

· 组织和性能 ·

## 0.33C-1.0Mn-0.8Si 钢过冷奥氏体的连续冷却转变及组织细化

冯运莉 杨晓彩 张宁宁

(河北理工大学金属材料工程系, 唐山 063009)

**摘要** 利用 Gleeble-3500 热模拟实验机测定了 0.33C-1.0Mn-0.8Si 钢的静态(不变形)与动态(变形) CCT (连续冷却转变)曲线,并观察了钢的组织。结果可见,形变可以提高铁素体转变的开始温度,但对转变终了温度基本没有影响,变形后过冷奥氏体的铁素体转变区扩大,动态  $Ar_3$  的值比相同冷却条件下静态时  $Ar_3$  高出近 100 °C,形变对  $Ar_1$  的影响不明显;随着冷却速度的增大,铁素体晶粒由多边形形状变成条状或长片状,珠光体团也变得更细小、弥散,且动态连续冷却组织比静态连续冷却组织细小。

**关键词** 0.33C-1.0Mn-0.8Si 钢 CCT 曲线 相变 组织 细化

## Continuous Cooling Transformation of Overcooling Austenite and Structure Fining of 0.33C-1.0Mn-0.8Si Steel

Feng Yunli, Yang Xiaocai and Zhang Ningning

(Metal Material Engineering Department, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

**Abstract** Static (non-deformation) and dynamic (deformation) continuous cooling transformation (CCT) curves of steel 0.33C-1.0Mn-0.8Si was measured by Gleeble-3500 thermo-mechanical simulator, and structure of steel was observed. Results showed that the deformation of overcooling austenite could increase initial transformation temperature of ferrite, but had no obvious influence on temperature of completion of transformation, the zone of ferrite transformation of deformed overcooling austenite enlarged, and  $Ar_3$  value for deformed austenite was higher by 100 °C than that for non-deformed austenite while effect of deformation on  $Ar_1$  was no-obvious; and with increasing cooling rate, the morphology of ferrite grain changed from polygonal to lath and long leaf structure and the pearlite colonies became more fine and dispersed, and the continuous cooling structure for deformed austenite was finer than that for non-deformed austenite.

**Material Index** 0.33C-1.0Mn-0.8Si Steel, CCT Curves, Phase Transformation, Structure, Refinement

### 1 实验材料与方法

实验材料为 150 kg 中频感应炉冶炼生产的中碳钢锭,钢锭直径 85 mm,长度 180 mm,实验材料的化学成分(%)为:0.33C、1.0Mn、0.8Si、0.021S、0.014P。在线切割机上切取热模拟试样,试样尺寸为  $\Phi 8$  mm  $\times$  15 mm。

依据热模拟实验机的力能参数,并参考部分实际生产工艺参数,制定了下列热模拟实验方案<sup>[1]</sup>:

(1)静态 CCT 曲线。在 Gleeble-3500 热模拟实验机上测定不同冷却速度下的静态 CCT 曲线。将传感器装卡在试样的热电偶焊接部位测量冷却过程相变引起的直径膨胀量,采用吹风获得快速冷却,记录膨胀量-温度曲线。实验时将试样以 10 °C/s 的升温速度加热到奥氏体化温度(1 000 °C)保温 3 min,然后分别以 0.2、0.5、1.5、10、20 °C/s 的冷却速度冷却至室温,采集温度、膨胀量和时间数据,绘制静态 CCT 曲线。

将试样沿轴线剖开,观察剖开面中部金相组织。冷却后的全部试样经金相研磨、抛光及经 3% 硝酸

酒精腐蚀处理后,在光学显微镜下观察显微组织。

(2)动态 CCT 曲线。将  $\Phi 8$  mm  $\times$  15 mm 圆柱形试样在 Gleeble-3500 热模拟实验机上测定变形奥氏体的动态 CCT 曲线。实验时将试样以 10 °C/s 的速度加热至 1 000 °C 后,保温 3 min 后,将试样以 8 °C/s 的速度冷却到 800 °C 后变形,工程应变为 50%,变形速率为  $1 \text{ s}^{-1}$ ,变形后分别以 0.2、0.5、1、5、10、20 °C/s 的冷却速度冷却至室温,采集温度、膨胀量和时间数据,绘制动态 CCT 曲线。

将变形及冷却后的试样沿轴线剖开,观察剖面中部金相组织。变形及冷却后的全部试样经金相研磨、抛光及经 3% 硝酸酒精腐蚀处理后,在光学显微镜下观察显微组织<sup>[2]</sup>。

