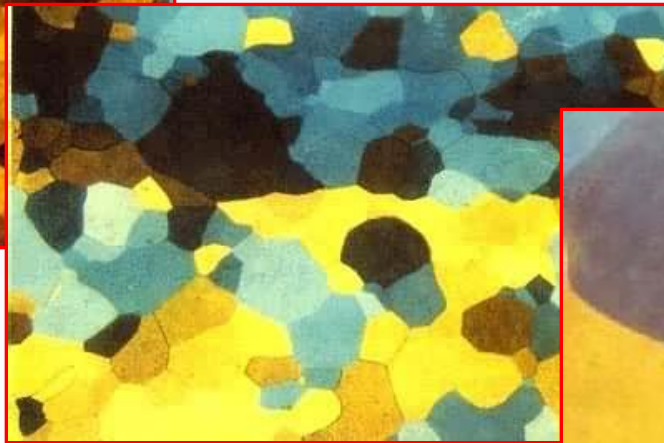
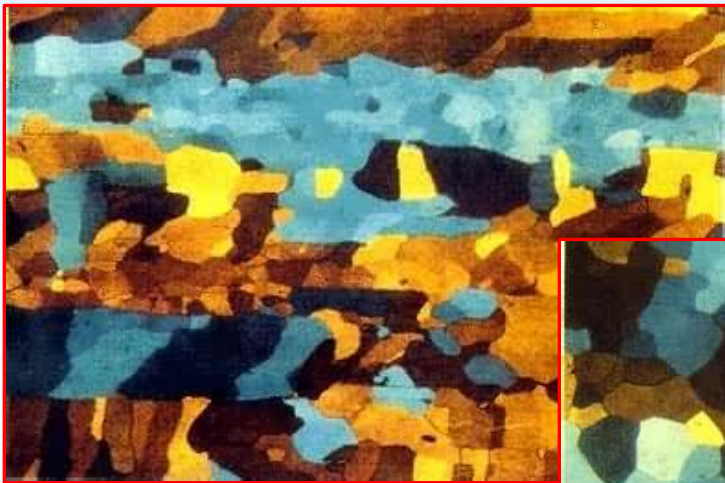
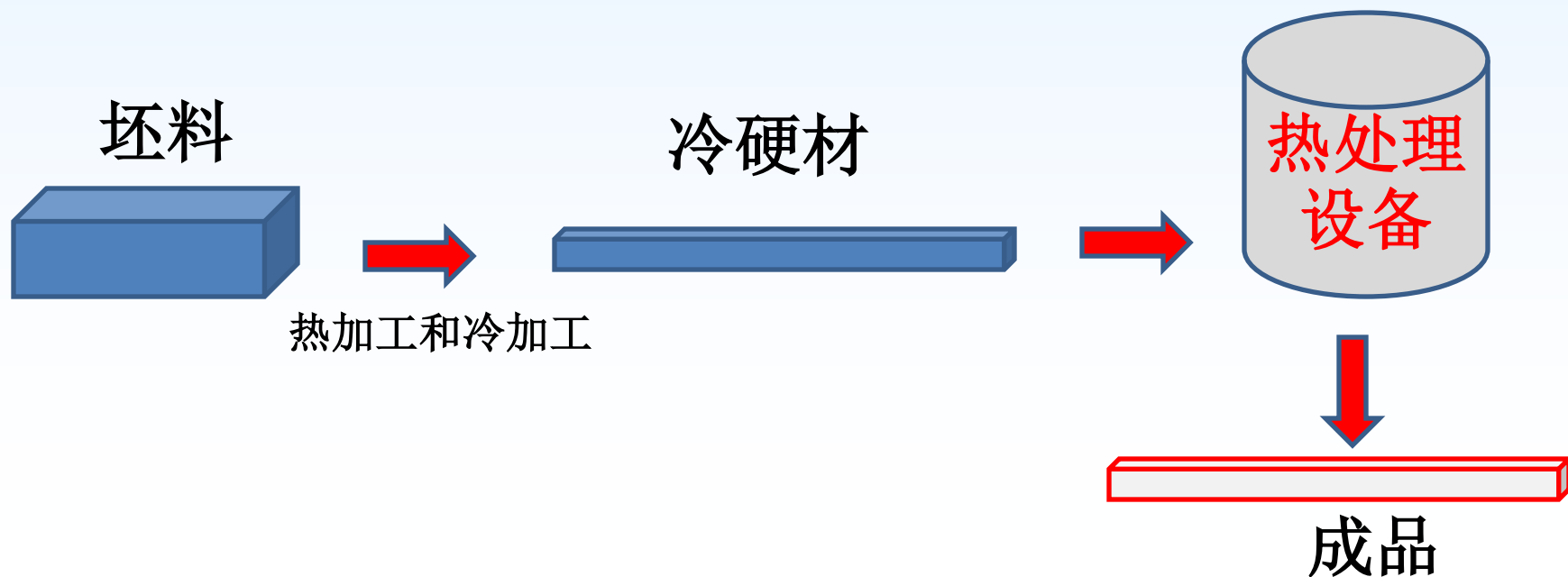


