

V-Nb 微合金化热轧带肋高强度钢筋 HRB600 的连续冷却转变曲线

徐志东 范植金 徐 志 刘文艳
(武汉钢铁(集团)研究院,武汉 430080)

摘 要 试验用 600 MPa 级高强度钢(成分: 0.23C, 0.67Si, 1.35Mn, 0.028P, 0.023S, 0.131V, 0.033Nb), 由 25 kg 真空感应炉冶炼, 并热轧成 16 mm × 180 mm 扁材。利用膨胀法结合金相分析及硬度在 Thermecmaster-Z 热模拟试验机上测定了 HRB600 钢在冷却速率 0.1 ~ 100 °C/s 下的连续冷却转变膨胀曲线, 获得了该钢的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)并研究了该钢转变后的组织。结果表明, 850 °C 奥氏体时, 冷却速率小于 3 °C/s 时试验 V-Nb 微合金化高强度钢 HRB600 的组织为先共析铁素体 + 珠光体, 当冷却速率为 5 °C/s 时, 出现少量马氏体, 影响钢筋的焊接性能, 当冷却速率达 100 °C/s 时可获得马氏体组织。

关键词 V-Nb 微合金化 HRB600 热轧带肋高强度钢筋 连续冷却转变(CCT)曲线 组织

Continuous Cooling Transformation Curves of V-Nb Microalloying High Strength Steel HRB600 Hot-Rolling Reinforcing Bars

Xu Zhidong, Fan Zhijin, Xu Zhi and Liu Wenyan
(Research and Development Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Wuhan 430080)

Abstract The test 600 MPa grade high strength steel (composition: 0.23C, 0.67Si, 1.35Mn, 0.028P, 0.023S, 0.131V, 0.033Nb) is melted by a 25 kg vacuum induction furnace and hot-rolled to 16 mm × 180 mm slab product. With dilatometric test combined with structure metallography and microhardness test the continuous cooling transformation expansion curves of steel HRB600 at cooling rate 0.1 ~ 100 °C/s have been measured by hot simulation testing machine Thermecmaster-Z to get the continuous cooling transformation (CCT) curves of the steel and the transformed structure of steel is studied. Results show that with austenizing at 850 °C, as cooling rate less than 3 °C/s the structure of tested V-Nb microalloying high strength steel HRB600 is proeutectoid ferrite + pearlite; with cooling rate 5 °C/s the minor martensite occurs in structure to effect the welding behavior of steel; and with cooling rate up to 100 °C/s the martensite structure is obtained in steel.

Material Index V-Nb Microalloying, HRB600 Hot-Rolled High Strength Reinforcing Bar, Continuous Cooling Transformation (CCT) Curves, Structure

热轧带肋钢筋主要用于制造钢筋混凝土结构件, 是建筑行业最重要的原材料之一, 其用量占我国钢材表观消费量的 13% 以上^[1-2], 在我国建筑用钢材中占有重要地位。HRB600 高强钢筋作为目前国标中最高级别的热轧带肋钢筋, 与目前主要使用的 HRB335、HRB400、HRB500 级钢筋相比, 可分别节约用钢量 73.3%、44.4% 和 19.5%, 具有节能减排的现实意义; 另一方面, 可以解决建筑结构中肥梁胖柱的问题, 增加建筑使用面积, 使结构设计更加灵活, 提高建筑使用功能, 因此开发 600 MPa 级热轧带肋钢筋具有较高的社会经济价值。本文对 600 MPa 级热轧带肋钢筋的静态连续冷却转变 CCT 曲线进行了研究, 从而获得连续冷却时组织转变规律。

1 实验材料与方法

实验材料为 25 kg 真空感应炉冶炼生产的钢锭, 经过 800 热轧机轧制成 16 mm × 180 mm 的扁坯, 其化学成分见表 1, 去头去尾后, 取样机加工成

圆柱形热模拟试样, 热模拟试样为 $\Phi 3$ mm × 10 mm, 其中一端开了个 $\Phi 2$ mm × 2 mm 的孔, 图 1 为试样的尺寸及其形状。实验时, 按照 YB/T5128-1993 的要求, $\Phi 3$ mm × 10 mm 的圆柱体在 Thermecmaster-Z 型热模拟实验机上将试样首先以 200 °C/h 加热到

