

低碳钢的热变形行为

熊毅^{1,2}, 蔡大勇³, 赵胜利^{1,2}, 文九巴^{1,2}, 张春玲³

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 河南省有色金属材料科学与工程重点实验室, 河南 洛阳 471003; 3. 燕山大学 亚稳材料制备科学与技术国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:采用 Gleeble-3500 热模拟试验机研究了低碳钢在 700~1050 °C、0.01~10 s⁻¹ 条件下的热变形行为。结果表明,低碳钢在奥氏体区、铁素体区和奥氏体-铁素体两相区的热变形行为不同:在奥氏体区和铁素体区变形时,随变形温度的降低流变应力增加;而在两相区变形时,随变形温度的降低流变应力显著降低。低碳钢奥氏体区和铁素体区的热变形激活能分别为 322 和 219 kJ/mol;通过回归分析,确定了该低碳钢奥氏体区和铁素体区的热变形方程,为低碳钢热变形工艺优化提供了理论依据。

关键词:低碳钢;铁素体轧制;热变形方程;热变形激活能

中图分类号: TG142.31

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2008)18-0014-03

Hot Deformation Behavior of Low Carbon Steel

XIONG Yi^{1,2}, CAI Dayong³, ZHAO Shengli^{1,2}, WEN Jiuba^{1,2}, ZHANG Chunling³

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Henan Key Laboratory of Advanced Non-Ferrous Metals, Luoyang 471003, China; 3. State key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Hot deformation behavior of low carbon steel was study by Gleeble 3500 simulator at the temperature of 700~1050 °C and strain rate of 0.01~10 s⁻¹. The results show that the hot deformation behavior of low carbon steel is different among the austenitic region, the ferritic region and the γ - α region. In the austenitic region and ferritic region the flow stress increases with the decrease of deformation temperature; but it decreases obviously with the decrease of deformation temperature in the γ - α region. The hot deformation activation energy of the low carbon steel in austenitic region and ferritic region is 322 kJ/mol and 219 kJ/mol respectively. And by regression analysis, the hot deformation equations in austenitic region and ferritic region are established. The above results can be a reference for hot working of the low carbon steel.

Key words: low carbon steel; ferrite rolling; hot deformation equation; hot deformation activation energy

铁素体区轧制又称相变控制轧制、低温热机械控轧,是近年发展起来的一种新轧制技术^[1]。铁素体区轧制的特点是:在奥氏体区进行粗轧,粗轧后完成奥氏体向铁素体的转变;在铁素体区进行精轧,轧后热卷取后,在冷却过程中完成静态再结晶,整个过程连续完成。采用铁素体区轧制技术生产薄带钢,与传统的“热轧-冷轧-退火”工艺相比,可大大简化工艺,提高生产率,降低成本;同时,铁素体区轧制工艺中,采用低的板坯加热温度,从而降低整个轧制过程能耗,还可减少氧化铁

皮、提高成材率。采用铁素体轧制技术生产薄带钢,可用中等厚度的连铸坯直接进行轧制,在现有连铸连轧生产线上实现低碳钢铁素体区轧制工艺,有重大的工程意义,将逐渐成为薄带钢生产的主要发展方向^[2-3]。

目前铁素体区轧制技术在国外已得到应用,美国的 LTV 钢铁公司已成功地采用铁素体区热轧技术生产 IF 钢超薄板^[4],宝钢等企业也正在大力开发。但目前铁素体区轧制技术比较成功的例子,都是采用 IF 钢,而在国内很多钢厂尚不具有 IF 钢的生产能力,大部分薄板钢材都采用 $w(C)<0.1\%$ 的低碳钢生产。因此研究低碳钢铁素体区轧制技术具有重要的实际意义,而这方面的研究国内外才刚刚起步。目前的研究表明,铁素体轧制技术的优点在低碳钢薄板上远未得到发挥,主要是钢板的深冲性能很不理想^[5]。因此,为了确定低碳钢适用的

收稿日期:2008-05-13

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2007000374);河南科技大学人才科学研究基金资助项目(07003)

作者简介:熊毅(1975-),男,湖北当阳人,讲师,博士,主要从事钢的超细化及塑性成形过程的数值模拟;
电话:0379-64231269;E-mail:xy_hbdy@163.com

铁素体轧制工艺,本文以此为研究目标开展工作,以便为实际生产提供理论指导。

1 实验材料及方法

热变形试验用钢取自唐钢 FTSR 线上的连铸钢坯,其化学成分(质量分数,%)为:0.04C,0.05Si,0.26Mn,0.006S,0.01P,余为 Fe。

低碳钢的热变形试验在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行。试样的尺寸为 $\phi 10\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。为了保证试样温度的均匀性,采用不锈钢耐热合金楔形底座及碳化钨圆柱形压头,试样与压头之间垫钼片以保证润滑及隔热,并在试样与钼片之间涂抹一层 MoS_2 ,以起到更好的润滑效果,减小试验过程中由于试样端部的摩擦力而导致的试样鼓肚现象。