第六章 金属的 塑性变形与再结晶



6.3 冷变形金属在加热时的变化

经冷变形金属的金属材料内能较高，结构缺陷多，形变储能高，处于热力学不稳定状态。一旦受热，原子扩散能力增强，就会发生组织结构与性能的变化。**回复、再结晶与晶粒长大**是冷变形金属加热过程中经历的基本过程。

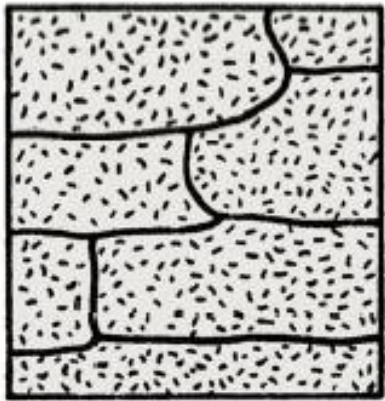


回复

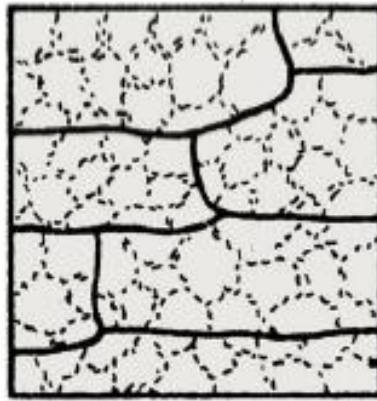
回复：冷塑性变形金属在加热时，在光学显微组织发生改变前所产生的某些亚结构和性能的变化过程

