

超低碳钢铁素体轧制工艺及其轧后显微组织

罗德信, 桂江兵

(武汉钢铁(集团)公司技术中心, 湖北武汉 430080)

摘要: 采用 THERMECMASTOR-Z 热/力模拟试验机研究了超低碳钢在铁素体区轧制过程的形变特征和流变应力, 采用双段压缩试验方法研究了不同变形温度、道次间隔时间和变形程度对钢的流变应力和组织的影响。结果表明: 采用铁素体轧制工艺, 在 800~900 °C 时流变应力与奥氏体轧制相近, 第七道次轧制的累积应变是设定应变的 5.08 倍; 与常规轧制相比细化了晶粒尺寸。

关键词: 铁素体轧制; 超低碳钢; 流变应力

中图分类号: TG335.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)12-0080-04

The Ferrite Rolling Techniques and Microscopic Structure of Ultra Low Carbon Steel

LUO De-xin, GUI Jiang-bing

(Wuhan Iron and Steel Corporation, Wuhan 430080, China)

Abstract: To address the characteristics of deformation behavior and flowing stress of ultra low carbon steel in the hot-strip mill processing, a set of simulations were performed with THERMECMASTOR-Z thermo dynamic simulator. Furthermore, the effects on the steel flowing stress and metallic structures resulted from different deformation temperatures, intervals and extend had been investigated by dual compressing experimental method. These data indicate that The flowing stress deformed during 800—900 °C tends to be the same level with the value at austenite deformation region. The accumulated strain at the Tth pass is 5.08 times as much as the designed strain when applying ferrite rolling techniques, which is preferred for refined crystallization.

Key words: ferrite rolling; ultra low carbon steel; flowing stress

0 引言

铁素体轧制是近年发展起来的一种新的轧制工艺, 通过对超低碳钢实施控轧控冷, 使钢板具有单一的铁素体组织、有利的织构和微量的碳氮化合物, 可使热轧板性能达到冷轧商用板(CQ级)、冲压板(DQ级)的水平, 可供直接使用或作冷轧生产的原料, 具有价格便宜、质软和非时效的优点。由于在低温轧制, 具有节能、减少氧化铁皮、降低轧辊磨损及产品更薄的优点, 因而得到了广泛的研究与应用。

在铁素体轧制时, 精轧温度是在 A_3 以下, 这种低温轧制方法对设备的安全运行提出了挑战。这表现在两方面: 低温轧制增加轧机负荷; 由于热连轧过程轧件变形的特点是应变速率快, 道次间隔时间短, 使得钢中的回复再结晶过程来不及完成, 加工硬化

引起的累积应变增加, 最终引起轧制负荷增加。为了降低轧制负荷, 作者结合具体热轧生产工艺特点, 研究了超低碳钢在铁素体区变形的行为和特征, 确定了较佳的轧制工艺。

1 试样制备与试验方法

试样从武钢生产的热轧深冲钢(RSC)坯料上截取, 其化学成分(质量分数)为: 0.0067C, 0.015Si, 0.012Mn, 0.045Ti, 0.012P, 0.010S, 余Fe。试样尺寸为 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 该钢的 A_{33} 温度为 935 °C (应变率 30%)。试验在 THERMECMASTOR-Z 热加工模拟试验机上进行, 将热电偶焊接在试样上, 置于真空室中, 试验程序输入计算机, 由计算机控制液压装置移动和高频发生器的输出, 对变形过程的温度、变形量和间隔时间进行控制。用数值记录装置收集试验中的力-位移信号, 对记录的数据分析处理, 得到钢的流变应力、应变数据。

试验包括两部分内容: (1) 采用单道次压缩试

收稿日期: 2005-10-31; 修订日期: 2006-07-12

作者简介: 罗德信(1953—), 男, 湖北武汉人, 教授级高级工程师。

验方法研究变形温度对流变应力的影响。设定变形温度为 $700 \sim 1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率 $0.1 \sim 70\text{ s}^{-1}$, 最大应变量为 0.8 。试样奥氏体化温度 $1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 180 s ; 然后冷却到不同的温度下变形, 得到试验钢在热加工时的应力-应变曲线; (2) 采用连续变形方法研究变形工艺对超低碳钢流变应力和组织的影响。首先采用恒温两道次变形方法^[1]研究了不同变形条件对加工硬化率的影响。试验温度 $700 \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变量为 $0.25 \sim 0.6$, 道次间隔时间 $0.5, 10, 30\text{ s}$ 。然后结合现场生产工艺, 研究在铁素体区变形时的组织变化, 模拟工艺见表 1。将现场七道次变形分成两个阶段, 第一段模拟 F1、F2 道次, 第二段模拟 F3~F7 道次, 每段总的应变变量控制在 1.2 左右。多道次变形试样经过金相制样、硝酸酒精溶液腐蚀, 用 Olympus PME3 型光学显微镜观察组织和晶粒尺寸。

