

## 中碳钢碳化物相的 应变诱发快速球化

吴凡 曾祥云 卞波 姜冀湘

(材料科学与应用化学系)

**摘要** 中碳钢中的片状共析碳化物,可在  $A_{c1}$ 点之下较高的温度进行适量的变形即可在形变过程中实现球化;停止变形后继续在变形温度停留 1~2 小时,可使碳化物球通过奥斯瓦尔德熟化达到尺寸均匀化和粗化,同时使铁素体基体完成再结晶。

**关键词** 球化、碳化物、中碳钢

**分类号** TU511.3

渗碳体一般以片状形态存在于钢中。片状碳化物的表面自由能高,在热力学上具有球化的自发趋势。但这一转化所需激活能很高,约为 166 千卡/克分子,故实际的球化退火理应为一困难进程。有理由预测应变可诱发并加速球化进程。能奏效的应变量和应变温度可由实验确定。研究表明<sup>[1]</sup>,在奥氏体状态承受

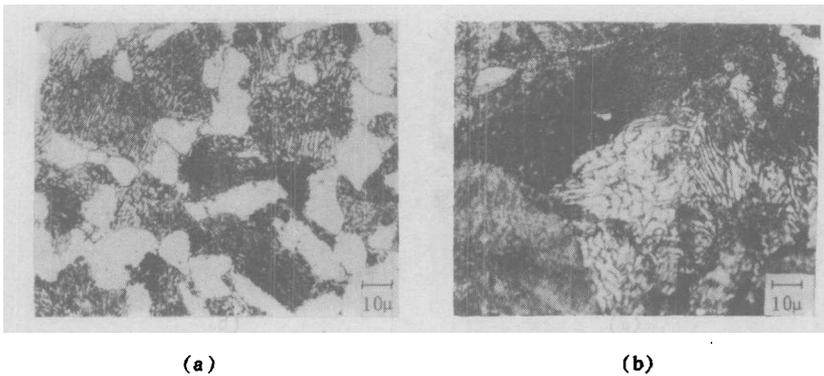


图1 研究用钢的原始组织,片状珠光体加先共析铁素体  
(a, 45; b, 40Cr)

应变,应变能主要用于 C 曲线的左上移动而对转变产物形状无本质影响。珠光体状态的应变在较高温度下实施,方能使铁素体相尽快松弛过高的体应变能而利于球化。相形之下,应变速率的影响较小。研究了两种常用中碳钢在低于各自临界点  $A_{c1}$ 之下以片状碳化

物的形态承受的不同应变 $\epsilon$ 对球化的影响,及形变后在变形温度的停留对碳化物熟化和基体再结晶的影响。表1是研究用钢的化学成份;图1是研究用钢的原始组织。扭转应变的速率 $\dot{\epsilon}=2.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ,而热轧时则为 $6.75 \text{s}^{-1}$ 。用光学显微镜和电子衍射术分析研究组织变化和精细结构;部分样品在图像分析仪上进行定量分析。

## 1 结果及讨论

### 1.1 应力应变曲线

图2是两种钢分别在 $680^\circ\text{C}$ 和 $700^\circ\text{C}$ 的应力应变曲线,它们均呈二次曲线。在应变初期应变硬化是主要的,随着应变增加,应变软化变为主导因素。位错密度的不断增加(图3)表明,恢复和再结晶不是软化的主要机制;当位错密度还在上升时已观察到渗碳体片的动态粒化,显然这是软化的唯一原因。这同奥氏体钢的动软化机制迥异<sup>[2]</sup>。

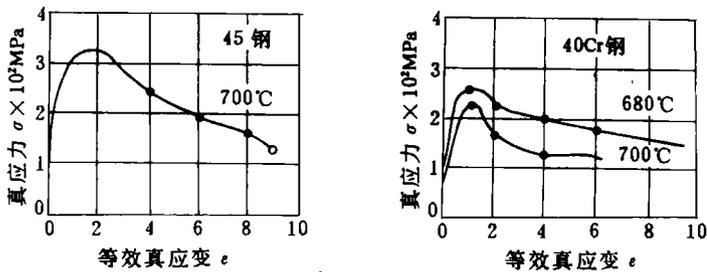


图2 研究用钢在 $700^\circ\text{C}$ 、 $680^\circ\text{C}$ 和应变速率 $\dot{\epsilon}=2.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 下的等效真应力应变曲线

