

终轧温度和冷却速度对 Q550D 钢组织和力学性能的影响

高 兵 赵亚娟
(南京钢铁联合有限公司技术质量部,南京 210035)

摘 要 通过 Gleeble-3800 热模拟试验机,研究了终轧温度(800~950 ℃)和冷却速度(2~20 ℃/s)对 Q550D 微合金钢板(/% :0.06C、0.20Si、1.60Mn、0.010P、0.001S、0.10Mo、0.06Nb、0.01V、0.02Ti)的组织 and 力学性能的影响。结果表明,随着终轧温度的降低和轧后冷却速度的增加,粒状贝氏体逐渐减少,板条贝氏体逐渐增多,钢的屈服和抗拉强度提高的趋势比较明显,-20 ℃ 韧性得到改善,但伸长率呈下降趋势;在终轧温度为 850 ℃、冷却速度为 15~20 ℃/s 时,Q550D 钢具有较好的综合强韧性,即抗拉强度约为 750 MPa,屈服强度 650 MPa,伸长率 39%,-20 ℃ 冲击功 65 J。

关键词 Q550D 微合金钢 热模拟 终轧温度 冷却速度 组织 力学性能

Effect of Finishing Temperature and Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Steel Q550D

Gao Bing and Zhao Yajuan
(Quality and Technology Department, Nanjing Iron and Steel United Co Ltd, Nanjing 210035)

Abstract The effect of finishing temperature (800~850 ℃) and cooling rate (2~20 ℃/s) on structure and mechanical properties of microalloying steel Q550D plate (/% : 0.06C, 0.20Si, 1.60Mn, 0.010P, 0.001S, 0.10Mo, 0.06Nb, 0.01V, 0.02Ti) has been studied by using thermo-mechanical simulator Gleeble-3800. Results show that with decreasing finishing temperature and increasing cooling rate after rolling, the granular bainite in steel gradually decreases, and the lath bainite gradually increases, as a results the yield and tensile strength of steel increasing trend is obvious and the -20 ℃ toughness is improved but the elongation of steel is decreasing trend; with finishing temperature 850 ℃ and cooling rate 15~20 ℃/s the steel Q550D has better strength-toughness comprehensive properties, i. e. tensile strength is about 750 MPa, yield strength 650 MPa, elongation 39% and -20 ℃ impact energy 65 J.

Material Index Microalloying Steel Q550D, Thermal Simulation, Finishing Temperature, Cooling Rate, Structure, Mechanical Properties

为了改善高强钢的韧性和焊接性能,需大幅度降低钢中碳含量,通过 TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 工艺来获得中温区转变的贝氏体组织,保证钢的最佳强韧性匹配和优良的焊接性能。中温转变组织包括块状铁素体、粒状贝氏体、板条贝氏体等组织极其复杂,不同的控轧工艺所得的中温组织形态也不一样,导致最终性能有明显的差异^[1]。按 TMCP 理论,要细化相变后的组织,需要在控轧的未再结晶区形变,以便获得高蓄积能的奥氏体,尽量抑制回复过程,将形变产生的大量位错尽可能地保持到相变发生前,增加相变驱动力^[2]。因此,终轧完成与开始加速冷却之间的时间间隔越短越好。本文利用热模拟实验机模拟 Q550D 高强钢 TMCP 工艺中终轧温度和冷却速度对组织和性能的影响。

1 试验材料及方法

热模拟试验样品取自板卷厂的 Q550D 热轧板,

厚度 30 mm,连铸坯的厚度为 180 mm,宽度为2 500 mm,热轧板的化学成分见表 1。

表 1 Q550D 试验钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of test steel Q550D / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti
0.06	0.20	1.60	0.010	0.001	0.06	0.20	0.10	0.06	0.01	0.02

