

· 组织和性能 ·

退火温度对热轧 0.14C-5Mn 钢组织和力学性能的影响

石发才¹ 王存宇² 李楠^{2,3} 时捷² 曹文全² 王育田¹

(1 太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003; 2 钢铁研究总院,北京 100081;

3 西部钛业有限责任公司,西安 710201)

摘要 0.14C-5Mn 钢(质量分数:0.14C,5.0Mn,0.008P,0.002S,0.0030N)由 50 kg 真空感应炉冶炼,轧成 4 mm 板材(终轧温度 1 000 ℃,空冷)。用扫描电子显微镜、X 射线衍射法和单轴拉伸试验研究了 0.14C-5Mn 钢热轧 4 mm 板 550~650 ℃ 6 h 退火后的组织和力学性能。结果表明,热轧 0.14C-5Mn 钢退火过程中产生了奥氏体(发生相变诱发塑性-TRIP 效应),随退火温度的升高,奥氏体体积分数逐渐增加,钢的伸长率和强塑积(抗拉强度与断后伸长率的乘积)明显增加。650 ℃ 6 h 退火时奥氏体体积分数达 30.11%,该钢的抗拉强度为 945 MPa,强塑积为 37.3 GPa%。

关键词 0.14C-5Mn 钢 退火 奥氏体 逆相变 力学性能

Effect of Annealing Temperature on Structure and Mechanical Properties of Hot-rolled 0.14C-5Mn Steel

Shi Facai¹, Wang Cunyu², Li Nan^{2,3}, Shi Jie², Cao Wenquan² and Wang Yutian¹

(1 Technical Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003; 2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 3 Western Titanium Technologies Co Ltd, Xi'an 710201)

Abstract The 0.14C-5Mn steel (mass fraction: 0.14C, 5.0Mn, 0.008P, 0.002S, 0.0030N) is melted by a 50 kg vacuum induction furnace and rolled to 4 mm plate (finishing temperature 1 000 ℃, air cooling). The structure and mechanical properties of 4 mm plate of 0.14C-5Mn steel annealed at 550~650 ℃ for 6h are studied by scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis and uniaxial tensile test. Results show that the austenite is produced in annealing process of 0.14C-5Mn steel (occurring transformation-induced plasticity-TRIP effect), and with increasing annealing temperature the volume fraction of austenite increases and the elongation and product of tensile strength to elongation increase obviously. With annealing at 650 ℃ for 6 h the austenite fraction in steel is up to 30.11%, the tensile strength of steel is 945 MPa and the product of tensile strength to elongation is 37.3 GPa%.

Material Index 0.14-5Mn Steel, Annealing, Austenite, Reverted Transformation, Mechanical Properties

轻量化和高安全性是未来汽车的发展方向,要求新一代汽车钢具有高强度和高塑性的力学性能,强塑积(抗拉强度与断后伸长率的乘积)已经成为衡量汽车钢成形性能和碰撞安全性的重要指标^[1]。钢研总院在分析第 1 代和第 2 代汽车钢组织结构与力学性能的基础上提出了发展第 3 代汽车钢的设计^[2],并且通过对中锰钢的研究^[3],发现在两相区进行退火,能够得到在马氏体或超细晶铁素体的基体上引入大量亚稳奥氏体的复合组织,从而显著提高钢的塑性,同时保持较高的强度,强塑积超过 40 GPa%^[4]。热轧板的退火处理,不仅是热轧产品性能控制的关键步骤,也是冷轧前组织准备的关键过程。本文研究了 0.14C-5Mn 钢在热轧后 550~650 ℃退火处理后的组织和性能,为工业生产提供理论依据。

1 试验材料及方法

0.14C-5Mn 试验钢通过 50 kg 真空感应炉冶

炼,钢锭先改锻成(mm)200×200×30 厚的板坯,板坯加热到 1 200 ℃,然后热轧成厚度为 4 mm 的板材,终轧温度 1 000 ℃,轧后空冷。试验钢化学成分如表 1 所示。

