

## 变形温度对弹簧钢 55SiCrA 组织和性能的影响

肖金福 刘雅政 孙小军 吕鹏

(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

**摘要** 通过 Gleeble-1500 热/力模拟试验机,采用光学、电子显微技术及力学测试等方法,研究了 800 ~ 950 °C 变形温度对汽车悬架用弹簧钢 55SiCrA ( % : 0.56C, 1.42Si, 0.68Cr) 组织和性能的影响。结果表明,随着变形温度的提高,相变开始温度和相变结束温度均逐渐下降,珠光体片层间距逐渐减小,变形温度为 850 ~ 900 °C 时,珠光体片层间距为 130 ~ 140 nm,抗拉强度为 1 075 ~ 1 090 MPa,断面收缩率 43.5% ~ 44.0%,综合力学性能最佳。

**关键词** 弹簧钢 55SiCrA 变形温度 组织 力学性能

## Effect of Deforming Temperature on Structure and Properties of Spring Steel 55SiCrA

Xiao Jinfu, Liu Yazheng, Sun Xiaojun and Lü Peng

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

**Abstract** The effect of deforming temperature 800 ~ 950 °C on structure and mechanical properties of steel 55SiCrA ( % : 0.56C, 1.42Si, 0.68Cr) for auto suspension spring has been studied by Gleeble-1500 thermo/mechanical simulator and using optical, electron microscopy and mechanical property test. Results show that with increasing deforming temperature, the starting and finishing temperature of pearlite transformation gradually drop and the spacing of lamellar in pearlite decreases; with deforming temperature 850 ~ 900 °C, the spacing of lamellar in pearlite is 130 ~ 140 nm, and the steel has best comprehensive mechanical properties i. e. tensile strength 1 075 ~ 1 090 MPa with reduction of area 43.5% ~ 44.0%.

**Material Index** Spring Steel 55SiCrA, Deforming Temperature, Structure, Mechanical Property

在高速线材生产时,控制终轧温度和相变时的冷却速度是决定弹簧钢成品线材组织性能的主要措施。利用 Gleeble-1500 热/力模拟试验机研究了终轧温度对高强度优质弹簧钢 55SiCrA 相变规律、显微组织、珠光体片层间距和力学性能的影响。

### 1 试验材料及方法

试验用钢取自高线厂生产的弹簧钢 55SiCrA 进精轧前的棒料,化学成分如表 1 所示。热模拟试样工作直径  $\Phi 6$  mm,标距 15 mm。

表 1 试验材料的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of test steel / %

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.56	1.42	0.68	0.68	0.014	0.007

在 Gleeble-1500 热模拟试验机上对试样进行压缩变形。具体工艺如下:试样以 10 °C/s 的速度加热到 1 100 °C,保温 5 min,以 10 °C/s 的速度冷至变形温度  $T$ ,变形温度分别为 800、850、900、950 °C。采取两次变形,变形量分别为 35% 和 30%,变形速率为 20 s<sup>-1</sup>,间隙时间 1 s,变形后以 2 °C/s 的速度冷

却到室温。

将变形后的热模拟试样从垂直于轴向的方向切开,制成金相试样和透射电镜试样,利用 LEICA NEOPH-21 型金相显微镜和 H-800 型透射电镜对不同终轧温度下的金相组织和珠光体片层间距进行观测。每个试样随机观察 10 个视场,在每个视场中选取 5 组珠光体片层进行珠光体片层间距的测量,计算出每个试样珠光体片层间距的平均值  $d_1$ ,由于各珠光体片层取向与金相磨面以各自不同的角度相截,因此应根据  $d = 2 \times d_1 / \pi$  计算珠光体平均片层间距的真实值  $d^{[1]}$ 。拉伸试样按实验工艺模拟完毕后,将试样的变形部位重新加工成非比例拉伸试样,平行段的直径 6 mm,平行段长度 7 mm,标距 6 mm,过渡圆弧半径 5 mm,在 WAW-500 电液伺服万能试验机上测试其力学性能。