不同终轧温度模拟:在试验钢上取样,加工成 Φ10 mm×86 mm 的圆柱体,在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行两阶段压缩实验,设计工艺方案为:将试样以 10 ℃/s 的速率升至 1 250 ℃,保温 10 min 后,以 5 ℃/s 降至 1 100 ℃,以应变速率 1 s⁻¹,40% 变形量将试样压缩,然后以 10 ℃/s 降至不同的终轧温度 800、850、900、950 ℃,以应变速率 1 s⁻¹,30% 变形量再进行第二阶段压缩,最后以同一冷却速度冷却(20 ℃/s 冷却)至 200 ℃。

不同冷却速度模拟:根据轧后性能选择一个合

适的终轧温度,压缩方案不变,终轧后分别以不同的冷却速度 2、10、15、20 °C/s 将试样冷却至 200 °C,测试不同冷却速度下的性能,每组试验做 3 组相同的试样。热模拟过程如示意图 1。

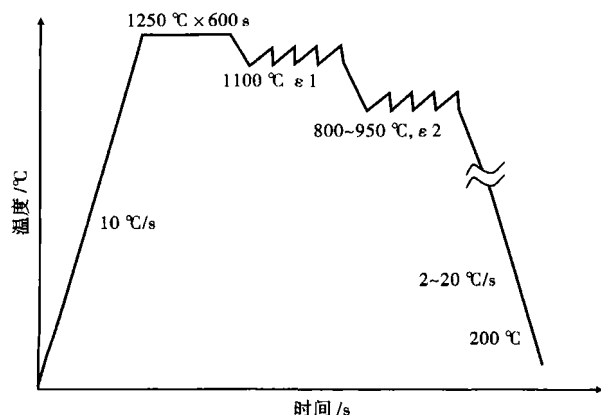


图 1 热模拟工艺示意图

Fig. 1 Schematics of thermal simulation process

将其中一组模拟不同终轧温度和冷却速度的试样沿与长轴垂直的中心部位切开,进行磨制抛光,用 4% 的硝酸酒精溶液进行侵蚀,在 JSM-6490 扫描电镜上进行组织观察,用 EM2010 透射电镜对钢的亚结构进行观察;另两组试样制成拉伸和冲击试样,拉伸试验采用较小的板状样品,在微拉伸试验机上进行,工作部位尺寸(mm)为 2(厚)×4(宽)×6(长),夹持部长度为 3 mm;冲击样品尺寸(mm)为:8.5×5, V 形缺口深度为 2 mm,试验按相应国标进行。

2 试验结果与分析

2.1 不同终轧温度下的组织和性能

由图 2 可见,4 种终轧温度条件下试样中的组织主要有:板条贝氏体、粒状贝氏体、块状铁素体和沿原奥氏体晶界析出的多边形铁素体,但终轧温度 800 °C 时,组织以板条贝氏体为主,有少量的粒状贝氏体如图 2(a);850 °C 时,组织仍以板条贝氏体为主,并有少量的粒状贝氏体如图 2(b);900 °C 时,板