表 1 试验 HRB600 钢的化学成分 / %
Table 1 Analysis of test steel HRB600 / %

C	Si	Mn	P	S	V	Nb
0.23	0.67	1.35	0.028	0.023	0.131	0.033

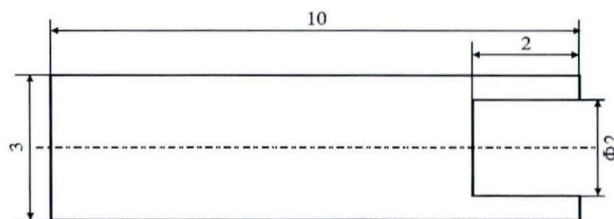


图 1 热模拟试样简图

Fig. 1 Schematics of specimen for thermal simulation test

1 000 ℃, 保温 10 min 后以 200 ℃/h 冷却到室温, 记录温度-膨胀曲线, 根据曲线确定临界点^[3]。把试样以 10 ℃/s 的升温速度加热到奥氏体化温度 (850 ℃) 保温 15 min, 然后分别以 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 50, 100 ℃/s 等 12 种不同冷却速度冷至室温, 采集温度、膨胀量和时间数据, 绘制出温度-膨胀曲线、温度-时间曲线。冷却后的试样从中间切开后经过金相研磨、抛光以及 3% 硝酸酒精腐蚀处理后, 在 OLYMPUS-GX71 型光学显微镜下观察组织; 然后用 FV-700 型半自动数值维氏硬度计测量其维氏显微硬度 (HV5), 测出不同冷却速度下的维氏显微硬度。最后结合金相法及硬度法, 最终绘制出连续冷却转变曲线 (即 CCT 曲线)。

2 实验结果

2.1 600 MPa 级热轧带肋钢筋的相变临界点

钢作为一种合金, 具有多型性相变, 其高温组织 (奥氏体 A) 及其转变产物 (铁素体 F、珠光体 P、贝氏体 B 和马氏体 M) 具有不同的比容, 当钢发生固态相变时, 除了热胀冷缩引起体积变化之外, 还有因晶体结构的变化引起的体积变化, 从而引起膨胀曲线的不连续变化, 在冷却曲线上出现拐点^[4,6], 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。

如图 2, 利用切线法, 可以读出冷却速度在 0.1 ℃/s 时膨胀曲线上 3 个拐点的温度值分别为 722、638、586 ℃, 结合图 3(a) 的金相组织, 试样冷却后的组织为铁素体和珠光体, 因此可以确定铁素体的转变开始温度为 722 ℃, 结束温度为 638 ℃。珠光体的转变开始和结束温度分别为 638 ℃ 和 586 ℃。

2.2 组织形貌

膨胀法只能从曲线上分析奥氏体转变产物的类型, 不能直接观察, 当转变数量少或者转变点不明显

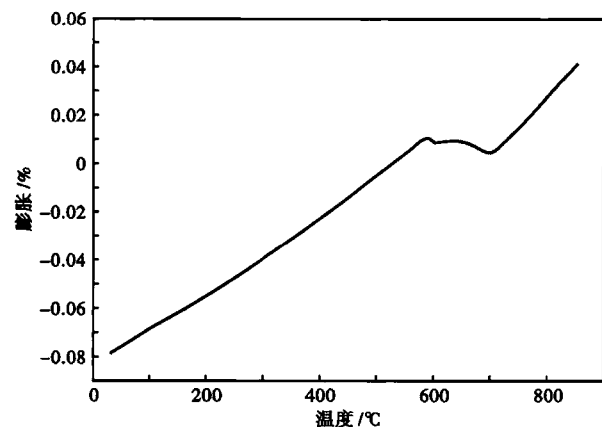


图 2 实验 HRB600 钢 0.1 ℃/s 冷却速度时的膨胀曲线
Fig. 2 Dilatation curve of test steel HRB600 with cooling rate 0.1 ℃/s

