

离合器弹簧用钢 65Si2CrV 的连续冷却转变曲线

徐志东 任安超 曾 彤 夏念平 肖 斌 杨志婷  
(武汉钢铁(集团)研究院,武汉 430080)

**摘 要** 实验用弹簧钢 65Si2CrV( /% :0.66C,1.43Si,0.74Mn,0.007P,0.008S,0.68Cr,0.11V)由 25 kg 真空感应炉冶炼,并轧成 16 mm×300 mm 扁坯。通过 Gleeble-2000 热模拟试验机,利用膨胀法结合金相分析以及显微硬度,获得弹簧钢 65Si2CrV 的静态连续冷却转变曲线(CCT 曲线),并得出 0.2~10 ℃/s 冷却速度时的相变温度;当冷却速度由 1 ℃/s 增至 5 ℃/s 时 HV10 硬度值急剧增加,由 380 增加至 800。  
**关键词** 弹簧钢 65Si2CrV 连续冷却转变曲线 组织 显微硬度

Continuous Cooling Transformation Curves of Spring Steel 65Si2CrV for Clutch

Xu Zhidong, Ren Anchao, Zeng Tong, Xia Nianping, Xiao Bin and Yang Zhiting  
(Research and Development center, Wuhan Iron and Steel Group, Wuhan 430080)

**Abstract** The tested spring steel 65Si2CrV ( /% : 0.66C, 1.43Si, 0.74Mn, 0.007P, 0.008S, 0.68Cr, 0.11V ) is melted by 25 kg vacuum induction furnace and rolled to 16 mm×300 mm slab. The static continuous cooling transformation (CCT) curves of spring steel 65Si2CrV is obtained by Gleeble-2000 thermal simulation testing machine using dilatometry combined with metallographic analysis and microhardness test, and the phase temperature of steel cooled with 0.2~10 ℃/s is gotten, as cooling rate increases from 1 ℃/s to 5 ℃/s the HV10 microhardness value of steel dramatically increases from 380 to 800.  
**Material Index** Spring Steel 65Si2CrV, Continuous Cooling Transformation Curves, Structure, Microhardness

轻量化设计已成为汽车行业的发展方向,汽车弹簧也将朝着经济型、高性能方向发展<sup>[1]</sup>,据统计,2015 年全国乘用车销售量达到1 800万辆,相对应的悬架簧市场总需求超过7 000万件,而目前,满足高档车配套需求的高品质悬架弹簧线材却主要通过国外进口,因此,研究国产化高端弹簧钢具有重要意义<sup>[2]</sup>。65Si2CrV 弹簧钢是一种高硬度、耐高应力、耐高温(300~350 ℃)的离合器、气门弹簧用钢。本文对 65Si2CrV 弹簧钢的静态连续冷却转变 CCT 曲线进行了研究<sup>[3]</sup>。

1 实验材料与方法

实验材料为中试工厂 25 kg 真空感应炉冶炼的弹簧钢锭,化学成分如表 1 所示。钢锭大头直径 150 mm,小头直径 80 mm,高度约 240 mm,在 800 热轧机轧制成 16 mm×300 mm 的扁坯,按照 YB/T5128-1993 的要求,取样机加工成 Φ3 mm×10 mm 的圆柱形热模拟试样。在 Gleeble-2000 型热模拟实

表 1 实验弹簧钢 65Si2CrV 的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of tested spring steel 65Si2CrV / %

|      |      |      |       |       |      |      |
|------|------|------|-------|-------|------|------|
| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | V    |
| 0.66 | 1.43 | 0.74 | 0.007 | 0.008 | 0.68 | 0.11 |

验机上将试样以 10 ℃/s 的升温速度加热到奥氏体温度(900 ℃)并保温 10 min,使得试样充分奥氏体化,然后分别以 0.2,0.5,1,2,3,5,10,20,30,60 ℃/s 等 10 种不同冷却速率冷至室温,采集温度、膨胀量以及时间对应的数据,绘制出静态 CCT 曲线;热模拟后的试样在莱卡 Dmi5000 型光学显微镜下观察金相组织;用 FV-700 型半自动数据维氏硬度计在试样的心部测量显微硬度值(HV10)。

2 实验结果

2.1 弹簧钢 65Si2CrV 的相变临界点

当钢发生固态相变时,由于新旧两相的结构不同、比热容不同,材料的体积将发生不连续的变化,因而热膨胀曲线在相变发生的温度处会形成拐点,因此可以根据热膨胀曲线上拐点来确定相变温度,即钢的固态相变临界点<sup>[4]</sup>。