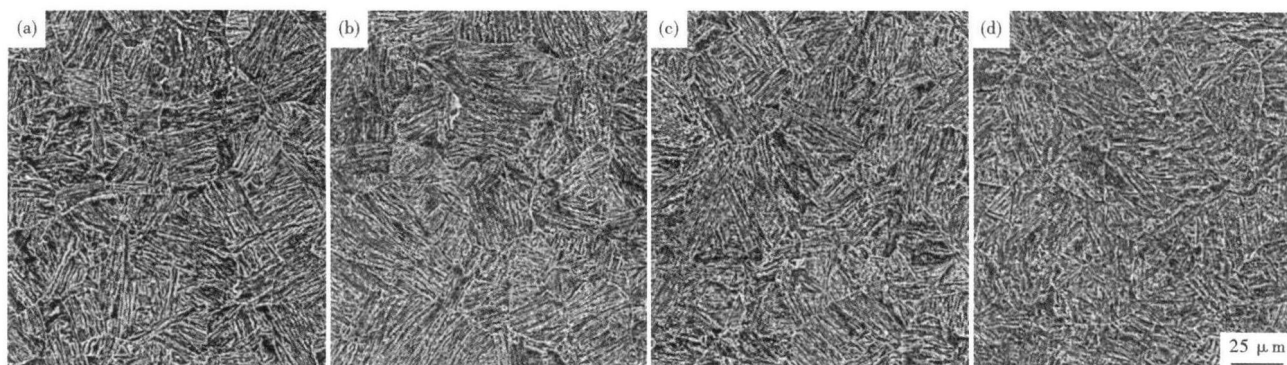


图 2 终轧温度对 Q550D 钢的组织的影响,SEM,终轧温度/°C: (a) 800; (b) 850; (c) 900; (d) 950

Fig. 2 Effect of finishing temperature on structure of steel Q550D, SEM, finishing temperature /°C: (a) 800; (b) 850; (c) 900; (d) 950

条贝氏体减少,粒状贝氏体明显增多,原奥氏体晶界和晶内出现准多边形铁素体如图 2(c);950 °C 时,部分奥氏体晶粒明显粗化,呈现混晶组织,试样中的组织以粒状贝氏体为主,板条贝氏体所占比例明显减少,晶界析出的铁素体和晶内的准多边形铁素体增多(图 2d)。也就是说,随着终轧温度的升高,板条贝氏体逐渐减少,粒状贝氏体和铁素体逐渐增多^[3]。用透射电镜对终轧温度为 950 °C 和 850 °C 的试样进行薄膜衍衬像观察,950 °C 终轧样品中主要为较高位错密度的中温铁素体 + M-A 组成的粒状贝氏体和粗大板条贝氏体,板条内位错密度较低(图 3a);850 °C 终轧的试样中主要为细的板条贝氏体,板条内的位错密度较高(图 3b)。

由图 4 可见,Q550D 钢在 800 °C 和 850 °C 终轧

的抗拉强度没有明显变化,850 °C 以上终轧时钢的抗拉强度随终轧温度的提高而降低。钢的屈服强度随终轧温度的提高而降低;Q550D 钢的 -20 °C 冲击功随终轧温度的提高先提高后降低,850 °C 终轧时 -20 °C 冲击功最高,钢的伸长率在试验温度范围内随终轧温度的提高而上升。

以 20 °C/s 冷却速度冷却至 200 °C 的条件下,终轧温度为 800 ~ 850 °C 时,组织以板条贝氏体为主且非常细小,板条内含有高的位错密度,屈服强度最高达到 685 MPa,抗拉强度 760 MPa,850 °C 终轧试样的 -20 °C 冲击功最高;随着终轧温度的提高,组织中的粒状贝氏体明显增多,板条贝氏体减少且发生宽化,原奥氏体晶界和晶内出现准多边形铁素体,当终轧温度为 950 °C 时转变成以粒状贝氏体为主的组

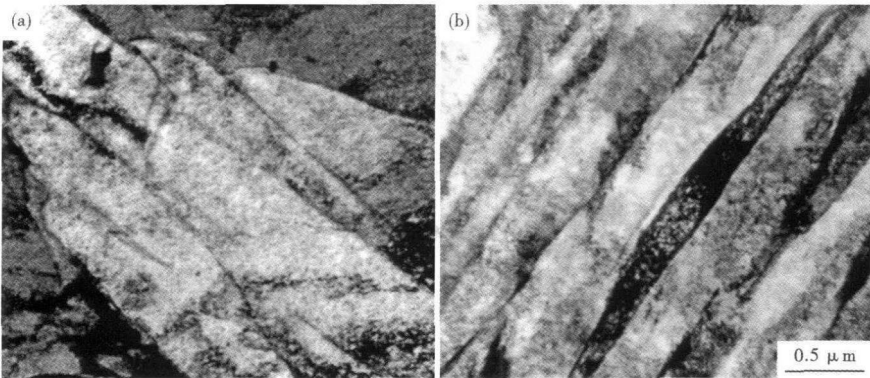


图 3 Q550D 钢的板条贝氏体组织形貌,TEM,终轧温度/℃:(a)950;(b)850
Fig. 3 Morphology of lath bainite structure in steel Q550D, TEM, finishing temperature /℃:
(a) 950; (b) 850

