

薄板坯连铸连轧 C-Si-Mn TRIP 钢组织和力学性能的研究

张迎晖^{1,3} 康永林¹ 于浩¹ 刘晓² 方圆²

(1 北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083; 2 上海宝钢集团公司,上海 200941;

3 江西理工大学材料与化学工程学院,赣州 341000)

摘要 用 Gleeble-1500 热/力模拟机研究了成分(%)为:0.20C-1.08Si-1.43Mn TRIP(相变诱导塑性)钢连续冷却时的组织,并测得动态 CCT(连续冷却转变)曲线,得出冷却速度达 10 °C/s 时出现粒状贝氏体,冷却速度 15 °C/s 时得到板条贝氏体。在实验室模拟 C-Si-Mn TRIP 钢薄板坯连铸连轧工艺试验:用 10 kg 真空感应炉冶炼,成分(%)为:0.20C-1.54Si-1.55Mn 的 TRIP 钢,钢锭尺寸为(mm):60 × 100 × 130,经 7 道次轧制成厚度 6.40 mm 板,终轧温度 810 °C,轧后空冷至 700 °C,再水冷至 400 °C 模拟卷取。试验结果表明,该钢组织含有 5.13% 残余奥氏体,37.20% 贝氏体,机械性能 σ_b 715 MPa, σ_s 520 MPa, 屈强比 0.73, δ 20%。

关键词 C-Si-Mn TRIP 钢 动态 CCT 曲线 组织 力学性能

Study on Structure and Mechanical Properties of C-Si-Mn TRIP Steel Produced by Thin Slab Casting and Rolling Process

Zhang Yinghui^{1,3}, Kang Yonglin¹, Yu Hao¹, Liu Xiao² and Fang Yuan²

(1 Materials Science and Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2 Baosteel Group Co, Shanghai 200941; 3 Materials and Chemical Engineering School, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract The structure of TRIP (transformation induced plasticity) steel 0.20C-1.08Si-1.43Mn during continuous cooling has been studied by Gleeble-1500 thermal simulation machine to get CCT (continuous cooling transformation) curves and to obtain that the bainite particle occurred with cooling rate 10 °C/s and the lath bainite got with cooling rate 15 °C/s. The thin slab casting and rolling process test of 0.20C-1.54Si-1.55Mn TRIP steel melted by a 10 kg vacuum induction furnace with ingot dimension 60 mm × 100 mm × 130 mm was carried out in laboratory which was rolled to 6.40 mm plat by 7 pass rolling with finish rolling at temperature 810 °C, and air cooling to 700 °C than water cooling to 400 °C to simulate coiling. The test results showed that there was 5.13% retained austenite, 37.20% bainite and the rest-ferrite in structure of steel, of which the mechanical property- σ_b was 715 MPa, σ_s 520 MPa, ratio of yield strength to tensile strength 0.73 and elongation δ 20%.

Material Index C-Si-Mn TRIP Steel, Dynamic CCT Curves, Structure, Mechanical Properties

低合金 TRIP(相变诱导塑性 Transformation Induced Plasticity 的简称)钢板的生产方法有热轧法和冷轧法,前者主要通过热轧控制冷却来获得多边形铁素体 + 片状(或板条状)贝氏体铁素体 + 残余奥氏体的多相组织^[1-3];后者则通过冷轧后进行临界加热 + 贝氏体等温淬火的热处理方法实现^[4-7]。本文用热膨胀法绘制了一种 TRIP 钢的动态 CCT 曲线,模拟薄板坯连铸连轧工艺在实验室制备了 C-Si-Mn 系 TRIP 钢,研究了该钢种冷却工艺对组织和力学性能的影响。

1 C-Si-Mn TRIP 钢动态 CCT 曲线和组织

在 Gleeble-1500 热/力模拟机上将 0.20C-

1.08Si-1.43Mn TRIP 钢 $\Phi 8$ mm × 12 mm 试样以 100 °C/s 加热至 1 050 °C 后,以 1 °C/s 加热至 1 150 °C,保温 10 s;再以 5 °C/s 冷速冷却至 1 050 °C,压下 5 mm(工程应变为 41.6%),变形速率为 1/s;然后以 5 °C/s 冷却至 950 °C,压下 1 mm(工程应变为 14.3%),变形速率为 20/s,变形后分别以 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 °C/s 冷却至室温,采集温度、膨胀量和时间数据,绘制成该钢的动态 CCT 曲线(图 1)。