表 1 模拟多道次变形工艺

Tab. 1 The multi-pass deformation techniques of simulation test

变形道次	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
常规工艺温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 016	996	976	951	926	901	871
试验工艺温度/ $^{\circ}\text{C}$	910	890	870	850	830	805	780
应变速率/ s^{-1}	10.4	17.3	24.8	36.3	47.6	47.3	44.1
间隔时间/s	4.30	2.30	1.90	1.10	0.87	0.70	

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

由图 1 可见, 单道次轧制时, 随着应变变量、应变速率的增加, 流变应力发生明显变化。当变形温度在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率大于 10 s^{-1} 时, 应力曲线呈现指数增加, 即在应变变量小于 0.4 时, 流变应力增加较快, 而在应变变量大于 0.4 时, 流变应力增加缓慢; 当应变速率小于 10 s^{-1} 时, 出现明显的动态再结晶过程。而在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形, 看不到发生动态再结晶的特征。试验结果表明, 变形温度越高, 变形速率越低, 越有利于动态再结晶的发生。而在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形很难发生再结晶, 加工硬化残留在钢中。

2.2 变形条件对流变应力的影响

由图 2 可见, 单道次轧制时随着变形温度降低, 流变应力曲线呈现先升高、再降低、再升高的变化规律, 流变应力开始降低的温度约在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与应变速率有关。在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 应力再次明显上升, 在此区间, 材料流变应力较低, 在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的流变应力与 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相当。根据对流变应力变化区间的分析, 最佳的铁素体轧制区间在 $800 \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在此区间变形,

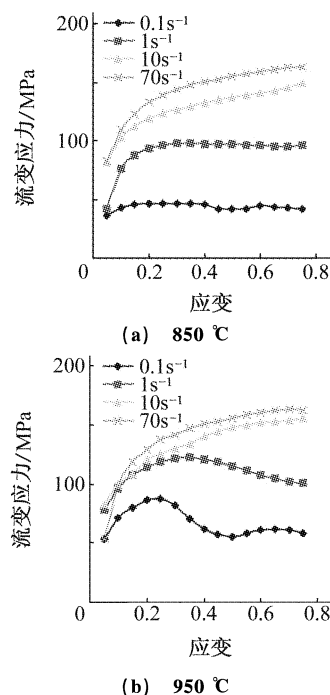


图 1 不同温度下的热加工应力-应变曲线

Fig. 1 The relationship between the stress-strain hot-work under different temperatures

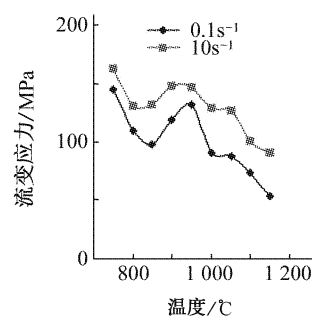


图 2 变形温度与流变应力的关系

Fig. 2 The relationship between deformation temperatures and flowing stress

材料的流变应力低, 与奥氏体区的流变应力相近, 这一特征为在铁素体区实施控轧提供了基础。

2.3 加工硬化对流变应力的影响

试验得到双道次变形时的流变应力, 通过实测第一道次的屈服强度 σ_1 、第二道次的屈服强度 σ_2 和峰值应力 σ_m , 可以计算出材料在连续变形时产生的加工硬化率 λ 。

$$\lambda = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_m - \sigma_1) \quad (1)$$

由于热加工时加工硬化与软化互相转化, 软化程度 χ_s 与加工硬化率存在以下关系^[2]:

$$\chi_s = 1 - \lambda \quad (2)$$

软化程度与变形温度、间隔时间和变形量等有关^[3]。

由图 3 可见, 当温度低于 $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 两道次轧制

时钢的加工硬化率约 80%,变形引起的加工硬化无法消除,残留在钢中;随着温度升高,软化程度明显增强,在温度大于 840 °C 后,软化程度明显加快。由此可见,变形温度是软化程度的驱动力。