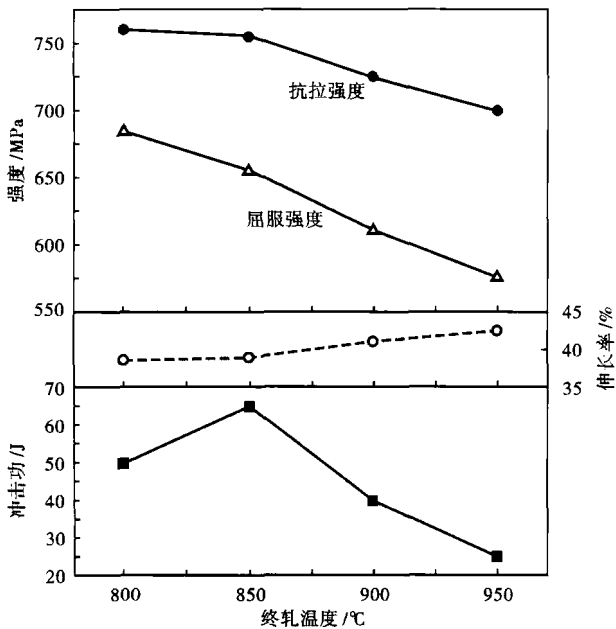


图 4 终轧温度对 Q550D 钢力学性能的影响,冷却速度 20 °C/s
Fig. 4 Effect of finishing temperature on mechanical properties of steel Q550D, cooling rate 20 °C/s

织,屈服强度和抗拉强度降低为 575 MPa 和 700 MPa,屈服强度与 800 °C 终轧相比降低达 110 MPa, -20 °C 冲击功明显降低,这是因为随着变形温度提高有效晶粒尺寸增大,韧脆转变温度提高;此外, 950 °C 为含 Nb 钢的部分再结晶温度,在该温区变形很容易引起混晶,这也是冲击功明显降低的主要原因。

2.2 不同冷却速度下的组织和性能

图 5 终轧温度为 850 °C, 轧后以 2 ~20 °C/s 冷却至 200 °C。当冷却速度为 2 °C/s 时,组织以粒状贝氏体为主,奥氏体晶粒较粗大,并有一定量的准多边形铁素体(图 5a);当 10 °C/s 冷却时,钢中的板条贝氏体组织增多,粒状贝氏体减少,仍有极少量的准多边形铁素体,钢的奥氏体晶粒变得均匀且明显细化(图 5b);当 15 °C/s 和 20 °C/s 冷却时,钢的组织变为以板条贝氏体为主,仅有极少量粒状贝氏体(图 5c 和图 5d)。图 6 为不同冷却速度下钢的透射电镜薄膜衍衬像,当冷却速度为 2 °C/s 时,该钢中主要为中温区转变铁素体 + M-A 岛的粒状贝氏体组织,中温铁素体内有较多的位错, M-A 岛为颗粒状且尺寸较大(图 6a);10 °C/s 冷却时,钢的组织变为以板条贝氏体为主,粒状贝氏体为辅, M-A 岛在板条贝氏体片间呈条状分布但尺寸仍较大(图 6b);图 6(c) 和图 6(d) 分别为 15 °C/s 和 20 °C/s 冷却时的衍衬像,随冷却速度的增加贝氏体板条细化,板条内的位错密度增高, M-A 岛更加细小,由颗粒状变为沿贝氏体板条间分布的薄片状。

