

优质弹簧钢 60Si2CrVAT 控轧控冷工艺的热模拟研究

黄学启 刘雅政 崔娟

(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

摘要 用 Gleeble-1500 热模拟实验机测定了优质弹簧钢 60Si2CrVAT 的 CCT 曲线,并用光学显微镜和透射电镜研究了不同的终轧温度、冷却速度下的组织和相变。结果表明,冷速为 1 °C/s 时,弹簧钢 60Si2CrVAT 中的珠光体含量约为 98%;随着冷速的增加,铁素体和珠光体的含量逐渐减小,贝氏体和马氏体含量逐渐增加;当冷速达到 9 °C/s 时,基体全部为马氏体;终轧温度 850 °C、冷速为 1 °C/s 时,弹簧钢 60Si2CrVAT 的索氏体含量达到 90%,强塑性最好,即 R_m 1 301 MPa, $R_{p0.2}$ 928 MPa, A 23.8%, Z 38.6%。

关键词 弹簧钢 60Si2CrVAT 组织演变 CCT 曲线 控轧控冷

Thermal Simulation Study on Controlled Rolling and Cooling Process for Quality Spring 60Si2CrVAT

Huang Xueqi, Liu Yazheng and Cui Juan

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The continuous cooling transformation (CCT) curves, structure and phase transformation of quality spring steel 60Si2CrVAT with different finishing rolling temperature and cooling rate have been examined and studied by Gleeble-1500 thermal mechanical simulator, optical microscope and transmission electron microscope. Results showed that as cooling rate was 1 °C/s, the pearlite content in spring steel 60Si2CrVAT was about 98%; with increasing cooling rate the ferrite and pearlite content gradually decreased while bainite and martensite content increased; and as cooling rate was up to 9 °C/s, the matrix was all martensite. With finishing temperature 850 °C and cooling rate 1 °C/s, the sorbite content in spring steel 60Si2CrVAT was up to 90% with excellent strength and toughness i. e. R_m 1 301 MPa, $R_{p0.2}$ 928 Mpa, A 23.8% and Z 38.6%.

Material Index Spring Steel 60Si2CrVAT, Structure Evolution, CCT Curves, Controlled Rolling and Cooling

随着火车速度的提高,对铁路车辆用弹簧钢提出了更高的安全性指标,要求有更高的设计应力 and 更长的抗疲劳寿命^[1]。Si-Cr-V 系弹簧钢因具有优异的综合机械性能和极佳的抗松弛性能,故得到了广泛的研究与应用^[2,3]。本文研究了终轧温度与冷却速度对弹簧钢 60Si2CrVAT 相变和热轧材力学性能的影响。

1 实验材料及方法

实验用钢是取自 $\Phi 20$ mm 规格的弹簧钢 60Si2CrVAT 进精轧前坯料,其化学成分见表 1。

表 1 弹簧钢 60Si2CrVAT 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of spring steel 60Si2CrVAT /%

C	Si	Mn	Cr	V	P	S
0.56 ~ 0.64	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20	0.10 ~ 0.20	≤ 0.015	≤ 0.015

将实验材料加工成 $\Phi 6$ mm \times 15 mm 的热模拟圆柱形试样,首先在 Gleeble-1500 热模拟实验机上按如下工艺进行:以 10 °C/s 升温至 1 100 °C 保温

300 s 后,以 10 °C/s 冷至 900 °C 进行变形量为 30%、变形速率为 20 s⁻¹ 的第 1 道压缩变形,在间隙 1 s 后,再进行变形量为 30%、变形速率为 20 s⁻¹ 的第 2 道压缩变形,最后分别以不同冷速(0.5 ~ 15 °C/s)冷至室温,得出 60Si2CrVAT 钢的动态连续冷却转变曲线。

然后在 Gleeble-1500 热模拟实验机上进行终轧温度对 60Si2CrVAT 钢组织性能影响实验:将试样以 10 °C/s 的速度加热到 1 150 °C,保温 10 s 后以 10 °C/s 速度冷却到 950 °C,以 30% 变形量与 20 s⁻¹ 变形速率进行第 1 道次变形,保温 3 s 后,以 10 °C/s 冷却到不同终轧温度(750 ~ 900 °C),再以 10% 变形量和 20 s⁻¹ 变形速率进行第 2 道次变形,最后以 1 °C/s 的冷速冷至室温。用 HT-800 透射电镜分析不同终轧温度下的珠光体片层间距。