试样以 10°C/s 的速率加热到 1150°C ,保温 5 min;再以 10°C/s 的速率冷却到预定变形温度(1050°C 、 1000°C 、 950°C 、 900°C 、 875°C 、 850°C 、 825°C 、 800°C 和 700°C)保温 30 s;然后以不同应变速率进行单道次压缩试验,应变速率分别为 0.01 、 0.05 、 0.1 、 1 和 10s^{-1} ,变形量为 50%。

2 实验结果及分析讨论

2.1 真应力-真应变曲线分析

实验用钢在不同变形温度和不同应变速率下的真应力-真应变曲线如图 1 所示(仅列出具有代

表性的 5 个温度)。可以看出,随变形温度的升高及应变速率的降低,流变曲线从加工硬化型向动态回复型和动态再结晶型转变。在单相铁素体区域,即变形温度为 $700\sim 825^\circ\text{C}$ 时,随应变速率的降低,流变曲线从加工硬化型向动态回复型转变,此时流变曲线不发生动态再结晶,在 700°C 变形时,动态回复型曲线仅在应变速率为 0.01s^{-1} 时出现,其他流变曲线均呈现加工硬化型特征;随变形温度升高至 825°C ,动态回复型曲线出现的临界应变速率也随之增大至 0.1s^{-1} ,图 1(a)、(b)。在单相奥氏体区域,即变形温度为 $900\sim 1050^\circ\text{C}$ 时,随应变速率的降低,流变曲线从加工硬化型向动态再结晶型转变,图 1(d)、(e);在铁素体和奥氏体共存的两相区域,即变形温度为 $825\sim 900^\circ\text{C}$ 时,流变曲线特征与单相铁素体区域类似。传统观点认为铁素体具有体心立方结构和较高的层错能,因此在变形过程中容易发生动态回复,而奥氏体具有面心立方结构和较低的层错能,容易发生动态再结晶,上述实验现象与传统观点极为吻合。

变形温度及应变速率对峰值应力的影响如图 2 所示。可以看出,峰值应力随温度变化可分为三个阶段:在单相奥氏体和铁素体区域内,峰值应力随变形温度的降低而升高;而在两相区域,峰值应力则随温度的降低显著降低。

