

## 热轧工艺参数对非调质钢 F45MnV 力学性能的影响

张英建 惠卫军 董瀚

(钢铁研究总院先进钢铁材料技术国家工程研究中心,北京 100081)

**摘要** 用热模拟实验机 Gleeble-1500 模拟了 F45MnV 钢(0.44C、1.18Mn、0.10V)热轧过程中的加热、轧制及冷却参数。通过实验发现,加热温度由 950 °C 增至 1 100 °C,钢中奥氏体平均晶粒尺寸由 25.7 μm 增加至 84.3 μm;加热温度为 1 000 ~ 1 050 °C 时,奥氏体晶粒尺寸为 64.0 ~ 62.8 μm,在该温度范围内轧制,有利于钢的质量控制和保证性能的稳定;随冷速由 0.25 °C/s 增加至 2 °C/s,变形量 70% 900 °C,终轧的 F45MnV 钢的抗拉强度由 815 MPa 迅速提高至 960 MPa。

**关键词** 非调质钢 F45MnV 热轧工艺参数 热模拟

## Effect of Hot Rolling Parameters on Mechanical Properties of Non-Quenched and Tempered Steel F45MnV

Zhang Yingjian, Hui Weijun and Dong Han

(National Engineering Research Center of Advanced Steel Technology, Central Iron and steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The parameters of heating, rolling and cooling of steel F45MnV steel (0.44C, 1.18Mn, 0.10V) during hot rolling have been simulated by thermal simulator Gleeble-1500. It was found by test that with heating temperature increasing from 950 °C to 1 100 °C the austenite grain size in steel increased from 25.7 μm to 84.3 μm; with heating temperature at 1 000 ~ 1 050 °C the austenite grain size was 64.0 ~ 62.8 μm, it is available to control quality and ensure stable properties of steel rolled at the temperature range; with cooling rate increasing from 0.25 °C/s to 2 °C/s, the tensile strength of steel F45MnV rolled with deformation 70% and finish rolling at 900 °C increased from 815 MPa to 960 MPa.

**Material Index** Non-Quenched and Tempered Steel F45MnV, Hot Rolling Parameter, Thermal Simulation

F45MnV 是一种热锻用非调质钢,主要用来生产车用轴类零件和发动机连杆。随着国内生产工艺逐渐由电弧炉冶炼→转炉冶炼<sup>[1,2]</sup>,轧制设备也进行了相应的更新,控轧、控冷手段得到改善。为能够适应冶炼工艺和轧制设备的调整,并为轧制工艺的制定提供参考依据,利用热模拟实验对 F45MnV 钢轧制过程的加热制度、轧制工艺和冷却条件进行模拟,以确定其对组织和性能的影响。

### 1 实验工艺

实验选择国内钢厂生产的商业用非调质钢棒材,化学成分(%)为:0.44C、0.40Si、1.18Mn、0.011P、0.050S 和 0.10V。

热模拟试样在棒材横截面 1/2 半径处取样,试样尺寸为:Φ8 mm × 15 mm,加热温度、变形实验和冷却速度实验工艺为:

(1) 加热温度:试样以 15 °C/s 速度,加热至 950 ~ 1 100 °C 等温 10 min,水淬。

(2) 变形实验:试样加热至 1 000 °C 等温 10 min 后,冷至 850 ~ 950 °C 进行压缩变形,变形量为 10% ~ 70%,以 0.5 °C/s 冷至 580 °C,随后以 1 °C/s

冷却至室温。

(3) 冷却速度:试样加热至 1 000 °C 等温 10 min 后,冷却至 900 °C 进行压缩变形,变形量为 70%,试样变形后以 0.25 ~ 2 °C/s 冷至 580 °C,随后以 1 °C/s 冷却至室温。