亚结构变化：点缺陷密度下降；位错组态分布规则化，数量有所降低

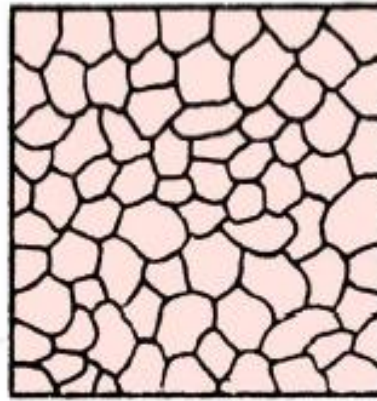
性能变化：大大降低残余应力、物理化学性能稳定化



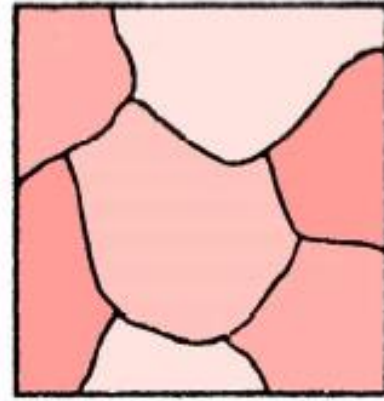
(a) 冷变形态



(b) 回复



(c) 再结晶



(d) 晶粒长大

回复

回复的应用：

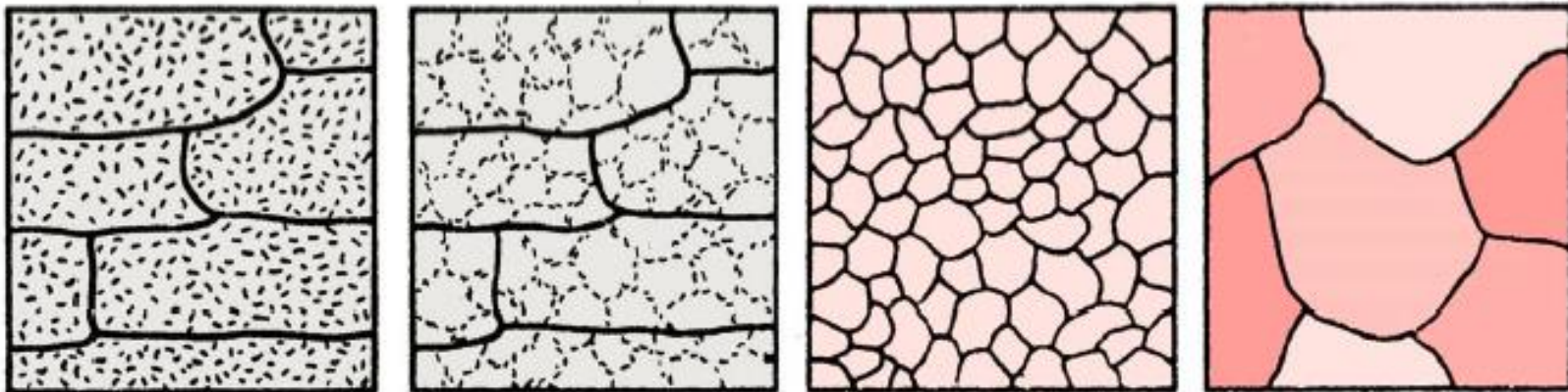
在较低温度下加热，使加工硬化金属的内应力基本消除，同时又保持其机械性能。这叫做**低温去应力退火**。

如冷拔钢丝，在 $250^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 低温加热，以消除内应力使其定型；弹壳黄铜的去应力退火，优化深冲性能。

再结晶 (Recrystallization)

冷变形后的金属加热到一定温度(一般大于 $0.4T_m$)或保温足够时间后, 在原来的变形组织中**产生了无畸变的新晶粒**, 新生成的晶粒逐渐全部取代塑性变形过的晶粒, 位错密度显著降低, 综合**性能明显优化**, 这个过程称为再结晶。

再结晶的驱动力也是变形储能的释放。



(a) 冷变形态

(b) 回复

(c) 再结晶

(d) 晶粒长大

再结晶与相变的差异性

冷塑性变形后的发生再结晶，晶粒以**形核和晶核长大来进行**，但再结晶过程不是相变。原因有：

- ❑ 变化前后的晶粒成分相同，晶体结构并未发生变化，因此它们是**属于同一个相**。
- ❑ 再结晶不像相变那样，有转变的临界温度点，即**没有确定的转变温度**。
- ❑ 再结晶过程**是不可逆的**，相变过程在外界条件变化后可以发生可逆变化。
- ❑ 发生**再结晶的热力学驱动力**是冷塑性变形晶体的畸变能，也称为**储存能**。



(a)



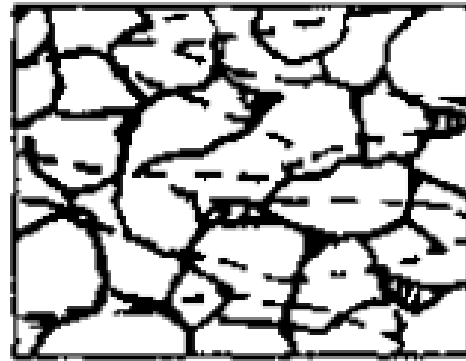
(b)



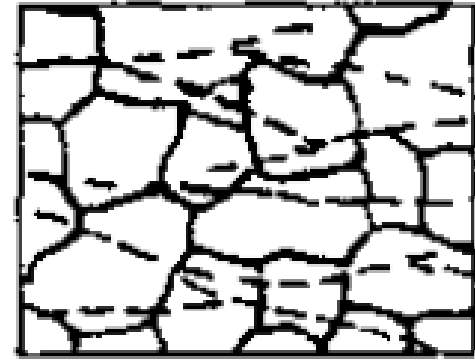
(c)



