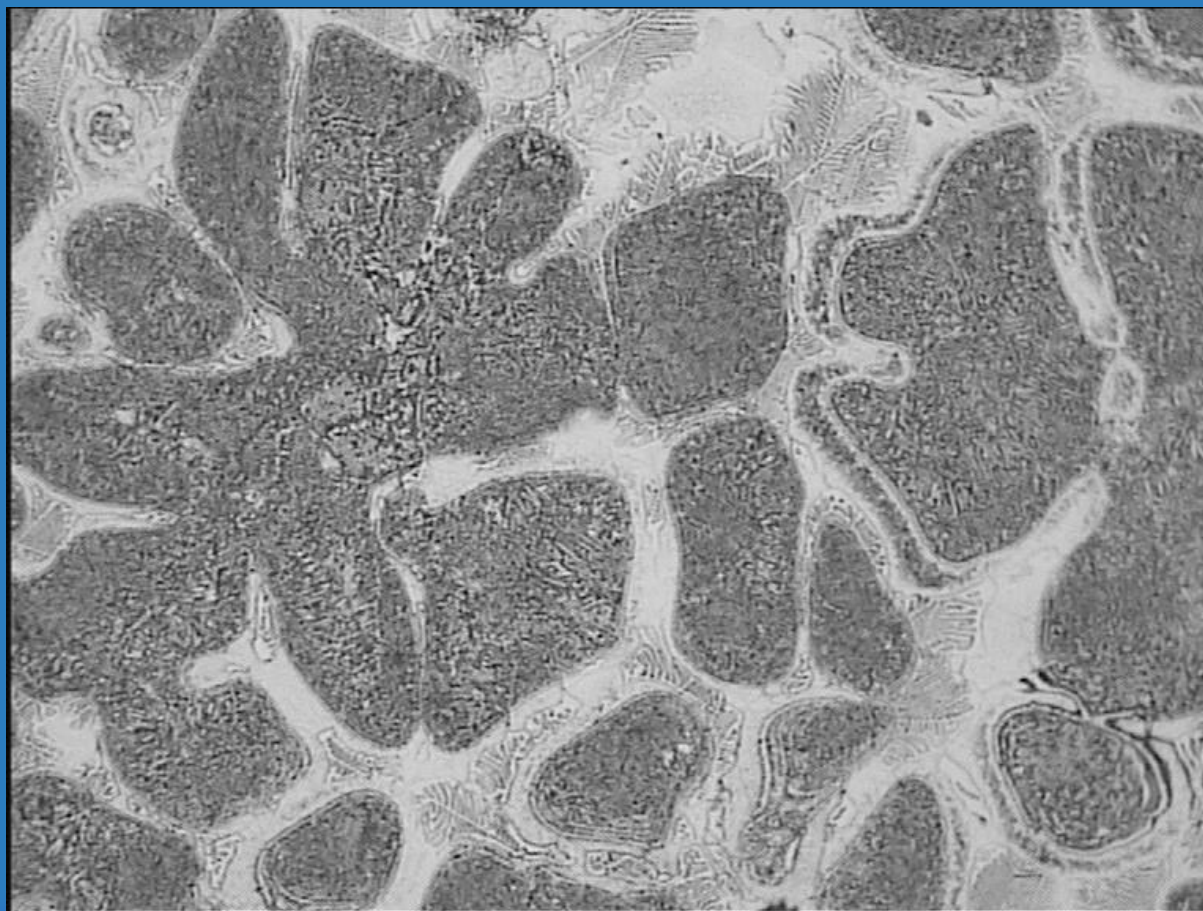


图5-1 W18Cr4V钢的铸态组织

● 高速钢的铸态组织以粗大的共晶莱氏体网和黑色组织为主要特征。

✓ 共晶莱氏体的组成相是奥氏体和碳化物(应含MC和 $M_6C$ )。

✓ 碳化物呈鱼骨状分布，骨络之间为共晶 $\gamma$ 相。

✓ 黑色组织是由 $\delta$ 相共析分解形成 $\gamma+M_6C$ ，随后 $\gamma$ 相再次发生共析转变而形成的。

✓ 其组织特征为片状珠光体型，由于在低倍显微镜下不易分辨清楚其片层，呈黑色，故常称为黑色组织。

### 3. 高速钢的碳化物不均匀性及其改善方法

- 铸态高速钢中存在大量鱼骨状共晶碳化物，它呈不均匀的网状分布，严重损害了钢的性能。
- 锻压或轧制可以碎化共晶碳化物，但碎化后的碳化物颗粒又可能沿加工方向排列成带状，或呈变形的网络，或成堆分布。
- 这种组织的刀具或钢材，其强度和韧性都大大降低，且各向异性，因而刀具寿命短，经常因崩刃而报废。