### 2 试验结果及讨论

#### 2.1 不同变形温度对 55SiCrA 相变点的影响

由图 1 可见,随着变形温度的降低,奥氏体向珠光体转变的开始点温度和结束点温度上升。变形温度 950 °C 时,相变开始温度为 698 °C,相变结束温度为 632 °C;变形温度 800 °C 时,相变开始温度为 720

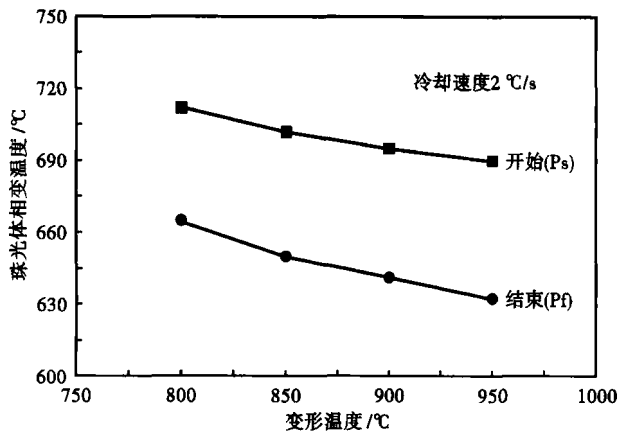


图 1 变形温度对 55SiCrA 钢珠光体相变温度的影响  
Fig. 1 Effect of deforming temperature on pearlite transformation temperature of steel 55SiCrA

℃, 相变结束温度为 665 ℃。与 950 ℃ 变形时相比, 800 ℃ 变形时相变开始温度提高约 22 ℃, 相变结束温度提高约 33 ℃。

奥氏体变形后会增加晶粒的“碎化”程度, 形成了许多附加界面, 变形温度越低, 回复和再结晶越弱, 缺陷密度和晶粒的“碎化”程度越大<sup>[2]</sup>, 相当于增加了形核面积, 使相变形核率增加, 从而使得相变

开始点提高。

另外, 高温奥氏体变形后, 晶体结构中缺陷密度得到了增加, 能够加速原子的扩散速度, 从而使珠光体转变速度增加, 因而使得相变结束温度升高, 并且变形温度越低, 塑性变形对珠光体转变的加速作用越明显, 因此相变结束温度的升高随着变形温度的降低有加速的趋势。

### 2.2 变形温度对 55SiCrA 组织结构的影响

不同变形温度下显微组织的变化如图 2 所示, 用 Image tool 软件对显微组织的面积含量进行分析; 不同变形温度下珠光体形貌如图 3 所示。

冷却速度为 2 ℃/s 时, 试验钢在不同变形温度的室温组织为先共析铁素体 (F) + 珠光体 (P), 随着变形温度的降低, 铁素体面积分数逐渐增多, 索氏体 (S) 面积分数逐渐减少。变形温度 950 ℃ 时, 铁素体面积分数为 4%, 索氏体面积分数为 82%, 而当变形温度 800 ℃ 时, 铁素体面积分数为 10%, 索氏体面积分数为 76%。