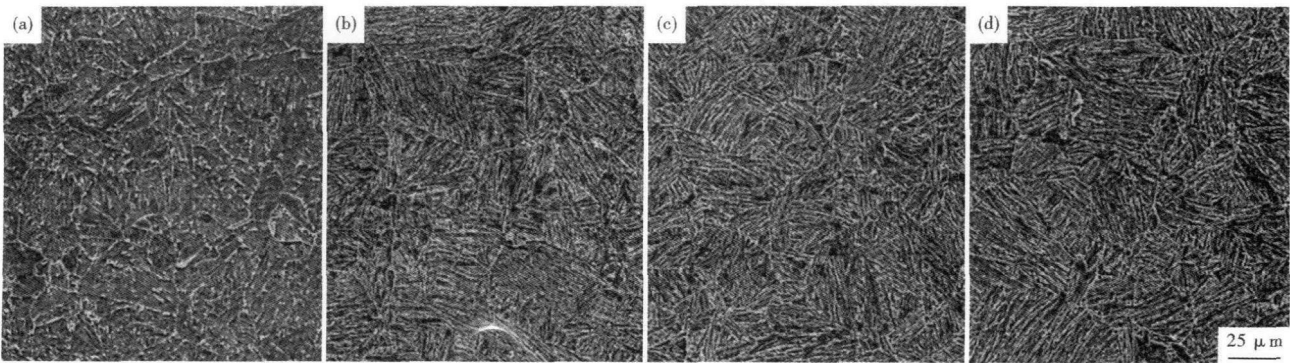


图 5 冷却速度对 Q550D 钢组织的影响,终轧 850 °C,冷却速度/(℃·s⁻¹): (a)2;(b)10;(c)15;(d)20
Fig. 5 Effect of cooling rate on structure of steel Q550D, finishing at 850 °C, cooling rate /(℃·s⁻¹): (a) 2; (b) 10; (c) 15; (d) 20

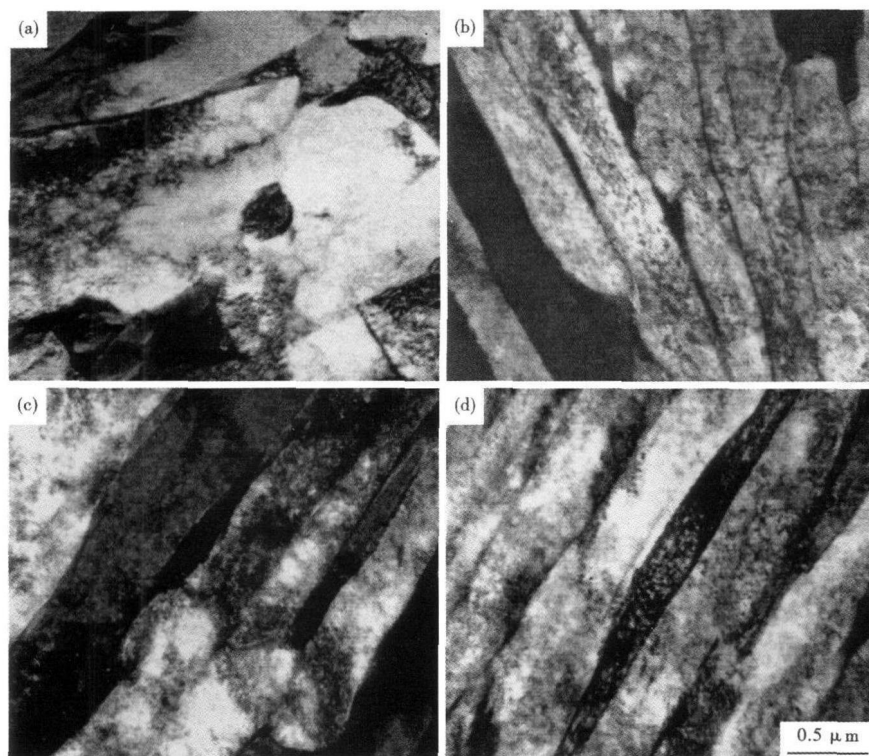


图 6 Q550D 钢的粒状贝氏体 (a) 和板条贝氏体 (b, c, d) 形貌, TEM, 冷却速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 2; (b) 10; (c) 15; (d) 20, 终轧温度 850 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 6 Morphology of granular bainite (a) and lath bainite (b, c, d) in steel Q550D, TEM, cooling rate /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 2; (b) 10; (c) 15; (d) 20, finishing temperature 850 $^{\circ}\text{C}$