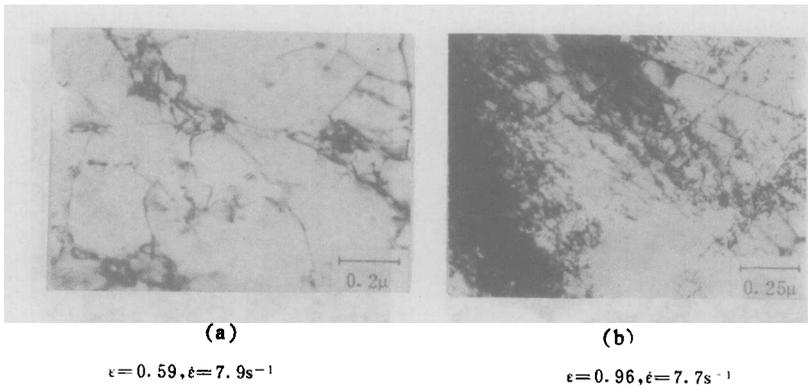


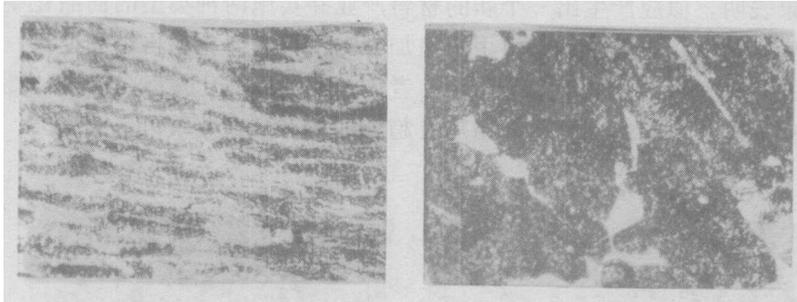
图3 45钢铁素体基体中的位错密度随应变变量增加而增加

### 1.2 应变诱发粒化的瞬间组织

图4是两种钢的变形瞬态组织,表明珠光体已粒化,铁素体呈变形态。观察表明,低于0.96的真应变不足以全部粒化。定量处理时,展弦比小于8的碳化物被认为已粒化<sup>[3]</sup>。

不应将应变诱发的碳化物粒化简单地理解为碎化过程。衍射分析表明“碎化”的颗粒无尖锐的边棱(图5)。这说明渗碳体片断开的同时还发生了大量原子的运输过程。由于

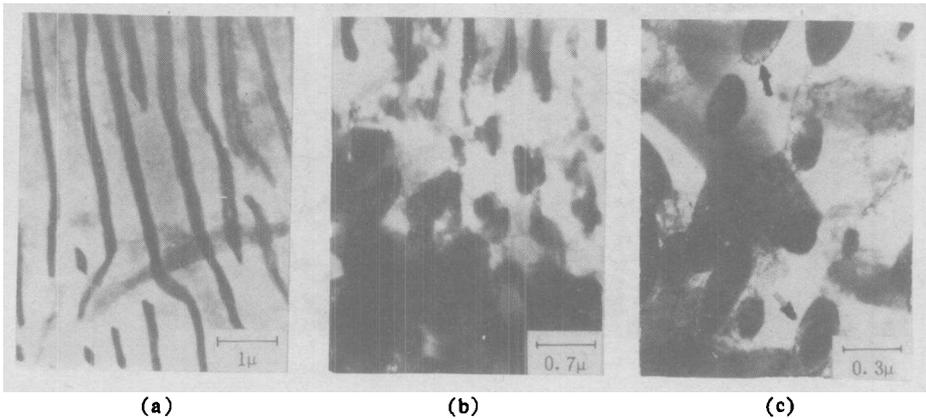
一个摩尔的  $\text{Fe}_3\text{C}$  和三个摩尔的  $\text{Fe}$  体积不等，故变形产生的非平衡点缺陷具有不容忽视的体积调节作用。另外，相界面上将形成特别的界面线缺陷组态(图 5C 箭头指处)。