图 1 可以看出,膨胀曲线上有 637、660 ℃ 两个拐点,奥氏体向珠光体转变(A→P),结合图 2(a)的金相组织,试样冷却后的组织为珠光体,因此可以确定珠光体转变开始温度为 660 ℃,结束温度为 637 ℃。同样按照此方法可以确定出该钢其他冷速下的转变温度。

## 2.2 组织

上述的膨胀法只能从各类曲线上分析奥氏体转变产物的类型和数量,不能进行直接观察,尤其是某些关键位置,由于转变数量少导致转变点不明显时,测量的准确度将受到影响。金相分析法作为膨胀法的一个有效补充和必要的手段,可以直接进行观察,根据金相分析结果,提高测量准确度。弹簧钢 65Si2CrV 在不同冷却温度下的组织形貌见图 2,表 2 为该钢相变温度及组织。

## 2.3 CCT 曲线的绘制及讨论

测量出各冷却速度下拐点所对应的时间和温度,按照 YB/T5128-1993 的要求,以时间对数为横坐标,温度为纵坐标,利用 origin8.0 软件将不同冷却速度下各相变点用圆滑的曲线连接,并标明转变组织类型、 $Ac_3$ 、 $Ac_1$ 、 $Ms$  相变点的临界值以及显微硬度值,就可以绘画出该钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线,即静态 CCT 曲线,如图 3 所示。

由图 3 可以看出,弹簧钢 65Si2CrV 仅存在珠光体转变区和马氏体转变区,无铁素体、贝氏体转变

区。因为合金元素铬和钒是中强碳化物形成元素,它们强烈推迟珠光体和贝氏体转变,尤其是对贝氏体转变的推迟和抑制作用更加显著,同时,非碳化物形成元素硅增加了过冷奥氏体的稳定性,强烈的抑制贝氏体的转变,两者叠加的作用,使得该转变曲线

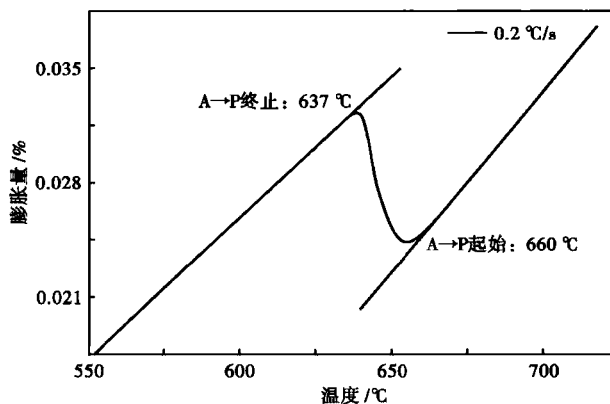


图 1 冷却速度 0.2 °C/s 时实验弹簧钢 65Si2CrV 的膨胀曲线  
Fig. 1 Dilatation curve of tested spring steel 65Si2CrV with cooling rate 0.2 °C/s