实验结束后,将试样沿中心轴线切割,选择试样心部作为观察区域。利用金相显微镜对试样晶粒及组织变化情况进行观察,并测量心部 HV 硬度值。

### 2 实验结果及分析

#### 2.1 加热温度

试样磨抛后进行奥氏体晶粒尺寸观察,磨蚀液为过饱和苦味酸 + 洗涤剂 + 盐酸。根据 GB6394-1986 中的截线法测定奥氏体晶粒尺寸,测量结果见表 1。

由表 1 可见,随着加热温度由 950 °C 升至 1 100 °C,奥氏体晶粒随之长大,曲线增长过程中,在 1 000 ~ 1 050 °C 范围内,奥氏体晶粒尺寸变化不大,便于生产过程的控制,随着温度继续升高至 1 100 °C,奥氏体晶粒长大速度加快。因此,推荐加热温度区间在 1 000 ~ 1 050 °C。

**表 1 加热温度对 F45MnV 钢奥氏体平均晶粒尺寸的影响**  
**Table 1 Effect of heat temperature on average austenite grain size of steel F45MnV**

加热温度/℃	晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$
950	25.7
1 000	64.0
1 050	62.8
1 100	84.3

### 2.2 变形参数

用 3% 硝酸乙醇溶液腐蚀试样, 观察变形试样心部的组织, 图 1 分别为 850, 900, 950  $^{\circ}\text{C}$  温度下, 试样发生 10% 和 60% 变形的金相组织形貌。

利用台式显微镜的图像分析软件对试样中的铁素体组织进行统计。分别选取试样心部 10 个以上

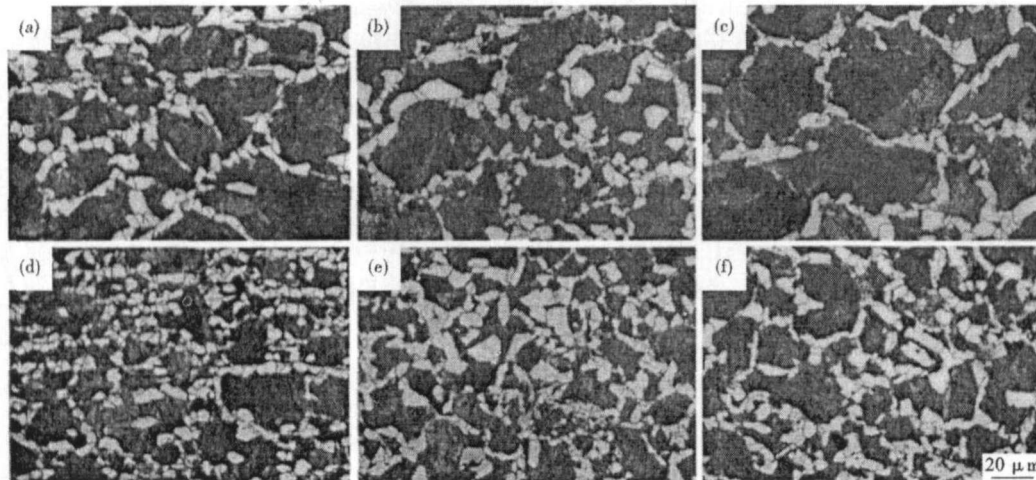


图 1 变形温度和变形量对 F45MnV 钢组织形貌的影响: (a)(d) 850  $^{\circ}\text{C}$ ; (b)(e) 900  $^{\circ}\text{C}$ ; (c)(f) 950  $^{\circ}\text{C}$ ; (a)(b)(c) 10%; (d)(e)(f) 60%

Fig. 1 Effect of deformation temperature (a)(d) 850  $^{\circ}\text{C}$ , (b)(e) 900  $^{\circ}\text{C}$ , (c)(f) 950  $^{\circ}\text{C}$  and deformation (a)(b)(c) 10%, (d)(e)(f) 60% on structure morphology of steel F45MnV

有效视场, 进行铁素体百分含量和铁素体晶粒尺寸统计, 为保证统计结果的有效性, 每个试样分别测量 300 ~ 500 个铁素体晶粒。统计结果如图 2 所示。

图 2 演示了试样铁素体组织随变形量变化的规律。如图 2(a) 所示, 试样在 900  $^{\circ}\text{C}$  和 950  $^{\circ}\text{C}$  发生变形后, 在冷却过程中发生相变, 奥氏体转变为铁素体、珠光体组织, 从统计结果来看, 铁素体晶粒尺寸随变形量变化不明显, 波动范围在 6 ~ 10  $\mu\text{m}$  之间。