(a) 45,  $\epsilon = 1.44$

(b) 40Cr,  $\epsilon = 0.96$

图 4 45, 40Cr 两种钢分别在 720℃, 740℃ 热轧后水冷固定的组织状态



(a)

(b)

(c)

图 5 碳化物球化过程的观察，形变温度 720℃；真应变

a: 0.00; b: 0.96; c: 1.44

### 1.3 应变基体的再结晶和渗碳体的熟化

变形后拉长的晶粒通过再结晶等轴化，同时应变诱发的碳化物粒通过 Ostwald 熟化机制实现球化。同时发生的此两过程均为产品的冷成型所必须。图 6 记录了 45 钢的再结晶和熟化过程。

对 200 个颗粒进行的定量研究表明，熟化过程在 1~2 个小时之后已趋缓慢；图 7 是 ×2000 下的部分研究视域；图 9 是展弦比统计曲线。

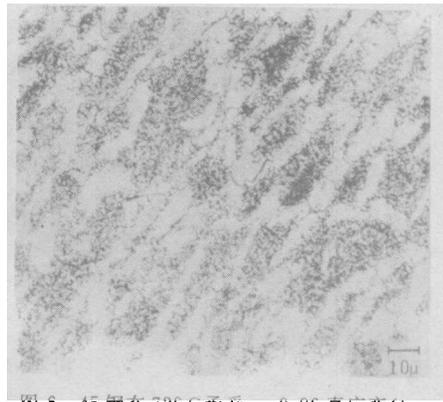


图 6 45 钢在 720℃ 承受  $\epsilon = 0.96$  真应变 ( $\dot{\epsilon} = 7.23\text{s}^{-1}$ ) 后在 700℃ 保持 40 分钟

图 8 是研究用钢 40Cr 的不同熟化程度。由于 Cr 的影响，合金系的共析点左移，故在统观上较 45 钢更为均匀。

研究结果表明，似应产生出一个新的材料产业并实施两种类型的商品化生产：一是向用户提供应变诱发粒化的原料，由用户追加为时不长的熟化和再结晶退火；二是向用户提供粒化并熟化和再结晶的原料。不论何者均大大提高球化效率、降低能耗和减少钢材和耐火材料消耗，从而使社会供需格局更趋合理和符合产业政策。

