

· 工艺技术 ·

## 82A 钢高速线材控制冷却工艺的优化

王博文 杭乃勤

(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

**摘要** 利用 Gleeble 1500 热模拟实验机测定了 82A 高碳钢(% : 0.81C, 0.50Mn, 0.21Si, 0.007P, 0.006S)  $\Phi$ 5.5 mm 线材在 0.8 ~ 40  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷却速度下的连续冷却转变(CCT)曲线, 经与现场实测冷却曲线估算的实际相变温度拟合修正, 得出符合生产实际的动态 CCT 曲线。结合高速线材控制冷却过程的基本模型, 得出 82A 钢线材适宜的吐丝温度为 910 ~ 930  $^{\circ}\text{C}$ ; 相变过程最佳冷却速度为 9 ~ 12  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

**关键词** 82A 高碳钢 高速线材 动态 CCT 曲线 控制冷却

## Optimization for Control-Cooling Process of High Speed Rolled Wire of Steel 82A

Wang Bowen and Hang Naiqin

(College of Materials and Metallurgy Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The continuous cooling transformation (CCT) curves of  $\Phi$ 5.5 mm wire of high carbon steel 82A (% : 0.81C, 0.50Mn, 0.21Si, 0.007P, 0.006S) with cooling rate 0.8 ~ 40  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  are measured by Gleeble 1500 thermal simulation machine, and fitting in with real phase transformation temperature calculated by measured cooling curves at production situ, the correcting dynamic CCT curves to meet the production situation are obtained. Combined the basic model for control-cooling process of high speed rolled wire, it is obtained that the available reeling temperature of wire-rod of steel 82A is 910 ~ 930  $^{\circ}\text{C}$ , and the optimum cooling rate during phase transformation process is 9 ~ 12  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .

**Material Index** High Carbon Steel 82A, High Speed Rolled Wire, Dynamic CCT Curves, Control-Cooling

帘线钢生产的目的是获得拉拔性能良好的索氏体组织, 理论上应使相变在 630  $^{\circ}\text{C}$  左右发生, 而实际生产中不可能是完全的等温转变, 最终产品中除了索氏体, 还可能含有少量铁素体和片状珠光体。

本文采用热模拟实验的数据, 对 82A 钢的动态连续冷却转变曲线(CCT 曲线)进行了研究, 讨论了吐丝温度和风冷线冷却制度对组织性能的影响, 并结合高速线材控制冷却过程中的两个基本模型<sup>[1]</sup>, 即斯太尔摩风冷线上奥氏体向珠光体转变模型及最终显微组织与力学性能的关系模型, 分析了 82A 钢的控制冷却过程与最终的显微组织和力学性能的关系, 以便对冷却制度进行优化, 降低组织性能改判率。

### 1 CCT 曲线的绘制

试样钢种为 WLX82A, 成分如表 1 所示, 轧制前坯料尺寸为 200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  6 000 mm, 成品断面尺寸为  $\Phi$ 5.5 mm。于粗轧机出口摆剪处剪下一段粗轧坯试样, 加工为  $\Phi$ 8 mm  $\times$  15 mm 的圆柱体。实验仪器采用河南科技大学有色金属材料实验室 Gleeble 1500 热模拟实验机。

表 1 82A 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 82A /%

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu
0.81	0.50	0.21	0.007	0.006	0.01	0.01	0.01

将试样加热至 1 100  $^{\circ}\text{C}$ , 保温 5 min 后冷却至 1 050  $^{\circ}\text{C}$ , 以 50/s 应变速率、60% 相对变形程度进行压缩变形。根据现场的生产工艺, 设定了 3 个起始冷却温度 880、910、940  $^{\circ}\text{C}$ , 变形后的试样分别从 880、910、940  $^{\circ}\text{C}$  开始以 0.8、3、6、10、20、30、40  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  7 种不同的冷却速度进行冷却至 200  $^{\circ}\text{C}$ , 测得温度-膨胀量-时间曲线, 用热膨胀法确定相变时间和时间, 利用 Origin 软件绘制动态 CCT 曲线(图 1a)。同时以 3 个试样分别从 880、910、940  $^{\circ}\text{C}$  淬火, 测量此温度下奥氏体晶粒尺寸。