### 2 结果和分析

#### 2.1 静态 CCT 曲线及显微组织

用 Thermo-calculation 软件计算出实验用钢未变形时的  $A_3$  和  $A_1$  的值分别为 778 °C 和 712 °C。用 DT1000 热膨胀仪测定实验用钢在奥氏体化温度(1 000 °C)后,以不同的冷却速度连续冷却时的  $Ar_3$

和  $Ar_1$  的值。在冷却过程中奥氏体会发生转变, 由于  $\gamma$  相(奥氏体)的比容比  $\alpha$  相的小, 当试样中有  $\alpha$  相(铁素体、贝氏体或马氏体)生成时将导致试样体积膨胀在试样的长度与温度的曲线上出现拐点, 拐点对应的温度即为新相生成的温度<sup>[1]</sup>。表 1 即为静态下测得的不同冷却速度下的  $Ar_3$  和  $Ar_1$  值。静态和动态 CCT 曲线如图 1(a) 所示。

由表 1 和图 1(a) 可见, 静态未变形的奥氏体随着冷却速度增加, 奥氏体-铁素体的开始转变温度  $Ar_3$  显著降低, 珠光体形成温度  $Ar_1$  随冷却速度增加

表 1 0.33C-1.0Mn-0.8Si 钢未变形和变形奥氏体在不同冷却速度下的临界点/°C

Table 1 Critical point of non-deformed and deformed austenite of 0.33C-1.0Mn-0.8Si steel at different cooling rate /°C

冷却速度/ (°C · s <sup>-1</sup> )	静态(未变形)			动态(变形)		
	$Ar_3$	$Ar_1$	转变结束	$Ar_3$	$Ar_1$	转变结束
20	697	568	525	767	568	525
10	711	577	535	774	598	539
5	725	588	543	783	604	545
2	767	605	551	790	615	556
1	765	623	575	801	634	579
0.5	767	655	617	808	667	620
0.2	777	661	622	817	675	622

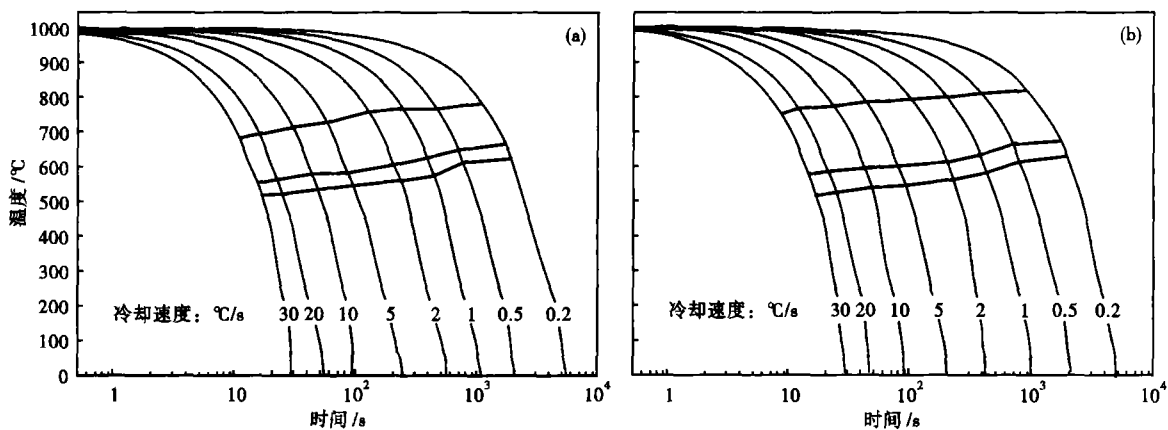


图 1 0.33C-1.0Mn-0.8Si 钢未变形(a)和变形(b)奥氏体的 CCT 曲线

Fig. 1 CCT curves of non-deformed (a) and deformed (b) austenite of 0.33C-1.0Mn-0.8Si steel

也有下降的趋势, 但要缓慢得多。增加冷却速度显著降低  $Ar_3$ , 并使  $\gamma$ - $\alpha$  转变的过冷度增加, 所以它不但提高了  $\alpha$  新相的形核率, 并且延缓  $\alpha$  晶粒向未相变的  $\gamma$  母相中的生长, 导致最终组织的晶粒尺寸减小。

未变形奥氏体不同冷却速度下相变的金相组织如图 2(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>, e<sub>1</sub>) 所示。