表 1 试验用 0.14C-5Mn 钢化学成分 / %
Table 1 Analysis of test 0.14C-5Mn steel / %

C	Mn	P	S	N
0.14	5.0	0.008	0.002	0.003 0

从热轧钢板上加工拉伸试样毛坯,在马弗炉中进行 550、600、650 ℃保温 6 h 退火处理,退火后空冷至室温。沿平行于轧制方向加工成标准比例试样(如图 1 所示)。室温拉伸试验在 WE-300 型试验机上进行,应变速率为 $2.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-4}$ /s,试验过程中通过力、位移和引伸计等传感器测量试样在拉伸过程的变化,取拉伸全曲线、抗拉强度 R_m 、名义屈服强度 $R_{p0.2}$ 、断后伸长率 A 、最大力总伸长率 A_{gt}

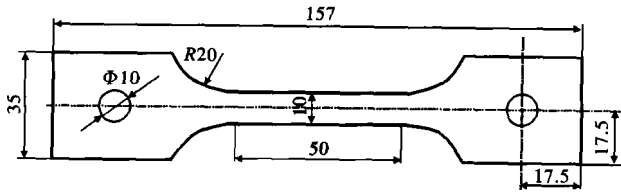


图 1 0.14C-5Mn 钢尺寸拉伸试样图

Fig. 1 Schematics of tensile specimen size of 0.14C-5Mn steel

等参量,每个试验条件进行 2 次拉伸试验取平均值。

附带金相样品经机械研磨、抛光后,用 2% 硝酸酒精腐蚀,在日立 S-4300 扫描电镜(SEM)下(配备 EDS 能谱仪,加速电压 15 kV)进行组织形貌分析。用 PHILIPS APD-10 型 X-射线衍射仪测量残余奥氏体含量,热处理后的样品经机械研磨和抛光后用 10% 草酸溶液电解(电压为 0.5 V)约 2 min 以去除残留应力,X 射线衍射仪使用 Co 靶,管流管压分别

为 35 mA 和 35 kV,使用石墨晶体单色器,采用步进扫描方式,扫描 2θ 范围是 $45^\circ \sim 115^\circ$,步长 0.02° ,积分时间 0.4 s。利用铁素体的(200)和(211)以及奥氏体的(200)、(220)和(311)晶面的积分强度通过比较法得出残余奥氏体的体积分数。

2 试验结果及分析

2.1 微观组织

图 2 为试验钢热轧板在 550 ~ 650 °C 保温 6 h 后空冷至室温的 SEM 照片。热轧态样品获得了全马氏体组织,在 550 °C 退火的样品呈现高温回火组织的特点,马氏体板条界模糊,存在大量析出物。600 °C 和 650 °C 退火的样品出现了明显的板条形貌,呈现凸出与凹陷的组织特征,凸出的组织耐腐蚀,而凹陷的组织耐蚀性较差,随着退火温度的升高,凸出和凹陷组织越来越分明,凸出的组织在不断