根据已知的各冷却速度及对应的转变温度, 采用 3 次回归方法确定  $T = f(V)$ , 得到冷却速度和转变温度之间的关系:

$$T = 668.120 - 3.023V + 0.066V^2 - 0.002V^3 \quad (1)$$

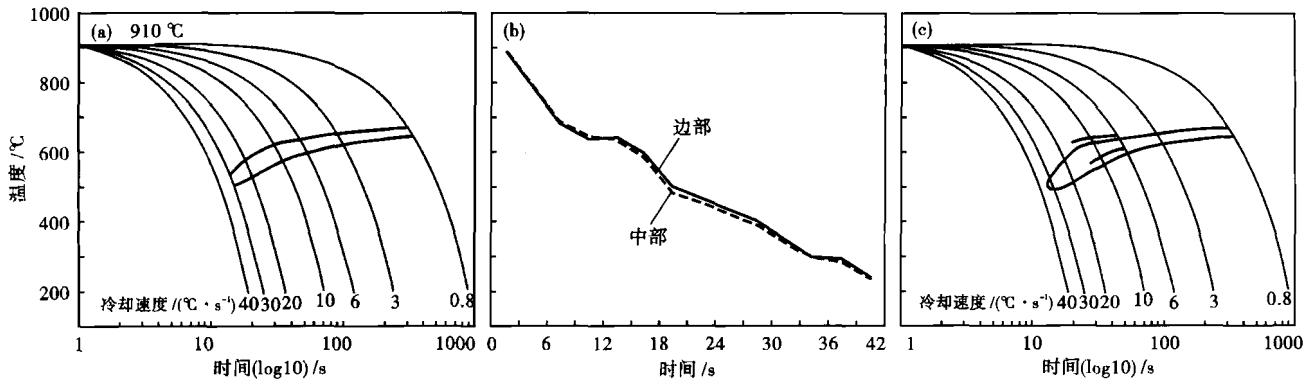


图 1 82A 钢热模拟动态 CCT 曲线(a);现场冷却曲线(b);拟合修正后的 CCT 曲线(c)

Fig. 1 Thermal simulated dynamic CCT curves (a), cooling curves measured at situ (b) and fitted and corrected CCT curves of steel 82A

式中:  $T$ - 转变温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;  $V$ - 冷却速度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

利用现场实测冷却曲线(图 1b)估算实际相变温度,在图 1(a)基础上标出现场冷速范围内的相变开始和终止曲线,经过拟合修正<sup>[2]</sup>,得到符合生产实际情况的动态 CCT 曲线(图 1c)。

由图 1(c)可以发现,实际生产中相变开始和结束点都比原 CCT 曲线有所提高,相变持续时间延长,这是现场冷却速度非恒定所决定的。利用修正后的 CCT 曲线进行线材轧后冷却组织性能分析,比单纯依赖热模拟实验结果更符合实际情况。

## 2 结果分析

### 2.1 吐丝温度的影响

82A 钢热模拟实验中的起始冷却温度,对应现场线材进入斯太尔摩风线的吐丝温度。在同一冷却速度下,随着起始冷却温度的升高,转变终了温度有不同程度的升高。起始冷却温度越高,线材的连续转变过程中在高温阶段停留的时间越长,具有的能量越高,在晶界上越容易形核长大,并且此时过冷度也较大,转变较快。

利用 Leica DM6000 金相显微镜和 SEM Quant 400 扫描电镜对热模拟试样进行定量金相分析,得到试样奥氏体晶粒尺寸和珠光体片间距(表 2)。

由表 2 可知,降低吐丝温度,一方面影响变形后奥氏体晶粒长大倾向,使相变前奥氏体晶粒越小,晶界面积增大,组织中 铁素体比例增加,利于形成较细晶粒组织;另一方面,珠光体量减少,珠光体片层间距变大,抗拉强度和屈服强度降低。文献[3]中也给出了产品强度与珠光体体积分数和片间距的关系:

$$\sigma_b = 15.4 \{ V_F^{1/3} [ 16.0 + 74.2 W_N^{1/2} + 1.18 d_a^{-1/2} ] + (1 - V_F)^{1/3} [ 46.7 + 0.23 S_p^{-1/2} ] + 6.3 W_{Si} \} \quad (2)$$