2 实验结果和分析

2.1 终轧温度对相变点的影响

由图 1 可见,提高终轧温度,导致奥氏体转变开始点、结束点均降低。这是由于随变形温度的降低,

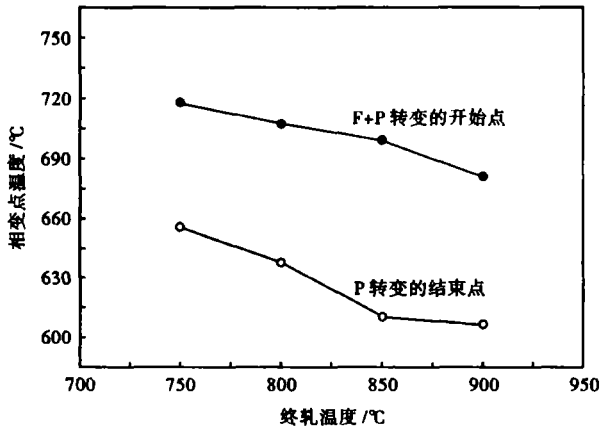


图 1 冷速为 1 °C/s 时终轧温度对弹簧钢 60Si2CrVAT 相变点温度的影响

Fig. 3 Effect of finishing rolling temperature on phase transformation temperature of spring steel 60Si2CrVAT with cooling rate 1 °C/s

温度补偿变形速率因子 Z 增大, 变形奥氏体平均晶粒尺寸变小, 其长大倾向变小, 即过冷度越小越有利于铁素体和珠光体形核, 缩短孕育期, 导致相变点升高。

2.2 冷却速度对组织结构的影响

从图 2 CCT 曲线及图 3 组织可以看出, 随着冷速的增加, 依次产生 F + P、F + P + B + M、P + B + M 混合组织和单一的 M 组织, 硬度依次增加。说明此钢种在实际生产中很难得到单一的贝氏体组织, 淬透性较高^[4]。在冷速为 0.5 °C/s 时, 铁素体的含量约为 4%。在冷速为 1 °C/s 时, 珠光体的含量达到

最大, 约为 98%, 铁素体转变温度区间为 700 ~ 683 °C, 珠光体转变温度区间为 683 ~ 620 °C。当冷速为 2 °C/s 时, 铁素体已基本转变结束, 同时出现了上贝氏体和针状马氏体组织。在冷速为 3 °C/s 时, 贝氏体含量达到最大, 羽毛状贝氏体非常明显地从晶界向晶内生长。当冷速大于 9 °C/s 时, 组织转变全部为马氏体组织, 马氏体相变点 Ms 大约在 297 °C。

2.3 终轧温度对组织性能的影响

图 4 可见, 在冷却速度为 1 °C/s 下, 不同终轧温度下组织主要是索氏体。终轧温度在 900 ~ 750 °C 时, 先共析铁素体的含量变化不显著, 基本上呈细