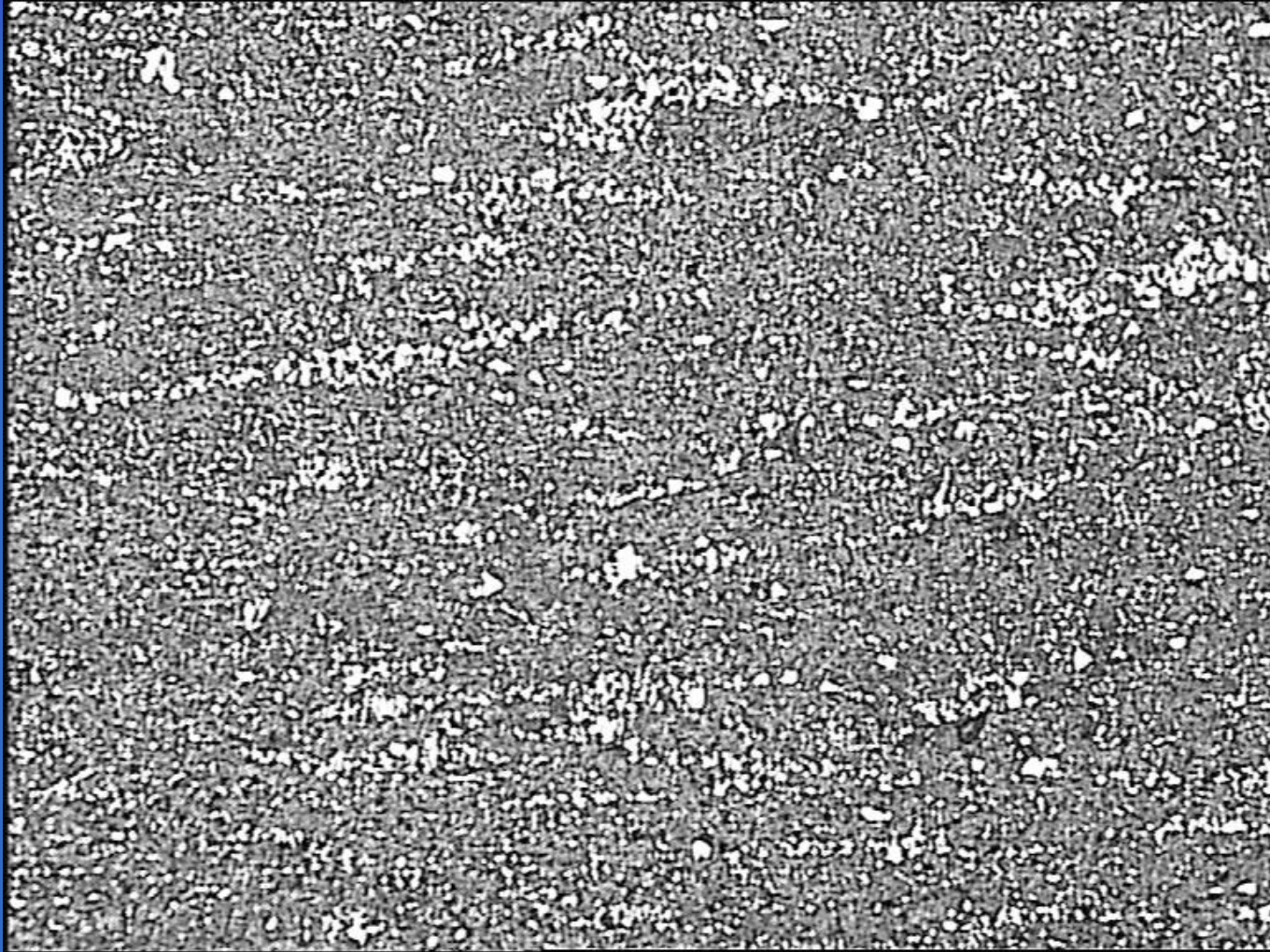


图5-2 W18Cr4V钢中出现的带状组织

## 改善高速钢碳化物不均匀性的措施：

- ① 采用200-300kg小锭型或630kg扁锭，加快钢液凝固，减轻结晶时产生的宏观偏析，细化共晶莱氏体组织；
- ② 增大锻压比，反复拉拔和镦粗；
- ③ 对于大尺寸钢材，可采用电渣重熔细化共晶莱氏体组织。