式中:  $V_F$ - 铁素体的体积分数;  $W_N$ 、 $W_{Si}$ - 分别为氮和

表 2 金相分析结果

Table 2 Results of metallographic phase analysis

试样编号	热模拟工艺	晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	晶粒度/级	组织成分/%	珠光体片层间距/ $\text{nm}$
a	910 $^{\circ}\text{C}$ , 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却			3.71F + 96.29P	174.57
b	940 $^{\circ}\text{C}$ , 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却			0.62F + 99.38P	150.35
c	940 $^{\circ}\text{C}$ , 30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却			0.67F + 98.33P	129.87
d	880 $^{\circ}\text{C}$ 淬火	33.6	6.60	100M	
e	910 $^{\circ}\text{C}$ 淬火	33.8	6.46	100M	

注: M- 马氏体, F- 铁素体, P- 索氏体。

硅的质量分数;  $S_p$ - 珠光体片间距/ $\mu\text{m}$ 。

在保持辊速 0.458 m/s、线径  $\Phi 5.5$  mm、风机开启状态不变的前提下,随吐丝温度(650 ~ 910  $^{\circ}\text{C}$ )的增加,珠光体片层间距先减小后增大,而抗拉强度一直增大(图 2)。

从实际生产情况以及用户对线材强度性能的要求考虑,吐丝温度可以设定在较高温区区间内(910 ~ 930  $^{\circ}\text{C}$ ),从而获得较高的抗拉强度。但吐丝温度也不能太高,NTM(无扭精轧机组)出口温度和

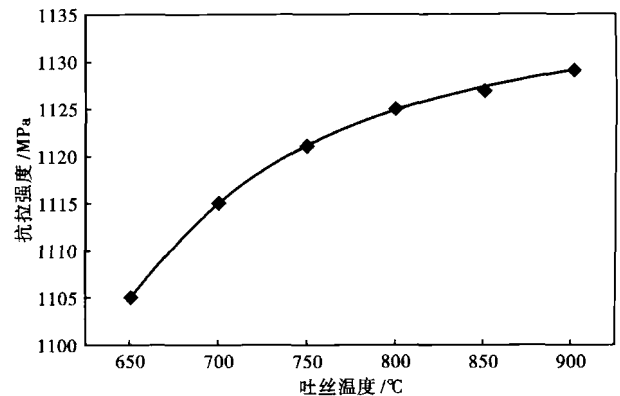


图 2 线材吐丝温度对 82A 钢抗拉强度的影响

Fig. 2 Effect of reeling temperature of wire-rod on tensile strength of steel 82A

吐丝温度之间应当有一定的温降,否则由于线材长时间处于高温区,奥氏体晶粒长大,最终相变后珠光体量增多,并在线材表面发生二次氧化,FeO 转变成 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,使得去除氧化铁皮困难。另外,吐丝温度的波动应严格控制在 ±10 ℃ 范围内以改善通条性能。

2.2 冷却速度的影响

冷却速度的加快将使相变开始温度移向较低温,随冷却速度的提高过冷度增大,促进了铁素体的进一步形核,提高了形核率,同时温度较低又限制了晶界的运动能力,延迟铁素体晶粒向未相变奥氏体基体中的生长,降低长大速率,造成铁素体晶粒的细化。加快冷却还可阻止转变前已经细化的奥氏体晶粒长大,同样有利于细化铁素体晶粒。同时也细化了珠光体,减少了珠光体的量,可减轻或消除珠光体带状组织,特别是减小珠光体的片间距和渗碳体层的厚度,使得组织更加细小均匀(表 2)<sup>[4]</sup>。

冷却速度过低将导致奥氏体向珠光体转变之前首先沿奥氏体晶界析出大量先共析铁素体,芯部偏析严重的部位甚至有少量网状渗碳体析出,从而降低了线材的索氏体含量及抗拉强度,增加了脆性。

文献[5]中给出珠光体片间距公式,这些公式的相同之处在于片间距都和过冷度有关,只是系数上存在差异:  $S_p = K/\Delta T$  (3)