由图 1 可见,相变区域主要有 2 个部分:A → F 转变区和 A → B 转变区,冷却速度增大,贝氏体转变开始温度、转变结束温度有所降低。

图 2 为 0.20C-1.08Si-1.43Mn 钢变形后不同冷却速度下的金相组织。由图 2(a)可看出,在冷

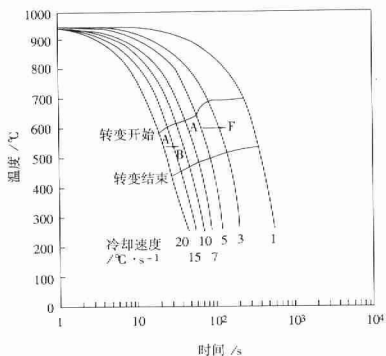


图1 0.20C-1.08Si-1.43Mn 钢的动态 CCT 曲线
Fig.1 Dynamic CCT curves of steel 0.20C-1.08Si-1.43Mn

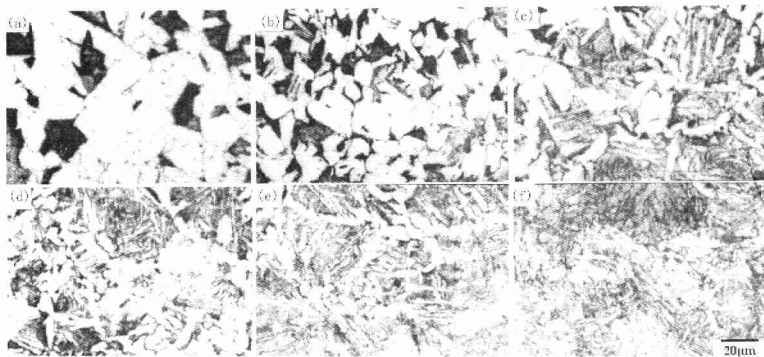


图2 0.20C-1.08Si-1.43Mn 钢不同冷却速度下的组织
Fig.2 Structure of steel 0.20C-1.08Si-1.43Mn with different cooling rate: °C/s: (a) 1; (b) 5; (c) 7; (d) 10; (e) 15; (f) 20

在本试验条件范围内,控制冷却工艺分2段:先慢冷控制铁素体的析出,后快冷控制贝氏体的析出。经试验现场测试,模拟薄板坯连铸连轧生产 TRIP 钢的空冷冷却速度为 3.1 °C/s,水冷冷却速度为 19.3 °C/s。

2 C-Si-Mn 系 TRIP 钢连轧工艺试验

采用 10 kg 真空感应炉熔炼合金,铁模浇注后,开模取出钢锭,用红外线测温仪测得钢锭表面温度为 902 °C,随即即将钢锭送入均热炉内,均热工艺为 1 150 °C × 30 min,钢锭尺寸为 (mm): 60 × 100

× 130。均热后在 Φ380 mm × 400 mm 二辊轧机上进行热轧,热轧 7 道次,终轧温度为 810 °C,总变形率为 90%,轧后轧件厚度为 6.40 mm。热轧后的轧件先空冷到 700 °C,再水冷至 400 °C,400 °C 60 min 模拟卷取后出炉空冷。

试验钢的化学成分(%)为:0.20C, 1.54Si, 1.55Mn, 0.020P, 0.010S, 0.010Ti, < 0.01Al。

拉伸试验结果表明,0.20C-1.54Si-1.55Mn 钢的力学性能为:σ_b = 715 MPa, σ_s = 520 MPa, δ = 20%, 屈强比为 0.73。

采用截线法,在 20 个视场中测量了试样的铁

速为 1 °C/s 时,室温组织为多边形先共析铁素体和珠光体,且铁素体晶粒大小不均。随冷速加大铁素体晶粒得到明显细化(如图 2(b))。

当冷却速度达到 7 °C/s 时,试样中出现魏氏体组织(如图 2(c))。试验钢的含碳量为 0.20%,为易出现魏氏体组织成分。适当加快冷却速度,可避免魏氏组织的形成。

从图 2(d)可以看出,冷却速度达到 10 °C/s 时,试样中出现粒状贝氏体,组织形态是铁素体呈块状,在块状铁素体内包含有碳化物和一些不规则的小岛状组织。冷却速度为 15 °C/s 时(图 2(e)),铁素体由奥氏体晶界向晶内平行生长成为板条状,板条之间分布着断续碳化物,此冷却条件的组织为板条贝氏体。冷却速度达 20 °C/s 时,板条束贝氏体组织更加细小(图 2(f))。