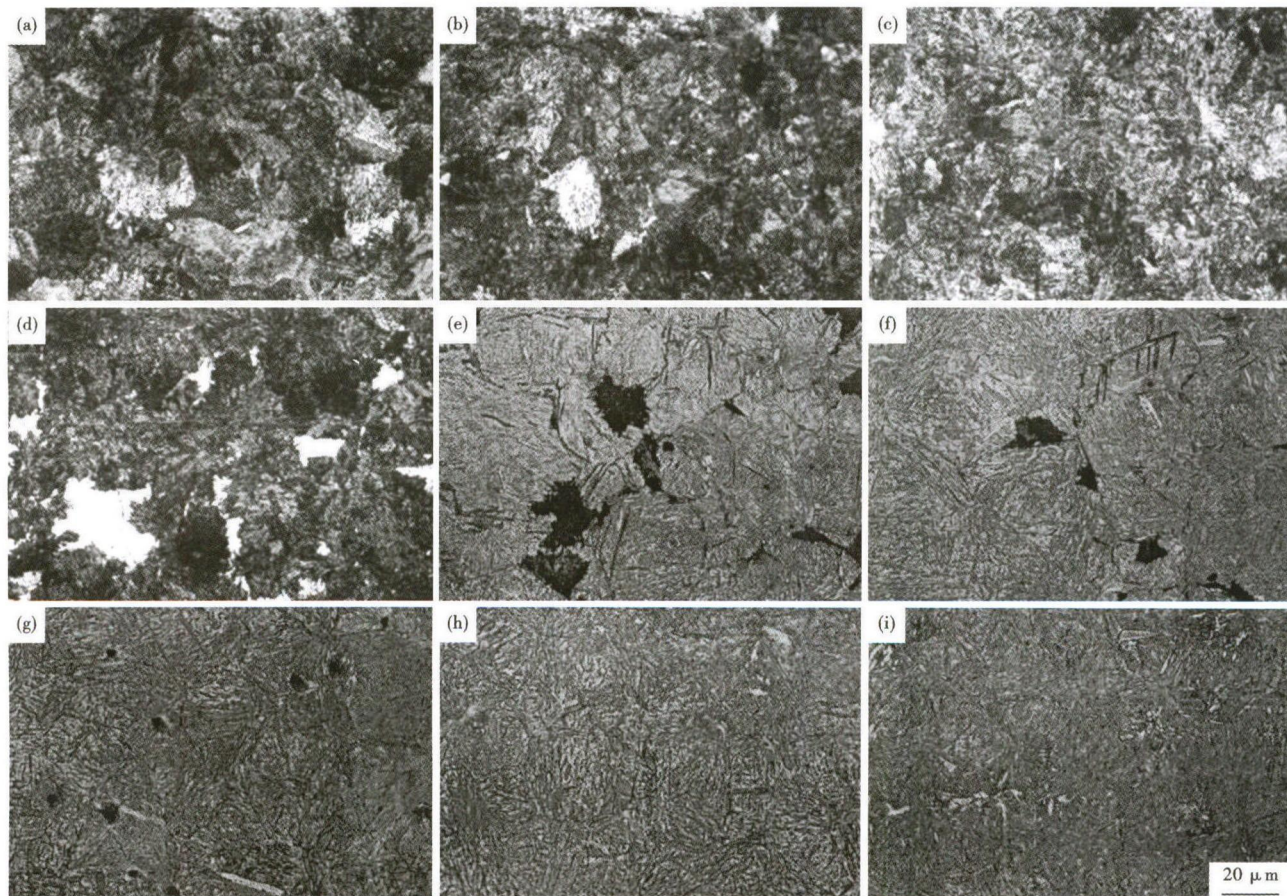


图 2 实验弹簧钢 65Si2CrV 的组织形貌,冷却速率/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ):(a)0.2;(b)0.5;(c)1;(d)2;(e)3;(f)5;(g)10;(h)30;(i)60

Fig. 2 Morphology of structure of tested spring steel 65Si2CrV, cooling rate /( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) 0.2; (b) 0.5; (c) 1; (d) 2; (e) 3; (f) 5; (g) 10; (h) 30; (i) 60

表 2 实验弹簧钢 60Si2CrV 的相变温度及组织  
Table 2 Phase transformation temperature and structure of tested spring steel 60Si2CrV

| 冷却速度/<br>( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | A→P 起始/ $^{\circ}\text{C}$ | A→P 终止/ $^{\circ}\text{C}$ | Ms/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 0.2                                                 | 660                        | 637                        | -                      |
| 0.5                                                 | 662                        | 635                        | -                      |
| 1                                                   | 649                        | 610                        | -                      |
| 2                                                   | 611                        | 528                        | 190                    |
| 3                                                   | 560                        | 517                        | 203                    |
| 5                                                   | 519                        | 500                        | 211                    |
| 10                                                  | 484                        | 482                        | 237                    |
| 20                                                  | -                          | -                          | 236                    |
| 30                                                  | -                          | -                          | 240                    |
| 60                                                  | -                          | -                          | 243                    |

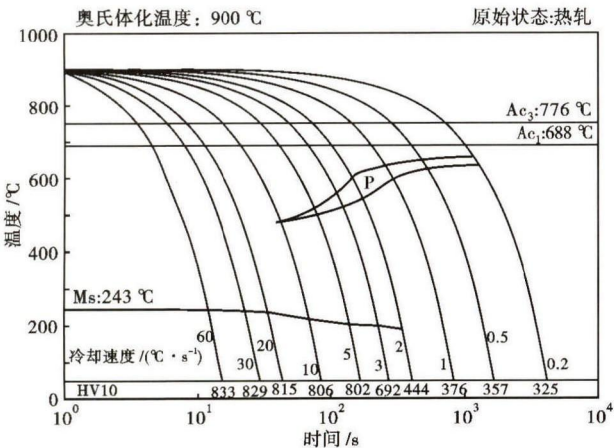


图 3 实验弹簧钢 65Si2CrV 的连续冷却转变曲线  
Fig. 3 Continuous cooling transformation curves of tested spring steel 65Si2CrV