(d)



(e)



(f)

再结晶不是一个恒温过程，它是自某一温度开始，在一个温度范围内连续进行的过程，发生再结晶的最低温度(开始温度)称再结晶温度。

① 加热温度愈高，再结晶速度愈快，再结晶所需时间越短；

② 变形量越大，形变储能越大，再结晶温度越低。

变形量增加到一定程度时，再结晶温度不变。

$$T_{\text{再}} \approx (0.35 \sim 0.45) T_{\text{熔}}$$

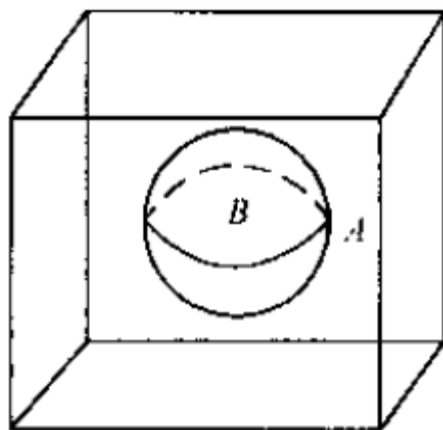
晶粒长大

再结晶刚完成时，得到的是等轴细晶粒组织。继续提高退火温度或延长保温时间，就会发生晶粒相互吞并而长大的现象。



晶粒的长大是一自发过程，**其驱动力是晶粒长大前后的界面能差**。长大过程中，晶粒变大，则晶界的总面积减小，总界面能也就减小。

为减小表面能晶粒长大的**热力学条件**总是满足的，长大与否，还需满足**动力学条件**，这就是界面的活动性，**温度**是影响界面活动性的最主要因素。



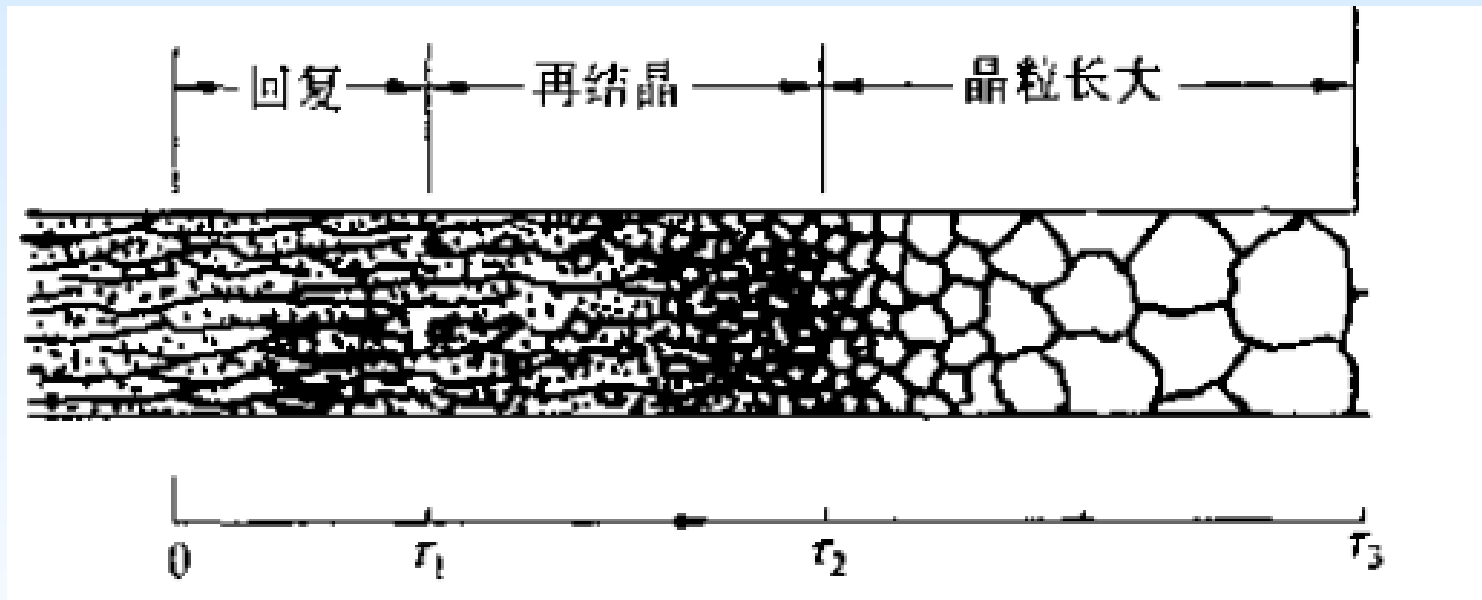
◆ 影响晶粒长大的因素

晶粒长大是通过晶界迁移来实现的，影响晶界迁移的因素都会影响晶粒长大

- 预先冷变形程度：变形程度越大，再结晶晶粒尺寸越小
- 变形温度：塑性变形温度高，变形能小，再结晶晶粒较粗大
- 原始晶粒尺寸：始晶粒越细，再结晶晶粒越细
- 杂质与合金元素：杂质一般起到细化晶粒的作用
- 退火温度：变形相同时，再结晶退火温度越高，晶粒粗大

冷变形金属在加热时的变化

➤ 显微组织变化



第一阶段：**回复阶段**，晶粒形貌无变化 ($0-\tau_1$)