## 4. 高速钢的热处理

### (1) 退火

- 高速钢的 $A_{C1}$ 在820-860℃之间；
- 退火温度一般采用870~880℃；
- 保温2-3小时；
- 以 $\leq 30^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的冷速冷到600℃出炉空冷；
- 退火后的组织：索氏体+碳化物。





图5-3 W18Cr4V钢的退火组织

## (2) 淬火

- 分级预热：一次预热在 $800-850^{\circ}\text{C}$ ，两次预热分别在 $500-600^{\circ}\text{C}$ 及 $800-850^{\circ}\text{C}$ ，预热时间应比加热时间长一倍。
- 淬火加热温度的选择原则是：在奥氏体晶粒不长大的前提下，淬火加热温度尽可能高。
  - ✓  $\text{W18Cr4V}$ 的淬火加热温度一般为 $1260-1310^{\circ}\text{C}$ ，常取 $1280\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
  - ✓  $\text{W6Mo5Cr4V2}$ 的淬火加热温度一般为 $1210-1245^{\circ}\text{C}$ ，常取 $1230\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

- 为防止刃部脱碳和过热，采取在高温盐浴炉内保温。
- 冷却剂用油，冷到300℃后出油空冷。
- 为了减少工件变形，亦可采用分级淬火：
  - ✓ 一次分级温度一般为580-620℃；
  - ✓ 两次或多次分级温度可选800-820℃，580-620℃及350-400℃等。
- 淬火后的组织为：马氏体(约占70%)+残余奥氏体(约占20%)+未溶碳化物(约占10%)。