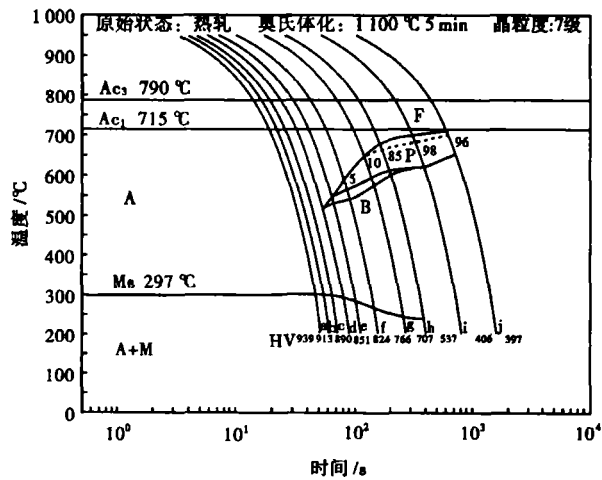


图 2 弹簧钢 60Si2CrVAT 的 CCT 曲线 Fig. 1 CCT curves of spring steel 60Si2CrVAT

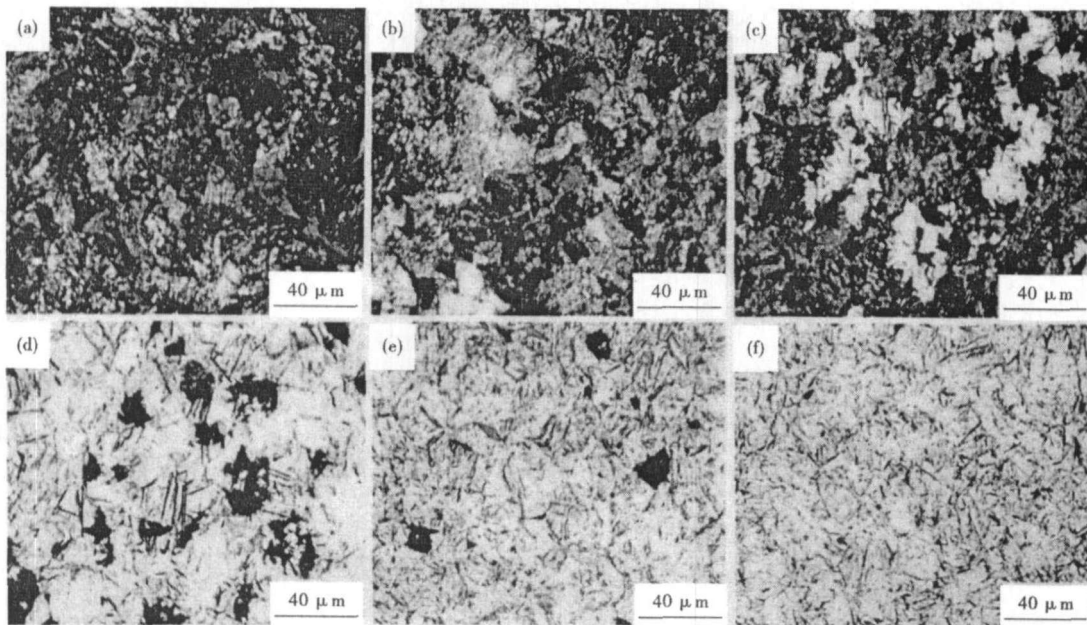


图 3 弹簧钢 60Si2CrVAT 的组织: 冷却速度 / (°C · s⁻¹): (a) 0.5; (b) 1; (c) 2; (d) 3; (e) 5; (f) 9 Fig. 2 Structure of spring steel 60Si2CrVAT at cooling rate / (°C · s⁻¹) 0.5(a), 1(b), 2(c), 3(d), 5(e) and 9(f)