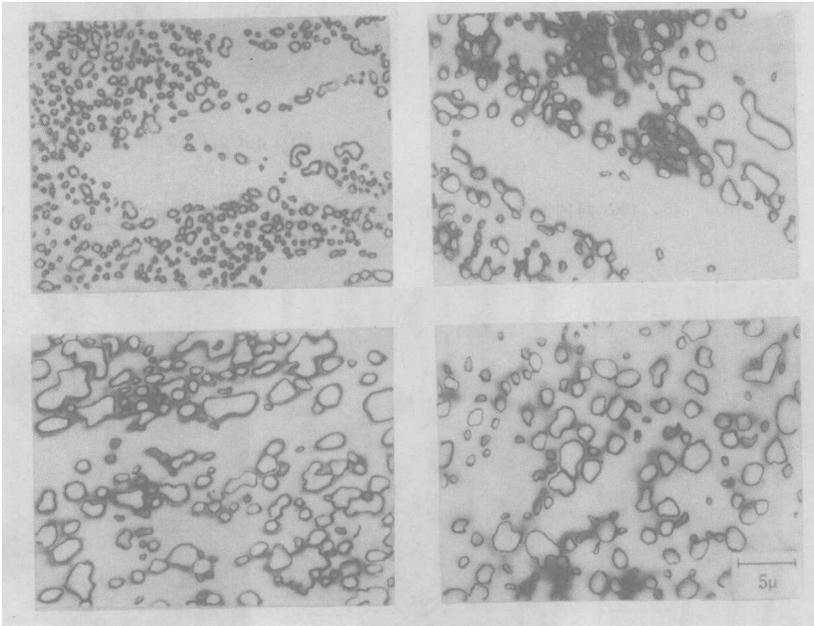


图 7 45 钢应变诱发球化后 700℃保温 1 小时(a)、2 小时(b)、3.5 小时(c)和 5 小时(d)的样品被统计的部分视域

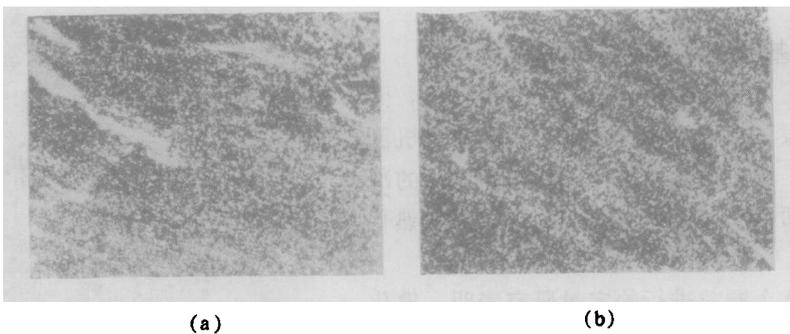


图 8 40Cr, 740℃,  $\epsilon=0.96$ ,  $\dot{\epsilon}=7.7s^{-1}$   
720℃保温 a: 40 分; b: 60 分;  $\times 500$

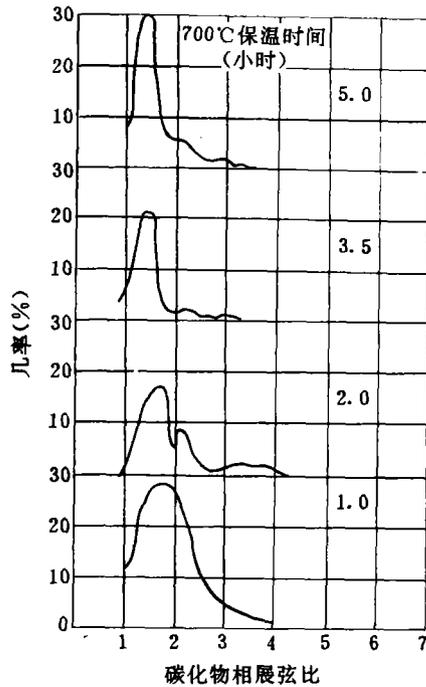


图9 45钢720℃应变诱发球化后( $\epsilon=0.96, \dot{\epsilon}=7.7 \text{ s}^{-1}$ )  
碳化物展弦比与时间对几率的关系

## 2 结 论

(1) 显微组织中含有片状珠光体的中碳钢, 加热到接近下临界点的温度并承受一定的形变可实现片状碳化物向球状的瞬间转化, 45钢或40Cr钢在轧制变形( $\dot{\epsilon}=6\sim 8 \text{ s}^{-1}$ )的情况, 所需真应变约为0.96. 然后将其在形变温度继续停留1~2小时, 即可使碳化物球熟化并使基体再结晶, 以便承受冷成型;

(2) 本研究结果转化为工程应用, 可为社会创建一个全新的材料产业, 并集中向用户提供碳化物球化原材料, 这样既可降低“消耗”, 同时又使供需格局更趋合理, 避免重复建设。

## 参 考 文 献

- [1] Paqueton H, Pineau A. J. of the Iron & Steel Inst. 1971, 209(No. 12): 991~998
- [2] 吴 凡, 秦 森. 钢铁研究总院学报, 1983, 13 (4): 539~546
- [3] Chattopadhyay S, Sellars C M. Acta Metallurgica 1982, 30: 157~170

# Strain Induced Accelerated Spheroidization of Carbide in Mid—Carbon Steels

Wu Fan Zeng Xiangyun Bian Bo Jiang Jixiang

(Department of Material Science and Applied Chemistry)

## Abstract

Spheroidization of flat-shape carbide in mid-carbon steels can be accelerated by concurrent hot working in a rather higher range of temperature under their  $A_{c1}$  points. It has been shown that with the help of annealing at the same temperature 1 or 2 hours after the deformation , the carbide grains can be thickened and well-distributed by Ostwald mechanism. At the same time the deformed ferrite matrix can be recrystallized as a general rule.

**Key words** spheroidization , carbide , mid-carbon steel