第二阶段：形变基体中出现等轴、无畸变的小晶粒，
随时间延长，逐渐长大 ($\tau_1 - \tau_2$)，**(再结晶)**

第三阶段：完全等轴晶 **(晶粒长大)**

冷变形金属在加热时的变化

◆ 力学性能

回复阶段：强度、硬度**略有**下降，塑性略有提高。

再结晶阶段：强度、硬度**明显**下降，塑性明显提高。

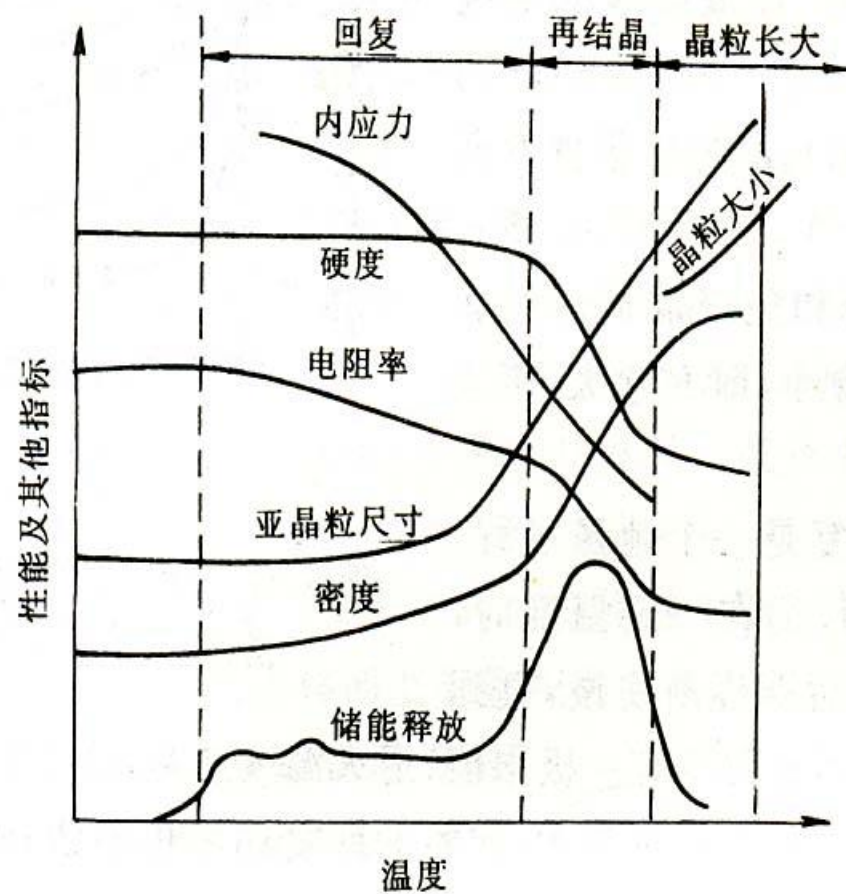
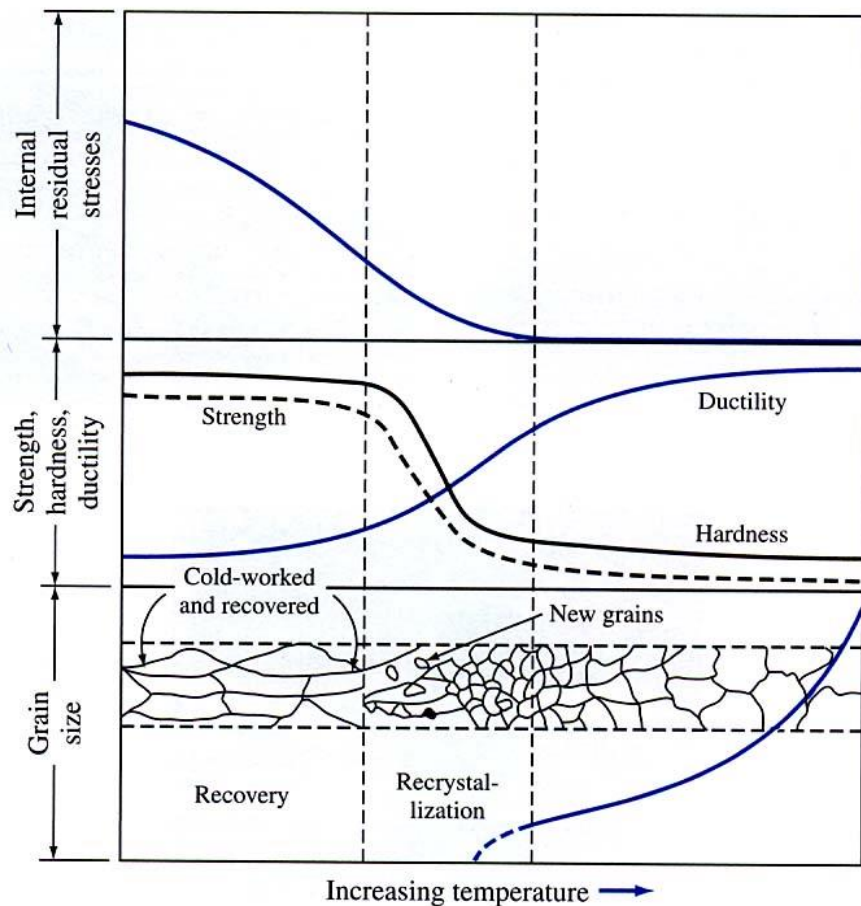
晶粒长大阶段：强度、硬度继续下降，塑性继续提高，粗化**严重**下降。

◆ 物理性能

密度：在回复阶段**变化不大**，在再结晶阶段急剧升高；

电阻：电阻在回复阶段**可明显下降**。

形变储能：回复阶段部分释放，再结晶至长大初期完全释放。



6.4 金属的热变形

何为热变形？



热加工的定义与特点

金属材料在再结晶温度以上进行加工，称为热加工，在再结晶温度以下为冷加工。工业生产中，高温进行的锻造，轧制等压力加工都属于热加工。

例如：钨的再结晶温度约为1200℃，因此，即使在1000℃进行变形加工也属于冷加工。

热加工温度： $T_{\text{再}} < T_{\text{热加工}} < T_{\text{固}} - 100 \sim 200^{\circ}\text{C}$

形变与温度共同作用于金属材料，因此它是一个加工硬化与再结晶软化共同作用的效果。

热加工的特点

优点:

(1) 处于热变形时的金属，其**变形抗力低**，因此能量消耗少；

(2) 在加工硬化过程的同时存在着回复或再结晶的软化过程。**材料塑性、韧性好**，产生断裂的倾向性减少，使金属中密闭的孔洞、气泡、裂纹等缺陷易于焊合。还可**避免红脆**现象；