试样在 850  $^{\circ}\text{C}$  变形后, 变形量由 10% 增至 30% 时, 铁素体晶粒尺寸由 21  $\mu\text{m}$  减小至 17  $\mu\text{m}$ ; 当变形量达到 40% 时, 铁素体晶粒尺寸减小至 5 ~ 6  $\mu\text{m}$ 。通过对图 1(a)、(d) 组织形貌的比较发现, 变形量在 40% 以上试样中奥氏体晶粒相对细小。

图 2(b) 为铁素体百分含量随变形量变化关系图。根据图中曲线可知, 试样随着变形量的逐渐增加, 铁素体百分含量呈现先增加后稳定的变化过程。

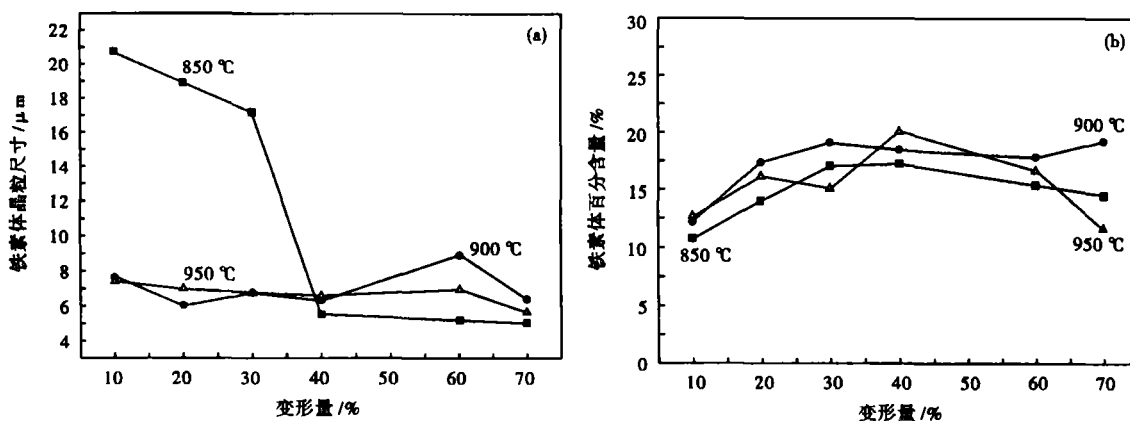


图 2 变形量对 F45MnV 钢铁素体晶粒尺寸(a)和百分含量(b)的影响

Fig. 2 Effect of deformation on grain size (a) and content percentage (b) of ferrite in steel F45MnV

这主要是由于在铁素体晶粒形核过程,奥氏体晶界位置的形核功较低<sup>[3,4]</sup>,铁素体晶粒优先形核,随着奥氏体晶界占满以后,铁素体晶粒形核位置减少,铁素体百分含量逐渐稳定。从曲线变化的规律性来看,950℃下的铁素体含量波动较大。850℃和900℃变形后,试样的铁素体百分含量变化规律较为明显,850℃较900℃条件下铁素体百分含量平均下降2%~3%,铁素体含量的降低必然导致珠光体含量的增加,进而导致轧材强度的上升,这也为试样强度随终轧温度降低而升高提供较为合理的解释。

F45MnV钢是典型的铁素体+珠光体型非调质钢,根据Gladman等人<sup>[5]</sup>回归总结的中碳微合金钢强度计算公式,可以对钢的强度组成进行分析。

$$\sigma_b = fa^{1/3} [16 + 74.2(N_f^{1/2}) + 1.18d^{-1/2}] + (1 - fa^{1/3})(46.7 + 0.23S^{-1/2}) + 6.3(\text{Si}\%) + \Delta\sigma_b$$