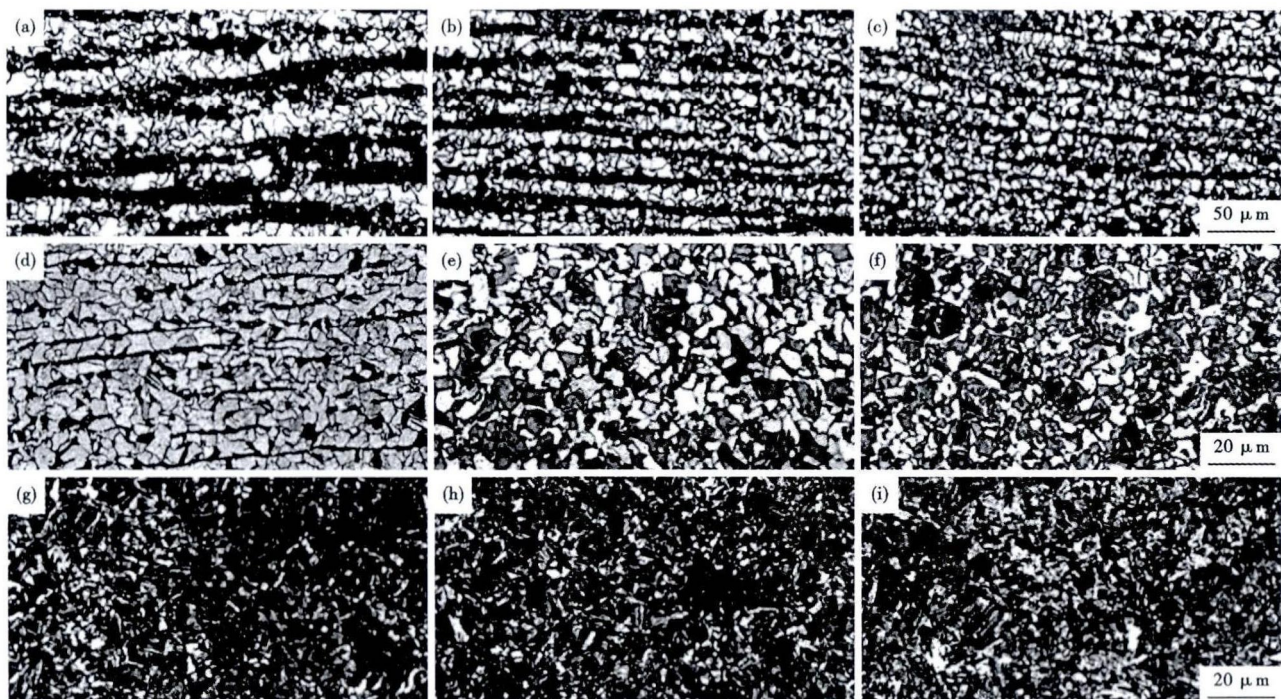


图 3 实验 HRB600 钢在 850 ℃ 奥氏体化后以冷却速度 / (°C · s⁻¹): 0.1(a), 0.5(b), 1(c), 3(d), 5(e), 10(f), 30(g), 50(h) 和 100(i) 冷却的组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of test steel HRB600 austenizing at 850 ℃ then cooling with cooling rate / (°C · s⁻¹): 0.1 (a), 0.2 (b), 0.5 (c), 3 (d), 5 (e), 10 (f), 30 (g), 50 (h) and 100 (i)

时,测量的准确度将受到影响。金相分析法是对膨胀法的一个有效补充,根据金相分析结果,提高测量准确度。如图 3 为 600 MPa 级热轧带肋钢筋在不同冷却温度下的金相组织,表 2 为该钢相变温度及组织。

2.3 CCT 曲线的绘制及讨论

测量出不同冷却速度下各拐点的对应时间和温度值,以时间对数作为横坐标,温度作为纵坐标,按照 YB/T5128-1993 要求,利用 Origin 软件将不同冷却速度下各相变点连接成光滑曲线,并标明 Ac_3 、 Ac_1 、 M_s 点的临界值、转变组织类型以及硬度值,就可以测量出钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线,即 CCT 曲线,如图 4 所示。

600 MPa 级热轧带肋钢筋在连续冷却转变过程中,当冷却速度为 0.1 $^{\circ}C/s$ 时,由于冷却速度较慢,获得的组织为粗大的先共析铁素体和珠光体。

表 2 冷却速度对实验 HRB600 钢的相变温度和组织的影响
Table 2 Effect of cooling rate on phase transformation temperature and structure of test steel HRB600