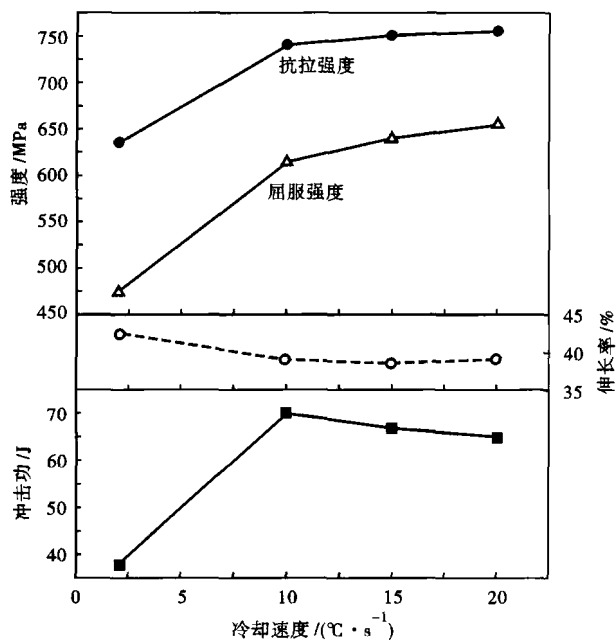


图 7 冷却速度对 Q550D 钢力学性能的影响, 终轧温度 850 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 7 Effect of cooling rate on mechanical properties of steel Q550D, finishing temperature 850 $^{\circ}\text{C}$

由图 7 可见, 冷却速度为 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时其屈服和抗拉强度分别为 475 MPa 和 635 MPa, -20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击功

也只有 38 J, 当冷却速度增大时, 开始出现板条贝氏体, 强度进一步得到提高, 冲击功也不断提高, 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却时, 以板条贝氏体为主, 屈服和抗拉强度分别升高为 615 MPa 和 740 MPa, -20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击功达到最大值 70 J, 15 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却时, 板条贝氏体的量不断增加, 粒状贝氏体明显减少, 且板条间宽度变细小, 位错密度也增大, 屈服和抗拉强度分别升高为 640 MPa 和 750 MPa, -20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击功略有下降, 20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却时, 屈服和抗拉强度分别达最大值 655 MPa 和 755 MPa, 冲击功为 65 J 下降不明显。此外, 该钢的伸长率随冷却速度加快有下降趋势, 但下降不明显。

3 结论

(1) 随着终轧温度的降低, 粒状贝氏体逐渐减少, 板条贝氏体逐渐增多, 且宽度细化, 屈服强度和抗拉强度提高的趋势比较明显, 伸长率呈下降趋势, -20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击功随着终轧温度的降低而有所改善, 850 $^{\circ}\text{C}$ 时最高。

(2) 轧后冷却速度对 Q550D 钢的组织有明显影响, 随冷却速度的增加, 钢的组织由以粒状贝氏体为主转变为板条贝氏体。钢的强度和韧性也随板条贝氏体增多而均有提高, 在冷却速度为 15 ~ 20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时试验钢具有较好的强韧匹配。

参考文献

- 1 徐祖耀, 刘世楷. 贝氏体相变与贝氏体. 北京: 科学出版社, 1991: 47-50
- 2 翁宇庆. 超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 450-460
- 3 蓝慧芳, 杜林秀, 刘彦春, 等. 控轧控冷工艺对高强度结构钢组织及力学性能的影响. 东北大学学报, 2009, 30(2): 200

高 兵 (1969-), 男, 1995 年江苏冶金职工大学毕业, 理化室主任, 物理检验与分析。

收稿日期: 2011-11-07