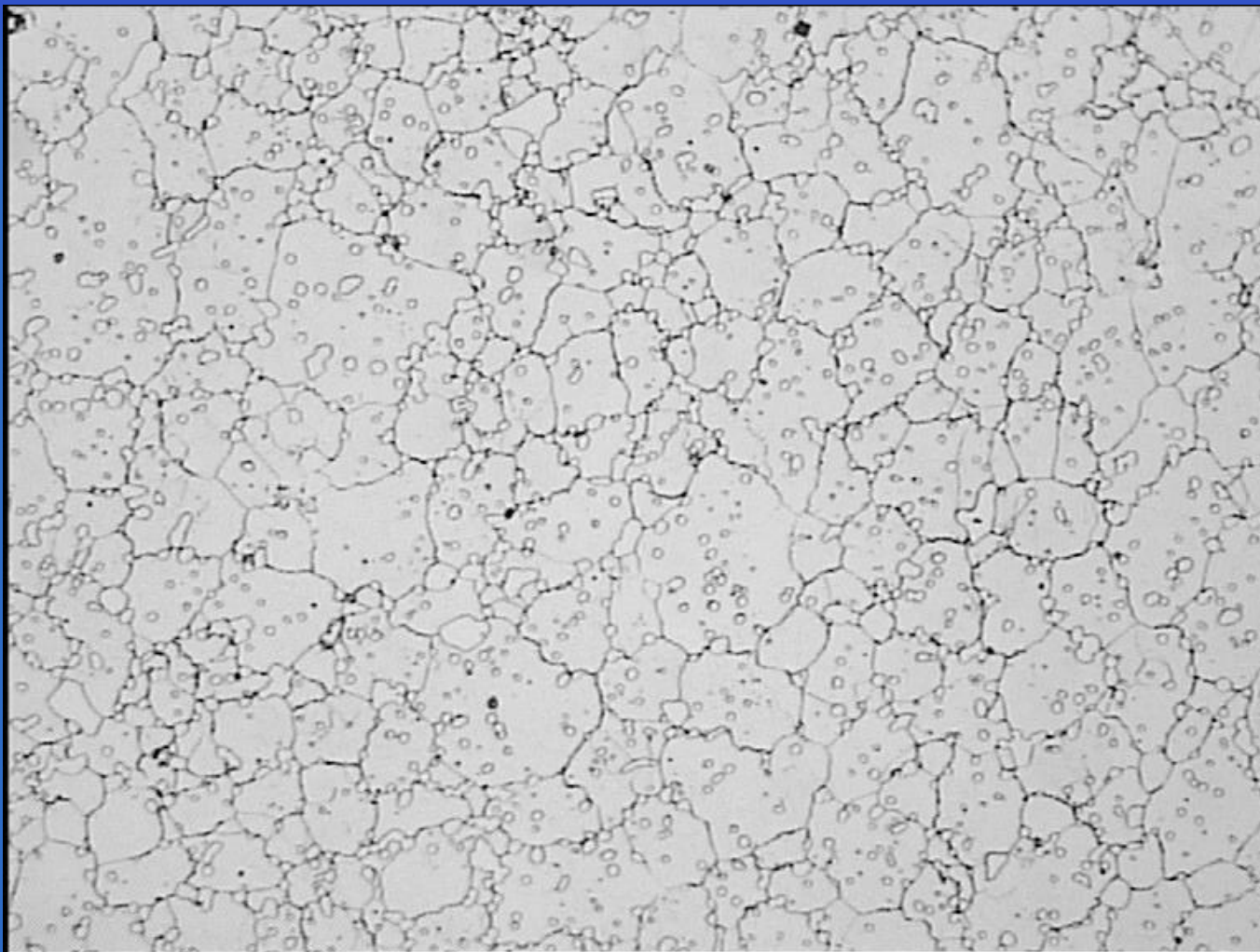


图5-4 W18Cr4V钢的淬火组织



### (3) 回火

- 高速钢淬火后，必须立即进行适当回火，才能获得最好的红硬性。
- 在400℃以下温度回火时，仅从马氏体中析出少量合金渗碳体 $M_3C$ ；
- 400-500℃回火时，从马氏体中析出铬的碳化物，硬度回升；
- 500-600℃回火时，马氏体中钨和钒的含量显著下降，析出弥散分布的钨(钼)、钒碳化物( $M_2C$ 、 $MC$ )；



- 在550-570℃回火后，钢的硬度达到最高值，通常称为“二次硬化”现象。
- 此时基体中仍含有过饱和的碳、钨(钼)、钒和铬，有很高的抗回火能力。
- 当回火温度继续升高，不仅已析出的碳化物将聚集长大，而且还发生碳化物类型的转化：
  - ✓ 在675℃以上回火时， $M_2C$ 溶解，同时从固溶体中析出 $M_6C$ 和 $M_7C_3$ ；
  - ✓ 随后 $M_7C_3$ 又转化为 $M_{23}C_6$ 。