冷却速度/ ($^{\circ}C \cdot s^{-1}$)	F 转变温度/ $^{\circ}C$		P 转变温度/ $^{\circ}C$		M 转变温度/ $^{\circ}C$		组织
	开始	结束	开始	结束	开始	结束	
0.1	722	638	638	586	-	-	F+P
0.2	708	632	632	557	-	-	F+P
0.5	692	608	608	521	-	-	F+P
1	674	580	580	501	-	-	F+P
2	656	545	545	490	-	-	F+P
3	644	521	521	486	-	-	F+P
5	631	483	-	-	277	-	F+M
10	611	481	-	-	307	-	F+M
15	602	481	-	-	303	-	F+M
30	584	481	-	-	320	-	F+M
50	568	489	-	-	324	-	F+M
100	-	-	-	-	397	-	M

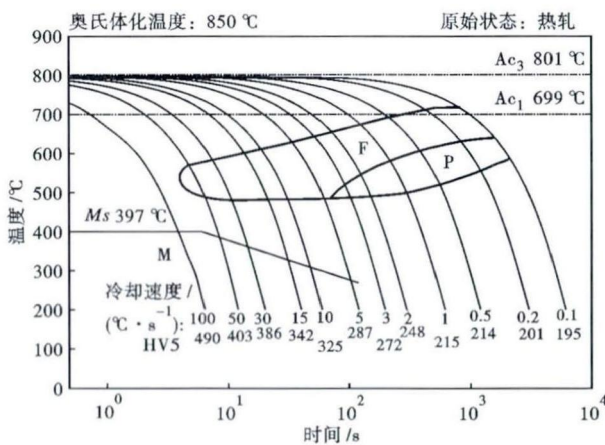


图 4 实验 HRB600 钢的 CCT 曲线和显微硬度值
Fig. 4 CCT curves and microhardness of test steel HRB600

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。如图 3 (a) (c), 可以看到冷却速度在 1 $^{\circ}C/s$ 时比 0.1 $^{\circ}C/s$ 时得到的组织晶粒更加细小。当冷却速度为 5 $^{\circ}C/s$ 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;随着冷却速度的增大,马氏体组织含量不断增加。冷却速度在 100 $^{\circ}C/s$ 时,获得的组织为马氏体。

2.4 冷却速度与硬度的关系

连续冷却转变曲线测定中,对不同冷却速度下试样硬度值的测定,是辅助确定某些较难分辨的组织,根据各组织维氏硬度参考值,可判定各硬度下的组织。如图 4 所示,钢在各冷却速率下的显微硬度值(HV5)。试样在冷却速度分别为 0.1, 5, 100 $^{\circ}C/s$ 下冷却时,金相组织为 F+P、F+M(少量)、M,硬度分别为 195、287、490,组织与硬度值相符。从图 4 中可以看出,随着冷却速率的增加,钢的显微硬度值(HV5)也逐渐的增大。

3 结论

(1) 600 MPa 级钢筋在 850 $^{\circ}C$ 奥氏体化条件下,当冷却速度小于 3 $^{\circ}C/s$ 时,转变组织以先共析铁素体和珠光体组织为主;当冷却速度为 5 $^{\circ}C/s$, 钢中出现了少量的马氏体组织,这将对钢筋性能产生不利影响,特别是对焊接性能的影响。

(2) 600 MPa 级钢筋的显微硬度值(HV5)随着冷却速度的增加,逐渐增大。

参考文献

- [1] 王厚昕,李正邦.中国热轧带肋钢筋的发展和现状[J].中国冶金,2006(6):6-9,14.
- [2] 苏世怀,完卫国,孙维,等.中国建筑用带肋钢筋、线材品种的优化[J].建材世界,2010,31(5):36-39.
- [3] 花桂泰,杨盛蓉. YB/T 5127-1993. 钢的临界点测定方法(膨胀法)[S].
- [4] 杨盛蓉. YB/T 5128-1993. 钢的连续冷却转变曲线图的测定方法(膨胀法)[S].
- [5] 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.
- [6] Trzaska J, Dobrzanski L. A. Modeling of CCT Diagrams for Engineering and Constructional Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007 (192-193): 504-510.

徐志东(1985-),男,助理工程师,硕士研究生(武汉科技大学),2009年武汉科技大学(本科)毕业,棒材品种开发。

收稿日期:2013-09-22