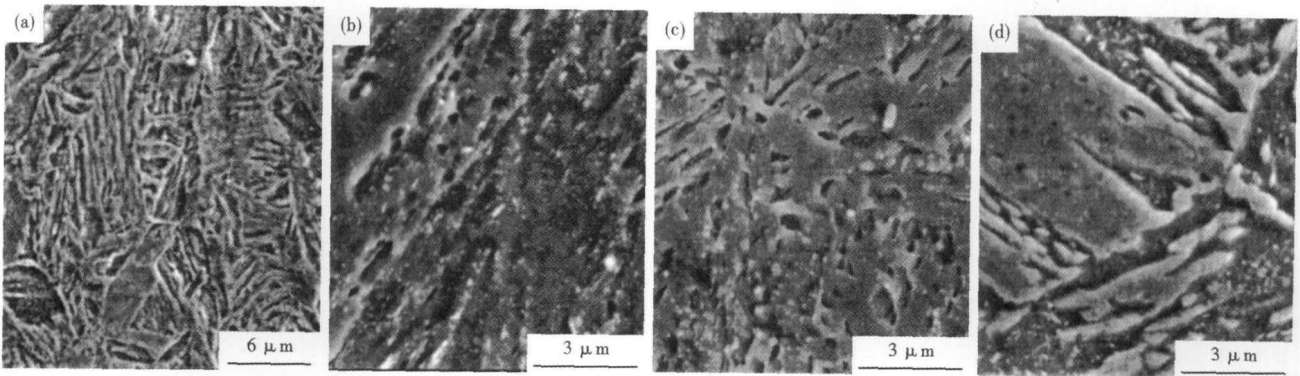


图 2 0.14C-5Mn 钢组织形貌:(a)热轧态;(b)550 °C;(c)600 °C;(d)650 °C,退火 6 h,SEM

Fig. 2 Morphology of structure of 0.14C-5Mn steel: (a) hot-rolled status; annealed at (b) 550 °C (c) 600 °C and (d) 650 °C for 6 h, SEM

增长增宽,同时碳化物也在不断减少。

利用 XRD 测量了奥氏体体积分数,热轧态试验钢奥氏体体积分数为 0,经 550、600、650 °C 退火 6 h 后出现了逆转变奥氏体,获得的奥氏体体积分数分别为 1.96%、14.75%、30.11%,可见,随着温度的升高,逆转变奥氏体的体积分数在不断增多。

利用 Thermo-Calc 软件模拟计算 Fe-C-5Mn 系平衡相图(图 3),对于碳含量 0.14% 的成分系(图 3 中虚线所示),温度在 A_3 以上为 FCC 相,温度在 $A_1 \sim A_3$ 之间时为 BCC + FCC,温度在 A_1 以下时为 BCC + Fe_3C + FCC。从图 4 可以看出,600 °C 退火温度处于钢的 A_1 点以下,钢中存在较多的碳化物,退火温度为 600 °C 时,接近钢的 A_1 温度,具有一定量的奥氏体相,当退火温度达到 650 °C 时,钢中奥氏体体积分数明显增高。这种逆相变奥氏体在退火过程

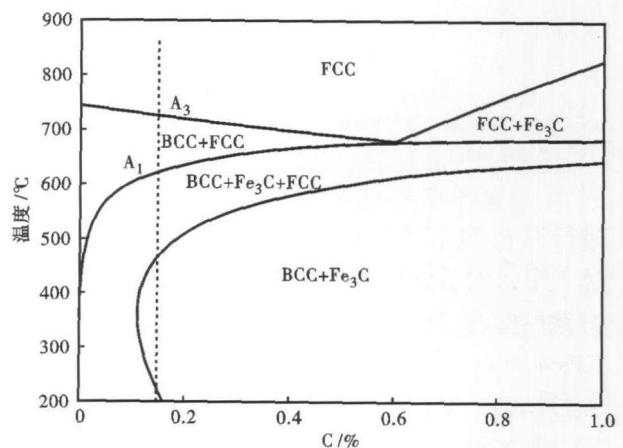


图 3 Fe-C-5Mn 钢平衡相图

Fig. 3 Equilibrium phase diagram of Fe-C-5Mn steel

中形成,并且在室温仍能以一定数量稳定存在,说明具有一定的稳定性。

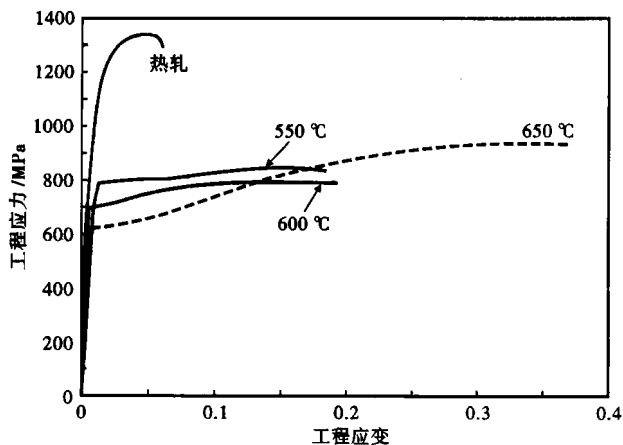


图 4 0.14C-5Mn 钢 4 mm 板工程应力-应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-strain curves of 4 mm plate of 0.14C-5Mn steel