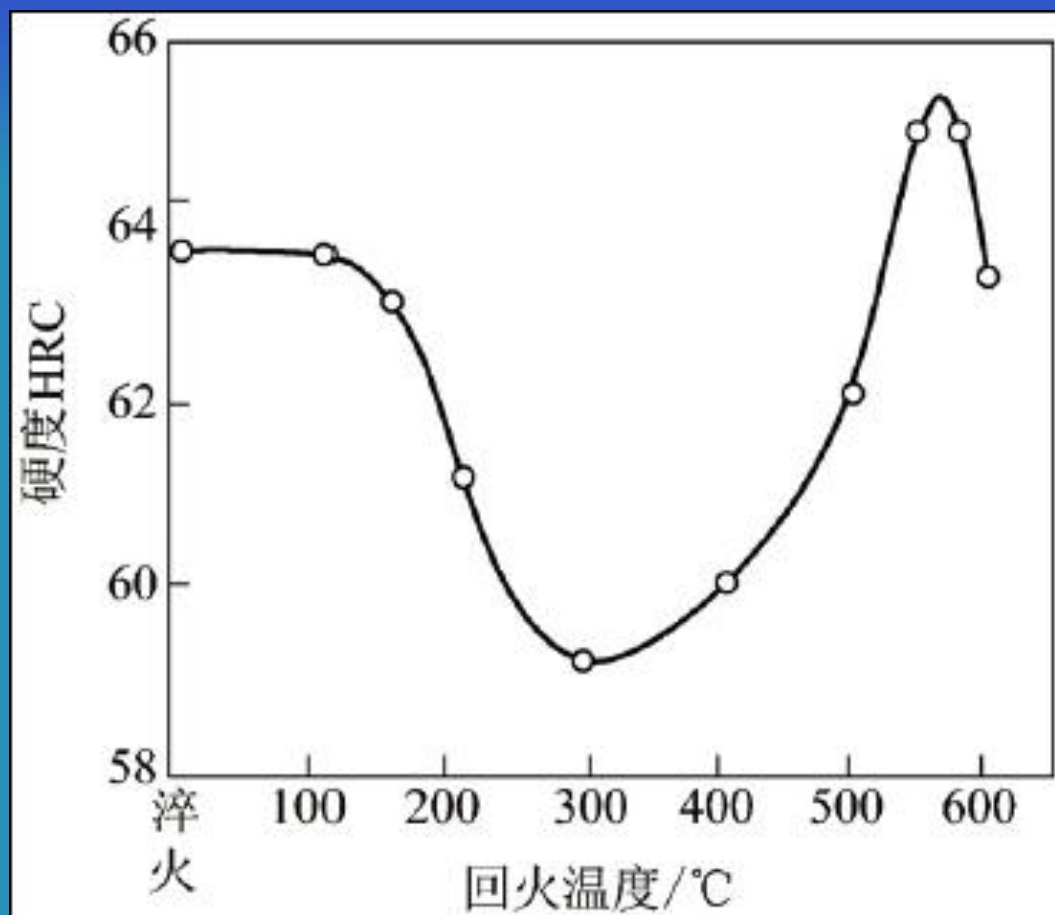
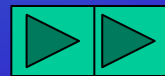


图5-5 W18Cr4V钢回火时硬度的变化  
(1280°C淬火)

- 淬火后残余奥氏体合金度高、稳定性大，在较低温度回火时不发生转变；
- 在500-600℃回火时，从残余奥氏体中析出合金碳化物，使残余奥氏体的合金度降低，马氏体转变温度升高，在冷却到低温时，部分残余奥氏体转变为马氏体，钢的硬度略有增大，称为“二次淬火”。
- 但一次回火并不能完全消除残余奥氏体，通常需2~3次甚至4次回火，才能使之减少到最低限度。
- 高速钢的回火工艺为：在560℃回火1小时，空冷至室温；然后再重复2~3次，每次都必须空冷至室温。
- 回火后的显微组织为：回火马氏体+碳化物。