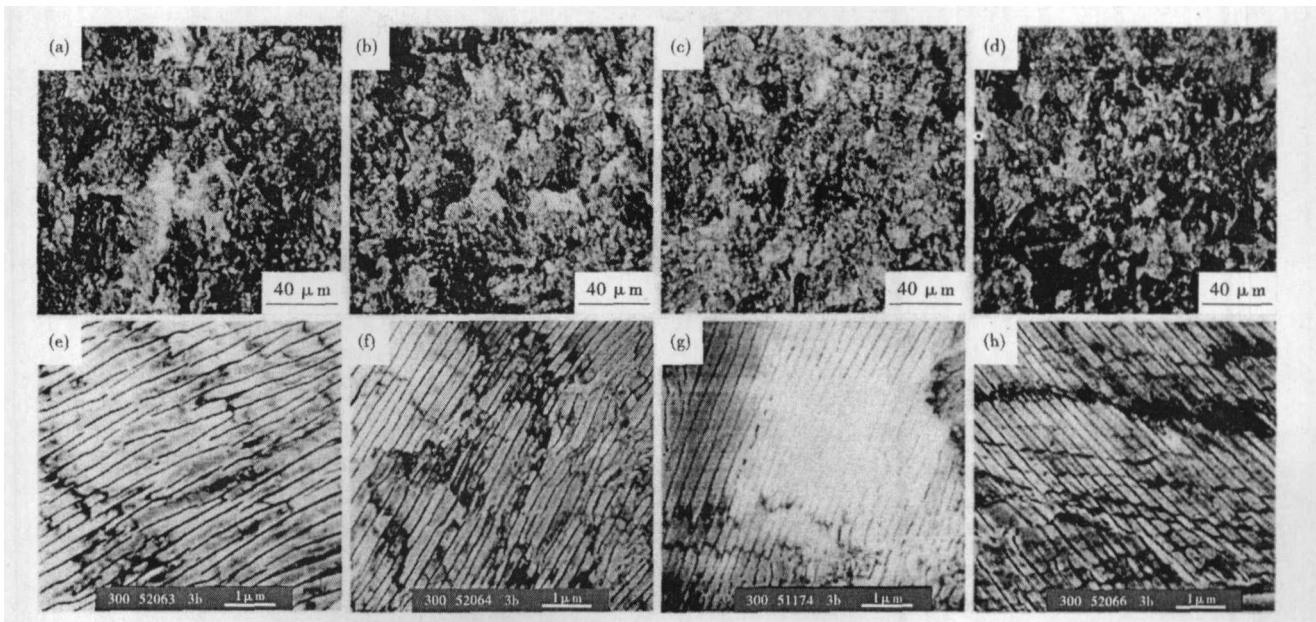


图4 60Si2CrVAT 弹簧钢冷却速度为 1 °C/s 不同终轧温度下的组织 (a)、(b)、(c)、(d) 和珠光体片层间距 (e)、(f)、(g)、(h): (a)(e) 900 °C; (b)(f) 850 °C; (c)(g) 800 °C; (d)(h) 750 °C

Fig. 4 Structure (a, b, c, d) and pearlite interlamellar spacing (e, f, g, h) of spring steel 60Si2CrVAT with cooling rate 1 °C/s and finishing rolling temperature 900 °C (a, e), 850 °C (b, f), 800 °C (c, g) and 750 °C (d, h)

小块状零星分布在奥氏体晶界上,但珠光体球团随着终轧温度的降低逐渐趋于均匀化,虽然边部出现了极少量的贝氏体组织,但珠光体片层间距减小,索氏体含量增加,特别是在终轧温度为 850 °C 时,索氏体含量达到了 90%。在终轧温度为 750 °C 时,奥氏体的晶粒细化,单位体积内晶界面积增加,因此晶界形核的数量必然增大,先共析铁素体的总量增加,但是该工艺下的组织均匀性较差,主要表现在先共析铁素体晶粒尺寸存在明显的差异,其大部分仍然是以块状分布,但有的区域已连成了细长的网状铁素体。

在中碳弹簧钢热轧材组织中,索氏体和先共析铁素体的百分含量是影响强度和塑性指标的关键^[5]。珠光体片层间距越小,强度和塑性越高,当冷速 1 °C/s,随终轧温度的降低,热轧材先共析铁素体量略有增加;但终轧温度为 850 °C 时,晶粒尺寸均匀细小及珠光体片层间距减少使强度提高,索氏体比例增大使塑性增加(表2)。终轧温度 800 °C 时,

表2 冷却速度为 1 °C/s 时终轧温度对弹簧钢 60Si2CrVAT 力学性能的影响

Table 2 Effect of finishing rolling temperature on mechanical properties of spring steel 60Si2CrVAT with cooling rate 1 °C/s

终轧温度/°C	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
900	1 295	865	13.5	27.75
850	1 301	928	23.8	38.60
800	1 327	931	22.8	33.30
750	1 319	910	24.0	38.60

由于边部产生了少量的贝氏体组织,使得延伸率和断面收缩率显著下降。

根据本实验结果,生产铁路用优质弹簧钢 60Si2CrVAT 终轧温度选择在 850 °C 左右。

3 结论

60Si2CrVAT 钢终轧温度 850 °C、冷却速度 1 °C/s 时,晶粒尺寸均匀细小及珠光体片层间距减少,使强度提高;索氏体含量为 90%,强韧性最好。

北京市科技计划基金资助项目(D0404001040221)

参考文献

- 孙小桦. 铁路型弹条用钢的研究与开发. 新疆钢铁, 2004, 2(90): 1
- 张炼, 杨思齐, 郇振声. 高强度弹簧钢 60Si2CrVA 的性能. 机械工程材料, 1992, 8(91): 35
- Li D M, Kim K W, Lee C S. Low Cycle Fatigue Data Evaluation for a High-strength Spring Steel. Materials Science and Engineering, 1997(19): 607
- Nam W J, Lee C S, Ban D Y. Effects of Alloy Additions and Tempering Temperature on the Sag Resistance of Si-Cr Spring Steels. Materials Science and Engineering, 2000, A289: 8
- 张杨, 官心勇, 赵宏敏. 60Si2CrVA 弹簧钢热处理工艺及性能研究. 天津理工学院学报, 2003, 19(1): 69

黄学启(1978-), 男, 硕士研究生, 高强度优质弹簧钢的研究与开发。

收稿日期: 2007-05-31