(3) 与冷加工相比，热加工变形一般**不易产生组织**。这是由于在高温下发生滑移的系统比较多，使滑移面和滑移方向不断发生变化，因此，工件的**择优取向性较小**。

(4) 生产过程中，**不需要**像冷加工那样的**中间退火**，从而可简化生产工序，提高生产率，降低成本；

(5) 通过控制热加工过程，可以在很大程度上改变金属材料组织结构以**满足各种性能的要求**。

不足点:

(1) 对过薄或过细的工件，由于散热较快，生产中保持热加工温度困难。目前生产薄的或细的金属材料，一般仍采用冷加工（冷轧、冷拉）的方法。

(2) 工件的表面不如冷加工生产的光洁，尺寸也不如冷加工生产的精确。

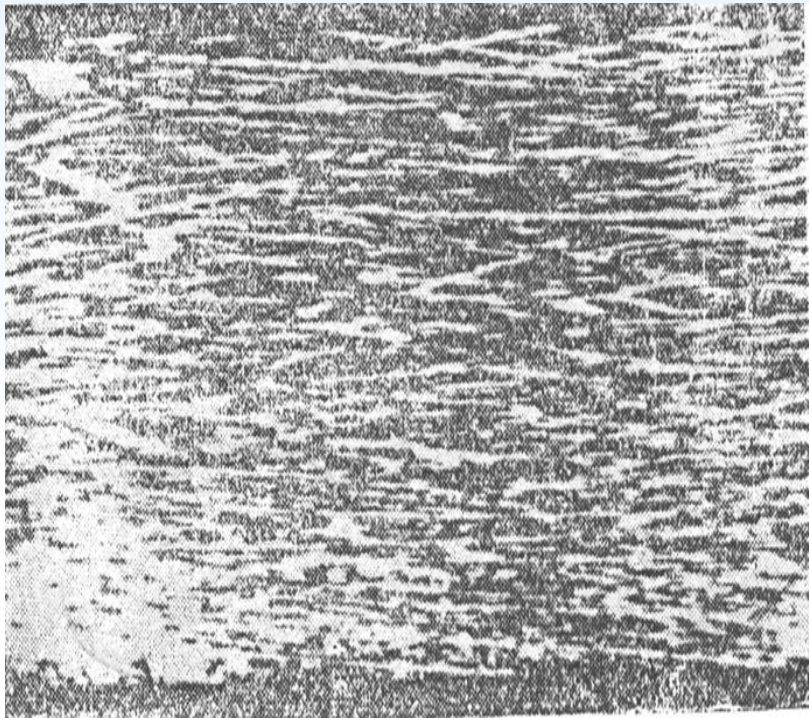
(3) 由于在热加工结束时，产品内的温度难于均匀一致，温度偏高处晶粒尺寸要大一些，大断面情况下更为突出。热加工后产品的组织、性能常常不如冷加工的均匀。

(4) 热加工金属材料的强度比冷加工的低。

(5) 某些金属材料不宜热加工。例如铜中含Bi时，它们的低熔点杂质分布在晶界上，热加工会引起晶间断裂。

热加工后的组织与性能

1. 改善铸造状态的组织缺陷，可使铸态组织中的气孔、疏松及微裂纹焊合，提高金属致密度，某些高合金钢中的莱氏体和大块初生碳化物可被打碎并使其分布均匀等。提高材料的致密性和力学性能。



2. 热变形形成流线（纤维组织），出现各向异性

在热加工过程中铸态金属的偏析、夹杂物、第二相、晶界等逐渐沿变形方向延展，在宏观工件上勾画出一个个线条，这种组织也称为纤维组织。顺流线方向比横向具有更高的力学性能，特别是塑性和韧性提高明显。在制订热加工工艺时，要尽可能使纤维流线方向与零件工作时所受的最大拉应力的方向一致(如下图)。



3. 形成带状组织

由于铸态组织中存在枝晶偏析或夹杂物，在加工过程中沿变形方向被拉长，当热变形加工后冷却时，先共析相往往在被拉长的杂质上优先析出，形成带状组织。

影响：使得横向塑性和韧性明显下降

消除：正火或均匀化退火