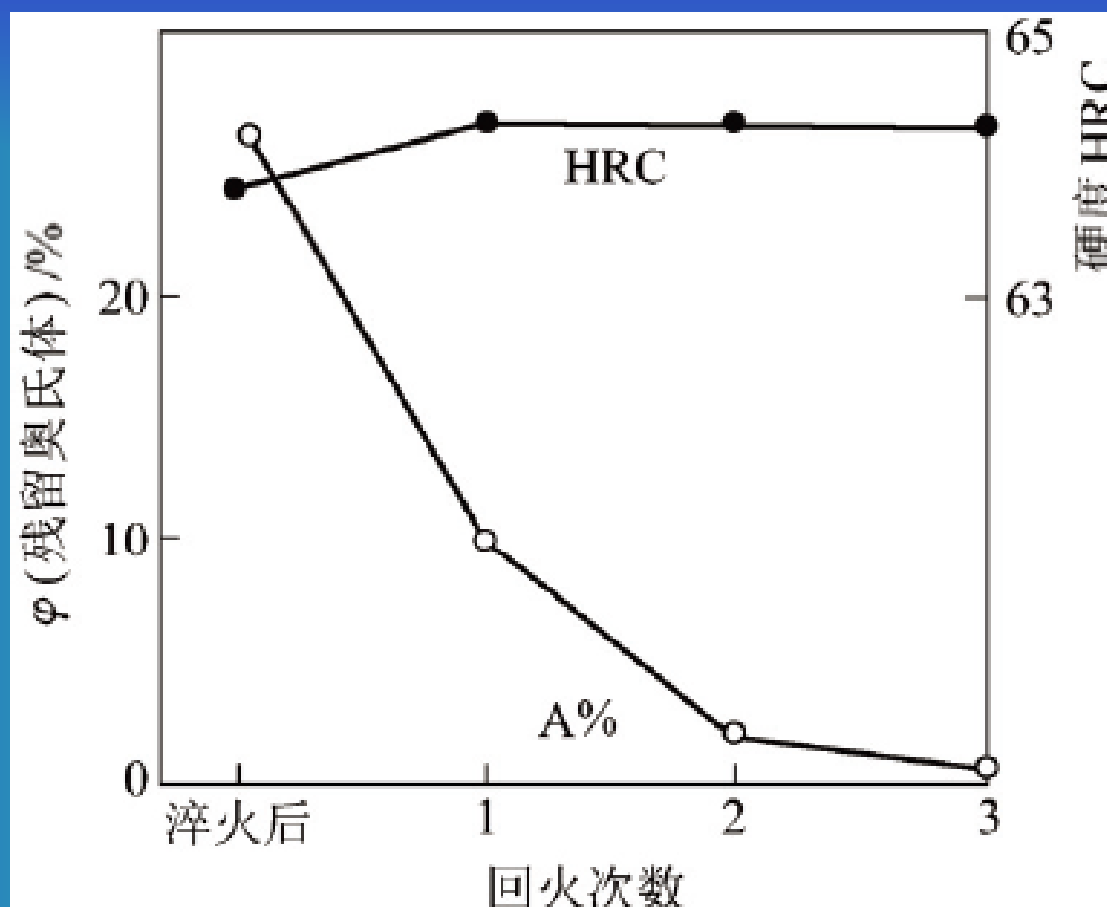


图5-5 W18Cr4V钢回火次数与残余奥氏体量的关系



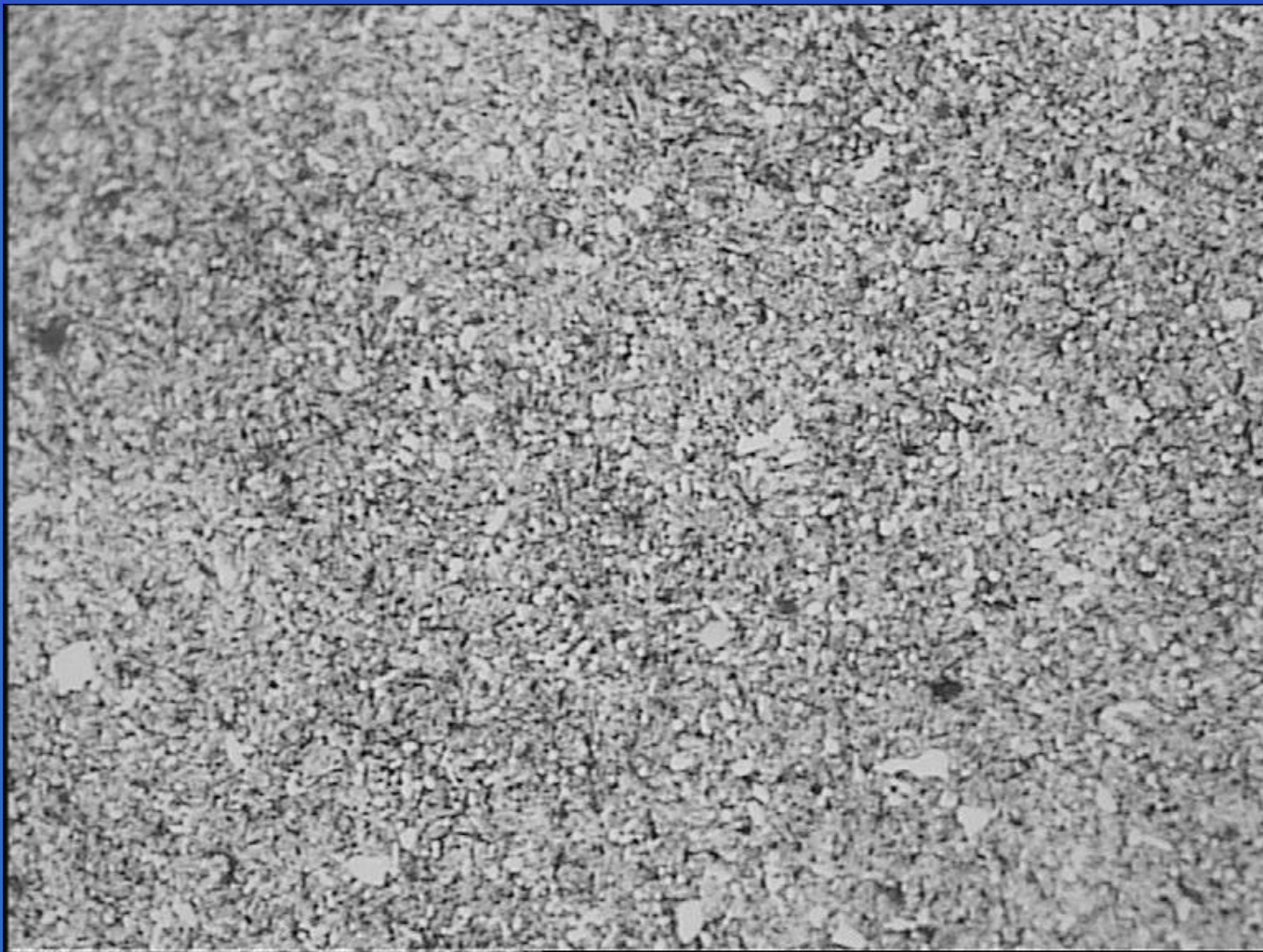


图5-4 W18Cr4V钢的回火组织

## 5. 高速钢中合金元素的作用

### (1) 碳的作用

- 高速钢中大部分碳原子都与钨、钼、钒、铌、铬等形成碳化物，使钢获得最大的二次硬化效应。
- 高速钢中的含碳量不能过低，过低淬火后马氏体中固溶的碳量减少，回火时从马氏体中析出的碳化物也相应减少，得不到最大的二次硬化效应。

- 高速钢中的含碳量也不能过高：
  - ✓ 过高碳化物量增多，碳化物不均匀性增大；
  - ✓ 钢的结晶温度降低，使淬火温度下降；
  - ✓ 淬火钢中残余奥氏体量增多，需多次回火才能使之减少到最低限度。
  - ✓ 对钨系高速钢，增加碳量将使钢抗弯强度和韧性明显下降。
- 高速钢中合适的含碳量应视不同钢种和性能需求综合考虑。

## (2) 钨和钼的作用

- 钨是造成高速钢**热硬性**的主要元素。
- 大部分钨形成 $M_6C$ 型碳化物，它是共晶碳化物的主要组成，也可从奥氏体中析出。
- 淬火加热时大量未溶 $M_6C$ **阻碍奥氏体晶粒长大**，改善钢的韧性。
- 溶在奥氏体中约7-8%的钨淬火后保留在马氏体中，提高马氏体**抗回火稳定性**。