用 EBSD(电子背散射衍射法)对 0.2C-5Mn 钢在 650 °C 退火过程中的研究表明^[5],凸出的组织为铁素体相,而凹陷的组织为逆相变奥氏体相,这种逆相变奥氏体在退火过程中逐渐形成,在晶界或板条束界形核长大,随退火时间的延长会略发生粗化。

2.2 力学性能

试验钢热轧及退火后进行单轴拉伸试验,试验结果如表 2 所示,工程应力-工程应变曲线如图 4 所示,可见,热轧态的强度水平最高,但断后伸长率最低;热轧态的钢板经退火处理后,强度水平降低,但断后伸长率明显提高。相比之下,随着退火温度的升高,钢的屈服强度降低,而伸长率(尤其是均匀伸长率)及加工硬化能力明显增大,退火温度为 650 °C 的样品抗拉强度达到 945 MPa,均匀伸长率达到 33.5%,钢的强塑积达到 37.3 GPa%。

表 2 0.14C-5Mn 钢 4 mm 板拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of 4 mm plate of 0.14C-5Mn steel

工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	均匀伸长率/%
热轧	1355	920	14.0	-
热轧 + 650 °C × 6 h 空冷	945	562	39.5	33.5
热轧 + 600 °C × 6 h 空冷	805	675	24.5	10.5
热轧 + 550 °C × 6 h 空冷	825	740	19.5	7.75

热轧态的板材为全马氏体组织,同时继承了热轧过程中产生的大量缺陷,其中位错密度很高,在拉伸过程中容易加工硬化,因此其屈服强度和抗拉强

度较高。

热轧态的钢板经退火后,钢中产生了一定量的奥氏体组织,并且随退火温度的升高,奥氏体体积分数在不断增加,奥氏体属于面心立方结构,容易产生滑移,因此试验钢屈服强度下降。拉伸变形过程中,逆相变中锰钢中的奥氏体体积分数随应变量的增加逐渐降低^[5],说明发生了马氏体相变^[6],马氏体转变时发生体积膨胀,并且产生大量的位错,产生相变强化,提供持续加工硬化,相变强化有效地推迟了颈缩的产生,产生 TRIP 效应,最终钢的抗拉强度和伸长率同时提高^[7]。

3 结论

(1) 热轧 0.14C-5Mn 钢在退火过程中产生逆相变奥氏体,随退火温度的升高,奥氏体的体积分数逐渐增加。

(2) 逆相变奥氏体在拉伸过程中产生 TRIP 效应,提高钢的抗拉强度和伸长率,试验钢在 650 °C 退火 6 h 获得抗拉强度为 945 MPa,强塑积为 37.3 GPa% 的力学性能。

国家重点基础研究开发计划项目(No2010CB630803)

参考文献

- [1] 董瀚,曹文全,时捷,等.第3代汽车钢的组织与性能调控技术[J].钢铁,2011,46(6):1-11.
- [2] 董瀚,王毛球,翁宇庆.高性能钢的 M³ 组织调控理论与技术[J].钢铁,2010,45(7):1-7.
- [3] Shi J, Sun X J, Wang M Q, et al. Enhanced Work-hardening Behavior and Mechanical Properties in Ultrafine-grained Steels with Large-fractioned Metastable Austenite[J]. Scripta Materialia, 2010(63): 815-818.
- [4] Shi J, Cao W Q, Dong H. Ultrafine Grained High Strength Low Alloy Steel with High Strength and High Ductility[J]. Materials Science Forum, 2010, 654-656: 238-241.
- [5] Cao W Q, Shi J, Wang C, et al. The 3rd Generation Automobile Sheet Steels Presenting with Ultrahigh Strength and High Ductility: ICAS2010: Proceedings of International Conference on Advanced Steels, Guilin, November 9-11, 2010[C]. Berlin: Springer, c2011.
- [6] 王存宇. 30GPa% 级超高强度马奥组织钢的研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2010.
- [7] 康永林, 王波. TRIP 钢板的组织、性能与工艺控制[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(3): 62-66.

石发才(1974-),男,工程师,1999年武汉科技大学毕业,汽车热轧板开发。E-mail:shifc@tisco.com.cn

收稿日期:2012-07-25