采用截线法,在 20 个视场中测量了试样的铁

速为 1 °C/s 时,室温组织为多边形先共析铁素体和珠光体,且铁素体晶粒大小不均。随冷速加大铁素体晶粒得到明显细化(如图 2(b))。

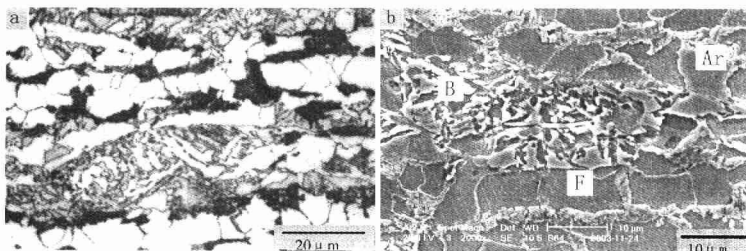


图 3 0.20C-1.54Si-1.55Mn TRIP 钢的组织:(a) 光学显微镜;(b) 扫描电镜
Fig.3 Structure of TRIP steel 0.20C-1.54Si-1.55Mn: (a) optical; (b) SEM

素体晶粒尺寸,平均为 $6.24 \mu\text{m}$ 。组织观察表明,试样组织呈明显的带状分布(图 3a),在光学显微镜下可以观察到大量的多边形铁素体,贝氏体分布于基体上,另有少量的珠光体分布在铁素体晶界上,但残余奥氏体与铁素体在光学显微镜下不能分辨开来。扫描电镜观察发现(图 3b),白亮凸起晶粒为残余奥氏体,大的凹陷多边形为铁素体,图 3b 中间部分则是贝氏体。从图 3b 可见尺寸较大的残余奥氏体分布于多边形铁素体晶粒之间,一些细小的残余奥氏体则存在于铁素体晶粒内。

为了测定合金中各相的含量,采用了彩色金相实验方法^[8]。先将 1 g 偏重亚硫酸钠溶于 80 mL 蒸馏水中,另将 4 g 苦味酸溶于 80 mL 无水乙醇中,将两种溶液按体积比 1:1 混合均匀后,立即将研磨、抛光好的试样浸入试液中 15~25 s,用清水冲洗后,冷风吹干。

在带图象分析软件的 LEICA DMRX 金相显微

镜上进行了组织分析,结果表明,铁素体为浅棕色,贝氏体为深棕色,残余奥氏体为白亮色。定量金相分析结果为:5.13%的残余奥氏体,57.67%的铁素体,37.20%的贝氏体。

3 结论

(1) 0.20C-1.08Si-1.43Mn TRIP 钢模拟变形后的动态 CCT 曲线中,有 A \rightarrow F 转变区和 A \rightarrow B 转变区,随着冷却速度的增大,铁素体、贝氏体相变开始温度和结束温度都趋于降低,冷却速度达到 10 °C/s 时,试样中出现粒状贝氏体。

(2) 在实验室模拟薄板坯连铸连轧试验生产线的 0.20C-1.54Si-1.55Mn TRIP 钢,拉伸实验检测表明,试验钢的力学性能为: $\sigma_b = 715 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 520 \text{ MPa}$, $\delta = 20\%$,屈强比为 0.73。组织为铁素体 + 贝氏体 + 5.13% 残余奥氏体。

国家自然科学基金资助项目(50334010)

参考文献

- 赵金福,明旭光,欧立晋,等.残留奥氏体的相变诱导塑性研究.机械工程材料,1993,17(2):14
- 赵金福,明旭光,欧立晋,等.控轧工艺对 TRIP 薄板组织与性能的影响.钢铁,1992,27(11):24
- Hanzaki A Z, Hodgson P D, Yue S. Hot Deformation Characteristics of Si-Mn TRIP Steels with and without Micro-Alloy Additions. ISIJ Inter, 1995, 35(3):324
- 王 绪,花礼先,王四根,等.硅锰系相变诱导塑性钢的热处理工艺研究.金属热处理,1995,20(6):14
- Sugimoto K, Nagasaka A, Kobayashi M, et al. Effects of Retained Austenite Parameters on Warm Stretch-Flange Ability in TRIP-Aided Dual Phase Sheet Steels. ISIJ Inter, 1999, 39(1):56
- 邹宏辉,符仁钰,李 麟,等.低碳 Si-Mn 系 TRIP 钢的热处理工艺对组织的影响.金属热处理,2003,28(1):59
- Sakuma Y, Matsumura O, Takauchi H. Mechanical Properties and Retained Austenite in Intercritically Heat-Treated Bainite-Transformed Steel and Their Variation with Si and Mn Additions. Metal. Trans. A 1991, 22A(2):489
- Girault E, Jacques P, Harlet Ph, et al. Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steel. Mater. Character., 1998, 40:111

张迎晖(1968-),女,副教授,1993年东北大学毕业,从事薄板坯连铸连轧产品的工艺、组织性能研究。