式中: $S_p$ - 珠光体片间距/ $\mu\text{m}$ ;  $K$ - 常数;  $\Delta T$ - 过冷度。

由图 1(c) 分析,最适合的冷却速度的上下限为 6 ~ 15 ℃/s。如果以下限值进行冷却,由于心部冷却速度更低,会产生粗大的珠光体组织,所以外层的冷却速度必须控制在 9 ℃/s 以上才能保证心部索氏体化;而以上限进行冷却时,如果控制不当组织中就会产生马氏体。结合风冷线的实际数据,认为生产 82A 线材时在斯太尔摩风冷线上相变阶段的理想冷却速度为 9 ~ 12 ℃/s。

要想将冷却速度控制在 9 ~ 12 ℃/s,经计算应在 2# 风机段开始相变(图 3),在 4# 风机段之前完成相变。1#、2# 风机应全开,3# 风机开 85% 左右或全开(取决于轧件温升情况),目的是使线材在相变过程中温度尽可能稳定在 630 ℃ 左右,即近似等温转变,同时相变在很短的时间内完成,以获得片间距极小且均匀的组织,保证在获得高强度的基础上,具有良好的韧性。相变完成之后,一方面要使线材不断降温,另一方面如果降温速度太快,势必造成应力增大,影响线材力学性能,所以 4# ~ 10# 风机可适当减低开启度<sup>[6]</sup>。由于斯太尔摩风冷线冷却能力(主要由风机的开启度来控制)受环境尤其是气候的影响较大,使得风机的开启与冷却速度之间没有线性关系,在正常生产中应随时进行测温以控制冷却速度。

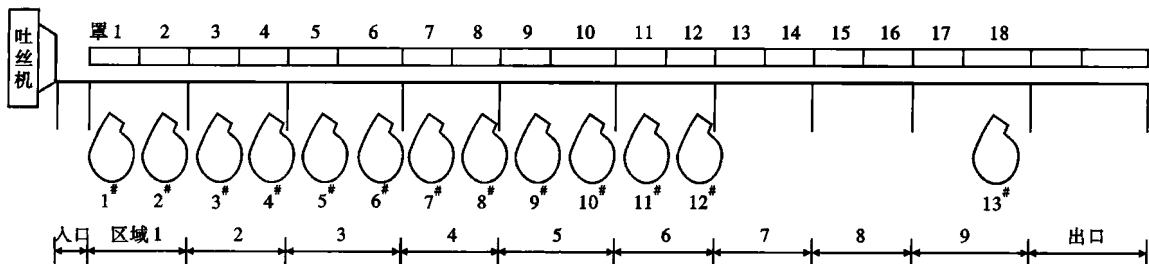


图 3 斯太尔摩风冷线布置图  
Fig. 3 Schematic layout of Stelmor wind-cooling line

3 总结

(1) 82A 高速线材理想的吐丝温度为 910 ~ 930 ℃ (±10 ℃), 随气候的变化适度调整。

(2) 相变过程中冷却速度理想范围为 9 ~ 12 ℃/s。风机的开启度对相变过程影响很大,应根据实际冷却速度动态调整冷却程序,使线材相变过程中温度保持稳定,即近似等温转变。

参考文献

1 程先舟. 高碳钢线材组织性能的研究. 轧钢, 2005, 22(4): 11  
2 陈连生, 狄国标, 任吉堂, 等. 热变形奥氏体 CCT 曲线实用化修正研究. 上海金属, 2006, 28(2): 21

3 Campbell P C, Hawbolt E B, Brimacombe J K. Application of Microstructural Engineering to the Controlled Cooling of Steel Wire Rod. CIM, Winnipeg, MB, Canada, 1987  
4 Maccagno T M, Jones J J, Hodgson P D. Spreadsheet Modelling of Grain Size Evolution during Rod Rolling. ISIJ International, 1996, 36(6): 33  
5 Kumar A, McCulloch C, Hawbolt E B, et al. Modelling Thermal and Microstructural Evolution on Runout Table of Hot Strip Mill. Materials Science and Technology, 1991, 7(4): 26  
6 张翔. 高碳钢 82B 线材的质量改进. 轧钢, 2001, 18(4): 20

王伯文(1984-), 男, 硕士研究生, 金属加工过程组织和性能控制。

收稿日期: 2009-05-19