当冷却速度为 0.2 °C/s 时, 铁素体转变开始温度为 777 °C, 组织由粗大的多边形铁素体 + 粗大片层状珠光体组成, 多边形铁素体的晶粒直径为 10 ~ 23  $\mu\text{m}$ , 片层间距在 0.5  $\mu\text{m}$  以下珠光体片层结构十分明显, 如图 2(a<sub>1</sub>) 所示。当冷却速度为 0.5 ~ 1 °C/s 时, 铁素体晶粒仍较粗大, 呈多边形, 体积分数相对于较大的冷却速度明显要少, 珠光体的量多且晶粒也大, 呈粗大的片层状, 铁素体相变温度也要相对较高。

当冷却速度为 2 °C/s 时, 铁素体转变开始温度为 767 °C, 铁素体已由原来粗大的多边形变为不规则的短片状, 数量也有所增加, 如图 2(c<sub>1</sub>) 所示, 此时铁素体的晶粒直径为 7 ~ 14  $\mu\text{m}$ 。当冷却速度为 5 °C/s 时, 铁素体呈细小的板条状或长片状, 珠光

体团变得也更加细小、弥散, 如图 2(d<sub>1</sub>) 所示, 此时铁素体的晶粒直径为 6 ~ 10  $\mu\text{m}$ 。当冷却速度为 10、20 °C/s 时, 室温组织进一步细化, 但仍为铁素体和珠光体的混合组织, 此时铁素体的晶粒直径为 5 ~ 6  $\mu\text{m}$ , 整个组织中没有出现贝氏体和马氏体, 这两种冷却速度下的组织没有明显区别, 这说明冷却速度到达某一临界值后, 再增加冷却速度对晶粒的细化不再有明显效果。

## 2.2 动态 CCT 曲线及显微组织

试样在 800 °C 变形后, 经不同的冷却速度连续冷却时得到的  $Ar_3$  和  $Ar_1$  的值, 如表 1 所示。

动态 CCT 曲线如图 1(b) 所示, 该图中各个冷却速度下的  $Ar_3$  温度都相差不大, 曲线比较平稳, 整个图形可划分为铁素体 + 珠光体区两大部分, 与未变形奥氏体的 CCT 曲线相比, 变形奥氏体的 CCT 曲线中的铁素体开始转变温度提高并向左移, 铁素体转变区扩大。动态 CCT 曲线所用试样的典型连续冷却显微组织如图 2(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>, e<sub>2</sub>) 所示。

从图 1(b) 和图 2(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>, e<sub>2</sub>) 中可见, 变形对铁素体相变有明显的诱导作用。当冷却速度  $\leq$