无贝氏体转变区<sup>[5]</sup>。结合图 2, 当冷却速度为 0.2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 由于冷却速度较慢, 获得的组织为粗大的珠光体, 索氏体化只有 80%。随着冷却速度的增大, 过冷度逐渐增加, 使得转变的孕育期缩短, 过冷奥氏体稳定性降低, 得到晶粒细小的组织, 索氏体化增加, 冷却速度在 1  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 索氏体化达到 95%。当冷却速度达到 2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 过冷奥氏体已开始向马氏体转变, 出现了少量的马氏体组织, 索氏体化为 90%; 随着冷却速度的增大, 马氏体含量不断增加, 当冷却速度在 20  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 组织全部为马氏体。

2.4 冷却速度与硬度的关系

图 4 为实验钢在各冷却速率下的显微硬度值 (HV10)。试样在冷却速度分别为 0.2, 2, 20  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  下冷却时, 金相组织为索氏体 + 珠光体、索氏体 + 马氏体 (少量)、马氏体, 硬度值分别为 325、444、815, 组织与硬度相符。从图 4 可以看出, 随着冷却速率的增加, 钢的显微硬度值 (HV5) 也逐渐的增大, 特

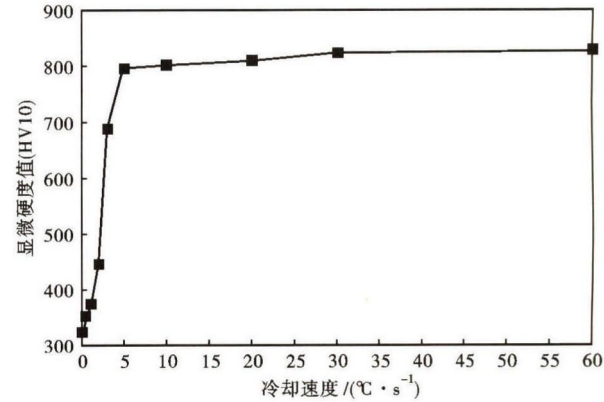


图 4 实验弹簧钢 65Si2CrV 的冷却速度对显微硬度的影响  
Fig. 4 Effect of cooling rate on microhardness of tested spring steel 65Si2CrV

别是冷却速度大于 2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  后, 增加幅度明显, 显微硬度值从 380 增加至 800。

3 结论

(1) 900  $^{\circ}\text{C}$  奥氏体化条件下, 在静态 CCT 图上弹簧钢 65Si2CrV 仅存在珠光体转变区和马氏体转变区, 无铁素体、贝氏体转变区。

(2) 弹簧钢 65Si2CrV 的显微硬度值 (HV10) 随着冷却速率的增加, 逐渐增大, 特别大于 2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的冷却速度, 增加幅度尤为明显。

(3) 在盘条批量生产过程中, 宜采用低温轧制技术 + 延迟型斯太尔摩冷却 (加保温辊道), 均热段温度 1 050  $^{\circ}\text{C}$ , 终轧温度 850  $^{\circ}\text{C}$ , 同时还需严格防止未完全转变的红热盘条在集卷过程中吹风, 造成冷却速度过快, 形成局部马氏体组织。

参考文献

[1] 徐德祥, 尹钟大. 弹簧钢高强度化及合金元素的作用[J]. 金属热处理, 2003, 28(12): 30-36.  
[2] 付俊岩. 汽车零部件用高品质特殊钢技术的最新发展[J]. 汽车工程, 2009, 31(5): 407-413.  
[3] 林慧国, 傅代直. 钢的奥氏体转变曲线[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 30-36.  
[4] 徐光, 王巍, 张鑫强, 等. 金属材料 CCT 曲线测定及绘制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 142.  
[5] 吴承建, 陈国良, 强文江, 等. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 15-16.

徐志东 (1985-), 男, 硕士生 (武汉大学), 工程师, 武汉大学 (本科) 毕业, 棒线材产品研发。  
E-mail: hbwhpyj@163.com

收稿日期: 2016-03-07