由表 2 可知, 随着变形温度的降低, 试验钢的珠光体平均片层间距逐渐增大。变形温度 950 ℃ 时,

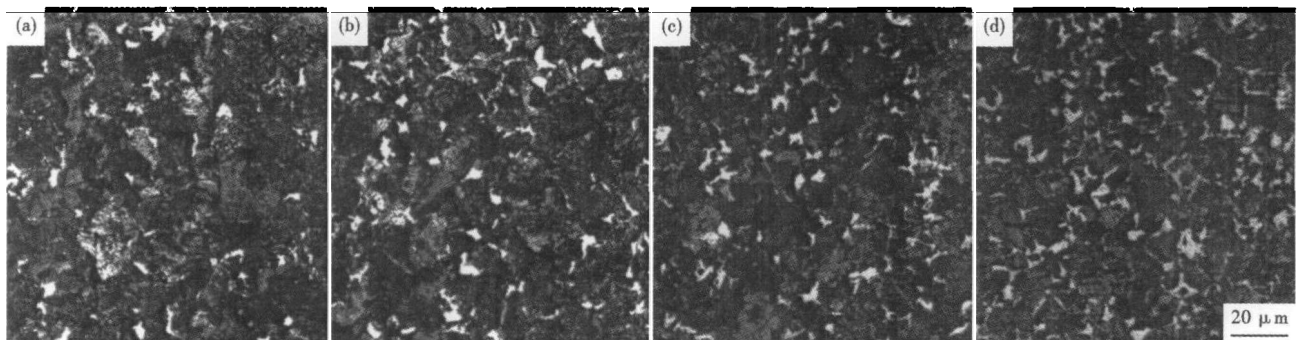


图 2 弹簧钢 55SiCrA 的组织形貌: 冷却速度 2 ℃/s, 变形温度 / °C (a) 950; (b) 900; (c) 850; (d) 800  
Fig. 2 Structure morphology of spring steel 55SiCrA; deforming temperature 950 ℃ (a), 900 ℃ (b), 850 ℃ (c), and 800 ℃ (d); cooling rate 2 ℃/s

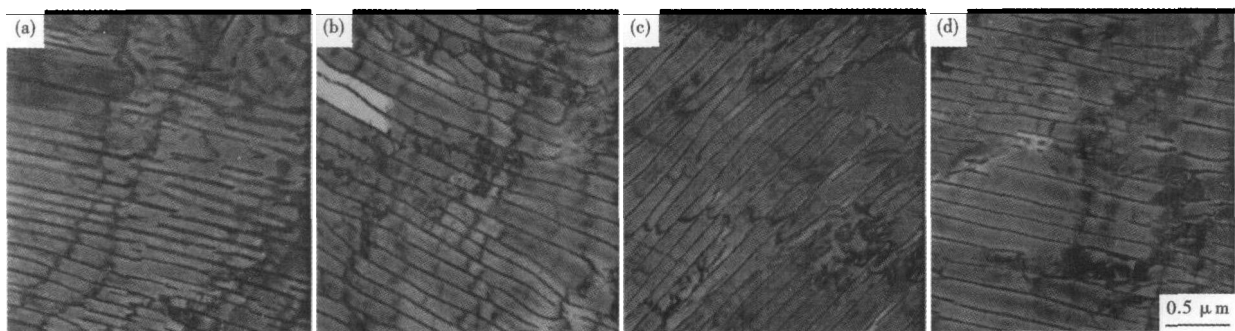


图 3 弹簧钢 55SiCrA 的珠光体片层间距, TEM: 冷却速度 2 ℃/s, 变形温度 / °C (a) 950; (b) 900; (c) 850; (d) 800  
Fig. 3 Spacing of lamellar in pearlite of spring steel 55SiCrA, TEM: deforming temperature 950 ℃ (a), 900 ℃ (b), 850 ℃ (c), and 800 ℃ (d); cooling rate 2 ℃/s

表 2 变形温度对弹簧钢 55SiCrA 组织结构的影响  
Table 2 Effect of deforming temperature on structure component of spring steel 55SiCrA

变形温度/ ℃	金相组织含量/%			珠光体片层间距/ nm
	P	S	S	
950	14	4	82	115
900	15	6	79	130
850	13	8	79	140
800	14	10	76	150

珠光体平均片层间距为 115 nm, 而当变形温度 800 ℃ 时, 珠光体的平均片层间距为 150 nm。

在同一冷却速度下, 随着变形温度的降低, 珠光体转变开始点和结束点向高温侧移动, 使得珠光体平均相变温度提高, 相变温度的改变必然要产生过冷度的变化。由于珠光体片间距大小和过冷度成反比, 因而使得珠光体片间距增大。同时, 变形温度越低, 奥氏体回复和再结晶越弱, 晶体结构中缺陷密度越多, 越有利于奥氏体中碳的扩散, 珠光体长大速度越快, 这也会促使珠光体平均片层间距变大。

### 2.3 变形温度对 55SiCrA 力学性能的影响

由图 4 可见, 抗拉强度随着变形温度的降低而降低, 断面收缩率的变化较为复杂, 随着变形温度的降低先升高后降低, 当变形温度 850 ~ 900 ℃ 时, 断面收缩率较高。