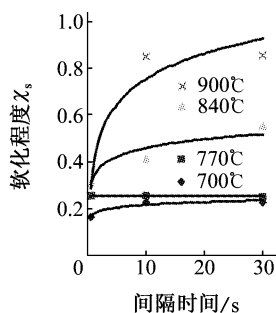


图 3 变形工艺与软化程度的关系

Fig. 3 The relationship between deformation techniques and static softness

影响软化程度的因素除了温度之外,还有保持时间的长短,道次之间停留时间越长,回复效果越明显。当温度大于 770 °C 时,保持时间的延长有利于静态回复和再结晶产生,使得软化程度增加。由于热连轧速度快,机架间隔时间非常短,由图可见,在不同温度下变形都存在加工硬化现象,导致残余应变的产生,并且遗传给下一工序。残余应变 $\Delta\epsilon_i$ 的计算公式为^[4]:

$$\Delta\epsilon_i = \epsilon'_{i-1} \times \lambda_i \quad (3)$$

式中: ϵ'_{i-1} 为 $i-1$ 道次累积应变变量; λ_i 为 i 道次的加工硬化率。

考虑加工硬化引起的残余应变,连轧多道次变形道次累积应变 ϵ' 为:

$$\epsilon' = \epsilon_i + \Delta\epsilon_{i-1} \quad (4)$$

式中: ϵ' 为第 i 道次累积应变; ϵ_i 为 i 道次应变变量; $\Delta\epsilon_{i-1}$ 为 $i-1$ 道次残余应变。

以试验得到的铁素体轧制区间的数据为基础,制定了模拟工艺,计算了七道次变形的累积应变以及对流变应力的影响,计算结果见表 2。可见,连续变形产生的硬化率随着变形道次的增加而升高,表明超低碳钢在铁素体区轧制累积应变对钢的流变应力影响是明显的,随着变形道次的增加,残余应变愈来愈大,形成了明显的累积应变^[2],在第七道次的残余应变达到 0.325 7,该道次的累积应变 0.406 是设定应变变量 0.08 的 5.08 倍,将引起钢的流变应力上升,导致轧制负荷加大。

2.4 低温变形对组织的影响

低温变形时流变应力变化也在一定程度上反映

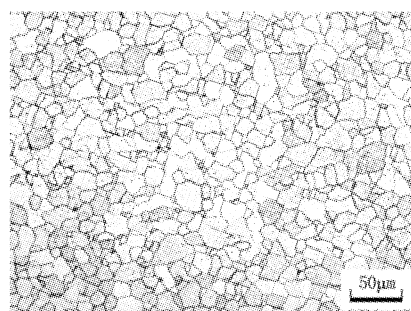
表 2 计算的道次累积应变

Tab. 2 The calculated residual strain accumulated in each pass

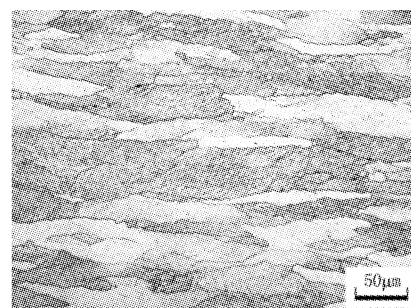
变形道次	温度 / °C	应变变量 ϵ	道次硬化率 λ	残余应变 $\Delta\epsilon$	累积应变 ϵ'	流变应力 / MPa
F1	910	0.53	0	0	0.530	156.82
F2	890	0.58	0.235 8	0.125 0	0.705	178.95
F3	870	0.42	0.291 1	0.205 2	0.625	131.38
F4	850	0.26	0.398 3	0.249 0	0.509	128.04
F5	830	0.26	0.504 1	0.256 6	0.517	107.69
F6	805	0.20	0.572 4	0.307 2	0.507	133.53
F7	780	0.08	0.645 3	0.325 7	0.406	146.64

了材料微观组织的变化。试验工艺见表 1。采用两种变形工艺,一种是常规工艺,即在奥氏体区轧制;另一种是根据试验制定的工艺,即铁素体区轧制。两种工艺变形后喷水冷却,固定瞬时组织。

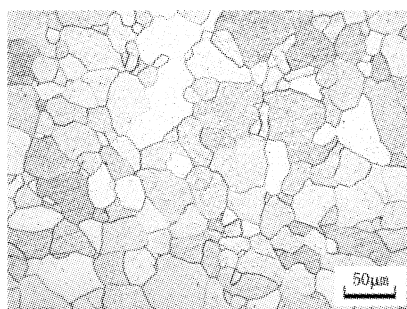
由图 4 可见,在相同应变变量、应变速率下,铁素体轧制二道次压缩在终轧温度为 890 °C 时,钢的晶粒细小,铁素体晶粒度为 9.5 级;而采用常规工艺(终轧温度 996 °C)得到的晶粒度为 5.5 级,晶粒粗大。经过五道次连续变形后,铁素体轧制终轧温度在 780 °C 时的组织大部分晶粒被压扁、拉长,形成变形带,在晶界上有小的晶粒出现,尚未完全再结晶,经过静态再结晶后晶粒会更细。而采用常规工艺得到的晶粒度为 10 级。从变形后的组织来看,采用铁素体轧制工艺得到的晶粒更细小。