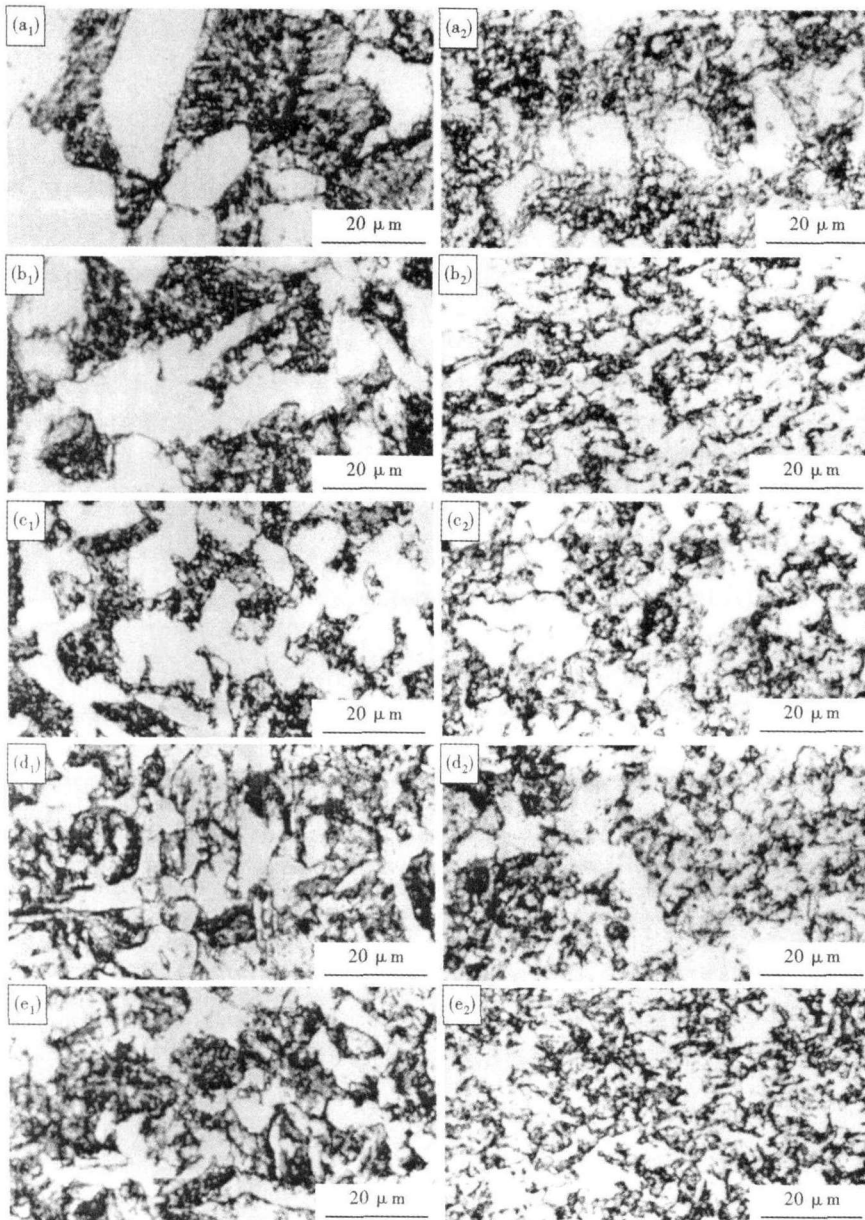


图2 0.33C-1.0Mn-0.8Si钢未变形( $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1$ )和变形( $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2$ )奥氏体在不同冷却速度下的组织形貌:( $a_1, a_2$ ) 0.2 °C/s; ( $b_1, b_2$ ) 1 °C/s; ( $c_1, c_2$ ) 2 °C/s; ( $d_1, d_2$ ) 5 °C/s; ( $e_1, e_2$ ) 10 °C/s

Fig.2 Structure morphology of non-deformed ( $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1$ ) and deformed ( $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2$ ) austenite of 0.33C-1.0Mn-0.8Si steel at different cooling rate: ( $a_1, a_2$ ) 0.2 °C/s; ( $b_1, b_2$ ) 1 °C/s; ( $c_1, c_2$ ) 2 °C/s; ( $d_1, d_2$ ) 5 °C/s and ( $e_1, e_2$ ) 10 °C/s

0.5 °C/s时,铁素体转变开始温度为808 °C,组织中 铁素体含量比平衡冷却时明显增多,同时珠光体发生退化,如图2( $a_2$ )所示。当冷却速度为1 °C/s时,铁素体细化且呈现多边形化,珠光体也发生较明显退化,如图2( $b_2$ )所示。当冷却速度为2 °C/s时,铁素体相变温度为790 °C,组织中的铁素体含量增多,在铁素体和珠光体相界面之间出现了少量的颗粒状渗碳体,如图2( $c_2$ )所示。当冷却速度为5 °C/s时,铁素体相变温度下降到783 °C,组织完全由细小的

铁素体和类珠光体组成,如图2( $d_2$ )所示。当冷却速度 $\geq 10$  °C/s时,由铁素体和退化的珠光体组成,晶粒尺寸减小缓慢,组织比较均匀,此时铁素体晶粒直径约为5  $\mu\text{m}$ ,表明冷却速度对形变诱导铁素体有一个极限值,超过此值后冷却速度对组织的变化影响不大,如图2( $e_2$ )所示。从整体上看,动态显微组织晶粒要比静态显微组织晶粒细小。

### 3 结论

(1)随着冷却速度不断增大,静态未变形与动态变形不同冷却速度下铁素体转变温度范围的临界值 $Ar_3$ 和 $Ar_1$ 都在不断降低;并且过冷奥氏体向铁素体转变过程的温度区间随着冷却速度的加大而增大。动态 $Ar_3$ 的值比相同冷却条件下静态时的临界温度要高出近100 °C,二者的 $Ar_1$ 变化不明显,并且二者转变结束温度基本相同。

(2)动态显微组织与静态显微组织相比,由于形变的影响会导致相变前奥氏体产生形变或形成变形带,使奥氏体向铁素体转变后的动态显微组织晶粒要比静态显微组织晶粒细小。

“河北省自然科学基金”资助项目(E2006000358)

#### 参考文献

- 1 谷海容. TSCR生产800 MPa级TRIP钢的连续冷却相变及组织演变模拟. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 298
- 2 吴红艳, 杜林秀, 薛文颖, 等. 变形工艺对V、Ti微合金钢连续冷却相变的影响. 钢铁钒钛, 2006, 27(1): 6

冯运莉(1965-),女,工学博士,教授,钢铁材料组织和轧制工艺。

收稿日期:2008-09-08