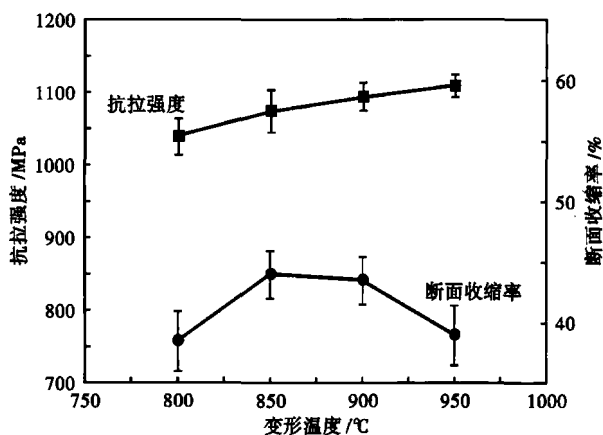


图 4 变形温度对弹簧钢 55SiCrA 的力学性能的影响, 冷却速度 2 ℃/s

Fig. 4 Effect of deforming temperature on mechanical properties of spring steel 55SiCrA, cooling rate 2 ℃/s

珠光体钢的强度与珠光体片层间距之间存在一个 Hall-Petch 关系式<sup>[3]</sup>, 即全珠光体组织钢的抗拉强度可以由下式表示:

$$\sigma_n = \sigma_i + KS^{-1/2} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_n$ - 钢的抗拉强度/MPa;  $\sigma_i$ - 与材料有关的常

数/MPa; K- 系数/MPa ×  $\mu\text{m}^{-1/2}$ ; S- 珠光体片层间距/ $\mu\text{m}$ 。

由公式(1)可知, 珠光体钢的抗拉强度与  $S^{-1/2}$  呈线性关系, 即片层间距越小, 抗拉强度越高。

珠光体类型钢的塑性由珠光体球团大小和珠光体片层间距二者决定<sup>[4,5]</sup>, 珠光体球团随着奥氏体晶粒的细化而细化。变形温度低时, 珠光体片层间距较大, 降低了珠光体钢的塑性; 变形温度高时, 奥氏体晶粒粗大, 从而珠光体球团粗大, 同样也会降低珠光体钢的塑性。因此当变形温度 850 ~ 900 ℃ 时, 断面收缩率获得极大值, 塑性最佳。

根据本实验结果, 弹簧钢 55SiCrA 最佳终轧温度应选择 850 ~ 900 ℃, 辅以合适的冷却速度, 可以获得细小的珠光体球团及高的索氏体含量, 细小的珠光体片层间距, 从而获得良好的综合性能。

### 3 结论

(1) 随着变形温度的降低, 55SiCrA 钢的奥氏体向珠光体转变的开始点温度和结束点温度上升, 组织中 ferrite 体面积分数逐渐增多, 索氏体面积分数逐渐减少。

(2) 55SiCrA 的珠光体平均片层间距随着变形温度的降低逐渐增大, 变形温度为 950 ℃ 时, 珠光体平均片层间距为 115 nm, 而当变形温度为 800 ℃ 时, 珠光体的平均片层间距为 150 nm。

(3) 55SiCrA 抗拉强度随着变形温度的降低而降低, 断面收缩率随着变形温度的降低先升高后降低, 变形温度为 850 ~ 900 ℃ 时, 抗拉强度为 1 075 ~ 1 095 MPa, 断面收缩率 43.5% ~ 44.0%, 综合力学性能最佳。

### 参考文献

- 1 沈逢详, 郁珊华. 钢中珠光体片层间距的测量. 物理测试, 1989, (3): 32
- 2 李明, 樊郁生, 刘景荣, 等. 控制轧制对高碳钢珠光体相变温度的影响. 东北工学院学报, 1991, 12(1): 44
- 3 Kazeminezhad M, Taheri A K. The Effect of Controlled Cooling After Hot Rolling on the Mechanical Properties of a Commercial High Carbon Steel Wire Rod. Materials and Design, 2003, 24: 415
- 4 Ettore Anelli. Application of Mathematical Modeling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars. ISIJ International, 1992, 32(3): 440
- 5 刘永铨. 钢的热处理. 北京: 冶金工业出版社, 1987

肖金福(1971-), 男, 博士研究生, 工程师, 1994 年北京科技大学毕业, 弹簧钢、易切削钢工艺研究。

收稿日期: 2009-09-28