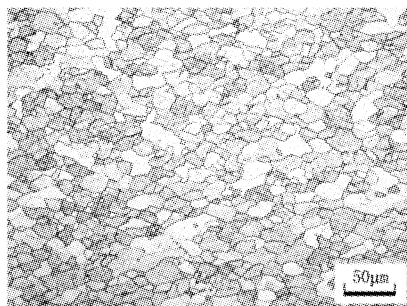
(a) 试验工艺二道次变形 终轧 890 °C



(b) 试验工艺五道次变形 终轧 780 °C



(c) 常规工艺二道次变形 终轧 996 °C



(d) 常规工艺五道次变形 终轧 871 °C

图 4 不同工艺条件轧制后的显微组织

Fig. 4 Microscopic structures under different technical conditions

3 结 论

(1) 超低碳钢在 800~900 °C 铁素体轧制时,流变应力与在奥氏体区轧制应力相近。

(2) 在铁素体区变形加工硬化现象明显,由于残余应变影响,在第七道次变形的累积应变是设定应变的 5.08 倍。

(3) 采用铁素体轧制工艺与常规工艺(奥氏体轧制)相比,得到的晶粒尺寸更细小。

参考文献:

- [1] Laasraoul A, Jonas J J. Recrystallization of austenite after deformation at high temperatures and strain rates-analysis and modeling[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22A: 151—159.
- [2] 周纪华,管克智. 金属塑性变形阻力[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [3] 赵 昆,王昭东,吴景辉. IF 钢铁素体区热变形后的静态软化行为[J]. 钢铁研究学报, 1999, (4): 18—21.
- [4] 徐守印,邸洪双,张久信,等. 热轧双相钢高速变形抗力[J]. 钢铁, 1991, (3): 33—37.

(上接第 55 页)

为 1.5%,分散剂与铜粉充分吸附后对润滑油流变性能影响较小。分散剂聚甘油酯通过物理吸附和化学吸附,吸附到铜微粒表面形成空间位阻效应,并且是通过极性酯基和羟基与微粒表面形成化学吸附。

参考文献:

- [1] 周静芳,张治军,王晓波. 油溶性铜纳米微粒作为液体石蜡添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(2): 123—126.
- [2] 马剑奇,王晓波,付兴国,等. 油溶性 Cu 纳米微粒作为 15W/40 柴油机油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(2): 134—138.
- [3] 赵 斌,刘志杰. 超细铜粉的水合肼还原法制备及其稳定性研究[J]. 华东理工大学学报, 1997, 23(3): 372—376.
- [4] 王 彬,倪永全. 聚甘油的折光率与聚合度[J]. 无锡轻工大学学报, 2000, 19(3): 273—275.
- [5] Xu Q, Vasudevan T P, Somasundaran P. Stabilization of kaolinite suspensions by anionic-nonionic surfactant mixtures[J]. Disp Sci Technol, 1991, 12: 83—93.
- [6] 高 濂,孙 静,刘阳桥. 纳米粉体的分散及表面改性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] Sata T, Ruch R. Stabilization of colloidal dispersion by polymer adsorption[M]. New York: Dekker, 1984.
- [8] Johnson Jr R E, Morrison Jr W H. Ceramic powder dispersion

in nonaqueous systems[J]. Advances in Ceramics, 1987, 21: 323—348.

- [9] Jan Mewis, Jan Vermant. Rheology of sterically stabilized dispersions and lattices[J]. Progress in Organic Coatings, 2000, 40: 111—117.
- [10] Jan Mewis, Jan Vermant, Ungyu Paik, et al. The effect of electrostatic repulsive forces on the stability of BaTiO₃ particles suspended in non-aqueous media[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1998, 135: 77—88.
- [11] Mikeska K, Cannon W R. Non-aqueous dispersion properties of pure barium titanate for tape casting[J]. Colloid Surf, 1988, 29: 305—321.
- [12] Lee B I, Paik U. Effect of aminosilane adsorption on the rheology of silica powders in non-aqueous media[J]. Mater Sci, 1992, 27: 5692—5700.
- [13] Shen Zhi-gang, Chen Jian-feng, Zou Hai-kui, et al. Rheology of colloidal nanosized BaTiO₃ suspension with ammonium salt of polyacrylic acid as a dispersant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2004, 244: 61—66.
- [14] Tseng W J, Chen C N. Effect of polymeric dispersant on rheological behavior of nickel-terpineol suspensions[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 347: 145—153.
- [15] Wang Liwu, Wolfgang Sigmund, Fritz Aldinger. A novel class of dispersants for colloidal processing of Si₃N₄ in non-aqueous media[J]. Materials Letters, 1999, 40: 14—17.