- 在 $560^{\circ}\text{C}$ 回火时，从马氏体中弥散析出 $W_2C$ ，造成钢的**二次硬化效应**。



- 钼和钨是同族元素，结构和物理性能极其相近，可互相取代。
- 钼的原子量仅为钨的一半，加入1.0%钼可取代1.5%钨。
- 含钼共晶碳化物的形态由粗大鱼骨状变为细鸟巢状，碳化物不均匀性得到改善。
- 钼系钢的弯曲强度和冲击韧性均远高于钨系钢。
- 钼系高速钢的主要缺点是热硬性不足，在高温下脱碳倾向比钨系大。

### (3) 钒的作用：

- 钒在钢中主要以VC的形式存在，也溶于其它类型碳化物中。
- 淬火加热时VC仅部分溶解，未溶的VC起阻止奥氏体晶粒长大的作用。
- 溶于基体中的钒在较高温度回火时才析出，使钢的回火稳定性和二次硬化效应增大。
- 钒是使钢具有良好热硬性的重要因素，耐磨性的高低与钢中含钒量密切相关。

#### (4) 铬的作用

- 铬是增大钢的淬透性的主要元素，可形成 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 型碳化物。
- 铬也溶于 $\text{M}_6\text{C}$ 和 $\text{MC}$ 型碳化物中，促使其溶于奥氏体，增加奥氏体中合金度。
- 铬还提高钢的耐蚀性和抗氧化能力，减少粘刀现象，提高刃具切削能力。

## (5) 钴的作用

- 高速钢中的含钴量主要为5%、8%和13%三个级别。
- 钴不形成碳化物，绝大部分溶于固溶体，提高马氏体的回火稳定性，增强钢的二次硬化效应。