式中:fa-铁素体体积分数;d-铁素体晶粒尺寸;S-珠光体片层间距;N<sub>f</sub>-钢中自由氮;Δσ<sub>b</sub>-沉淀强化增量。

根据上述公式可知,F45MnV钢的强度主要包括:珠光体强化、铁素体强化以及沉淀强化3部分组成。当冷却速度和化学成分相对固定时,公式中的珠光体强化和沉淀强化可近似作为定值。即铁素体晶粒尺寸及其百分含量成为影响强度的主要因素,这也是本文将其作为研究对象的主要原因。

根据图2曲线及其分析结果可知,终轧温度在850~900℃时,铁素体含量变化规律明显,便于生产控制;当终轧温度控制在900~950℃时,铁素体晶粒尺寸可以在较宽的变形量范围内保持稳定。因此,综合考虑,当终轧温度为900℃时,F45MnV钢可获得良好和稳定的力学性能。

### 2.3 冷却速度

利用维氏硬度仪对试样心部进行硬度值测量,取5次测量平均值作为结果,利用硬度和强度之间的对应关系,将所测硬度转换为强度,结果见表2。

图3为试样发生70%变形后,强度随温度变化

表2 900℃终轧70%变形量F45MnV钢的冷却速度对抗拉强度的影响

Table 2 Effect of cooling rate on tensile strength of steel F45MnV rolled with deformation 70% and finished temperature 900℃

冷却速度/ (°C·s <sup>-1</sup> )	0.25	0.5	1	2
抗拉强度/MPa	815	841	881	961

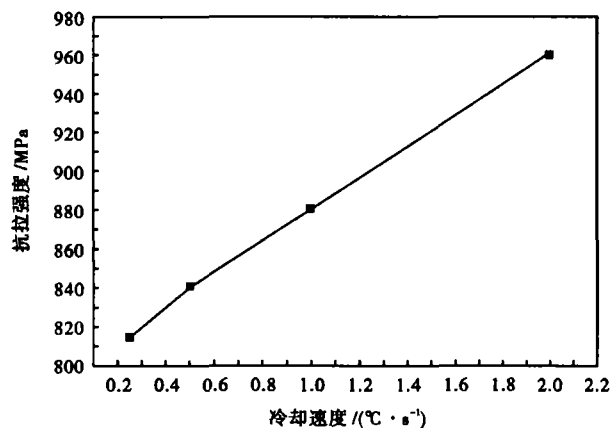


图3 冷却速度对F45MnV钢抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of cooling rate on tensile strength of steel F45MnV

示意图。图3中所示曲线变化规律十分明显,试样的强度随着冷却速度的升高而增加。随着冷却速度由0.25℃/s增至2℃/s,F45MnV钢的抗拉强度在815MPa至961MPa范围之间波动。

根据图3中曲线,在冷却速度为0.25~2℃/s范围内,F45MnV钢的抗拉强度与冷速基本呈线性关系,实际生产可根据强度需求对非调质钢棒材进行在线控冷。

### 3 结论

(1)非调质钢F45MnV的加热温度选择在1000~1050℃范围内,奥氏体晶粒尺寸保持稳定。

(2)F45MnV钢终轧温度为900℃左右时,钢中组织控制容易,性能保持稳定,为在线控制轧制提供有利条件。

(3)冷却速度为0.25~2℃/s时,发生70%变形F45MnV钢的抗拉强度与冷却速度近似呈正比例关系。

### 参考文献

- 戴观文,梁 玫,武云峰,等.转炉生产热锻非调质钢F40MnV的工艺实践.特殊钢,2005,26(3):57
- 杜彩霞,刘振天,李长民,抚顺特殊钢公司汽车用合金钢的现状与发展.特殊钢,2003,24(3):39
- 傅云义,杨 平,杨王玥.粗大奥氏体晶粒中应变诱导铁素体形成特点.北京科技大学学报,2000,22(2):170
- 田 景,王国柱,杨王玥,等.变形温度对形变强化相变完成时临界应变量的影响.塑性工程学报,2006,13(2):80
- Gladman T, Mcivor I D, Pickering F B. Some Aspects of the Structure Property Relationships in High-carbon Ferrite-pearlite Steels. ISIJ, 1972,12:916

张英建(1978-),男,博士生,中碳微合金非调质钢的研究。