2.2 低碳钢的热变形方程

变形温度和应变速率对低碳钢的热变形方程

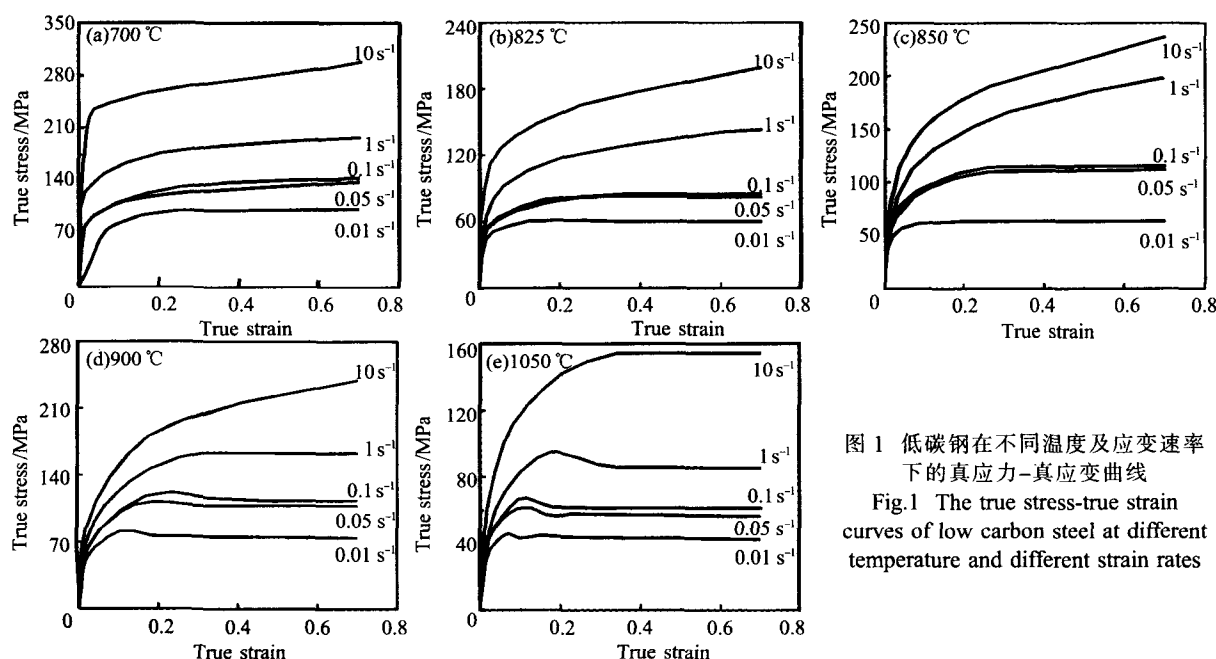


图 1 低碳钢在不同温度及应变速率下的真应力-真应变曲线
Fig.1 The true stress-true strain curves of low carbon steel at different temperature and different strain rates

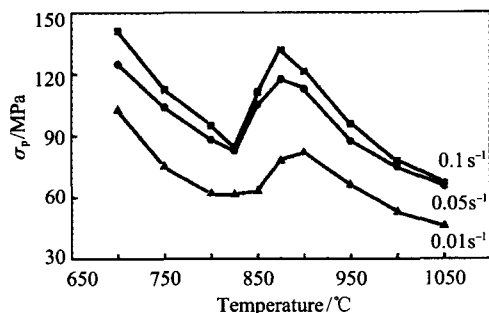


图2 变形温度和应变速率对峰值应力的影响

Fig.2 The influences of deformation temperature and strain rate on peak stress

有显著的影响。图3、图4分别给出了峰值应力与变形温度及应变速率的关系。可见, $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 与 $1/T$ 以及 $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 均呈线性关系, 相关系数均在 0.99 以上。随变形温度的下降和应变速率的提高, 热变形峰值应力逐渐增加。

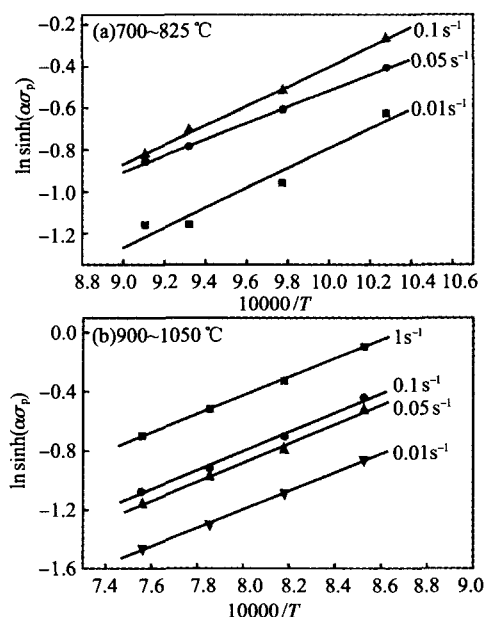


图3 峰值应力与变形温度的关系

Fig.3 The relation between peak stress and deformation temperature

Sellars^[6]认为, $\dot{\epsilon}$ 、 T 与 σ_p 之间存在一个普遍适用的双曲正弦关系式, 即:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: Q 为热变形激活能, R 为气体常数, A 、 n 为试验常数, $\alpha=0.005$ 。将式(1)取对数并整理得到:

$$\ln \sinh(\alpha \cdot \sigma_p) = -\frac{1}{n} \ln A + \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} + \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{RT} \quad (2)$$

通过回归分析, 可得在单相铁素体区, 低碳钢热变形激活能为:

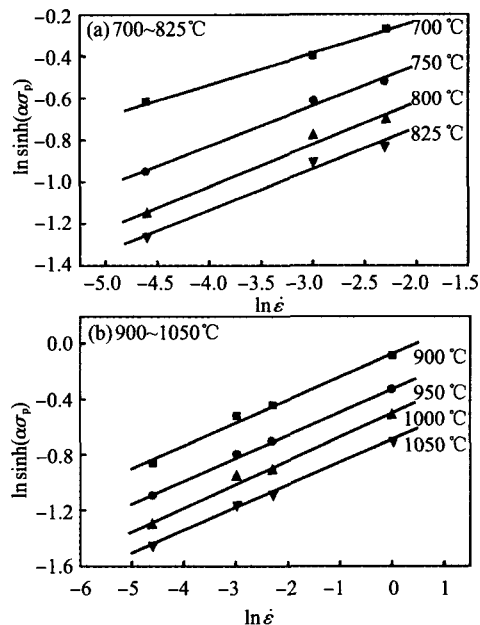


图4 峰值应力与应变速率的关系

Fig.4 The relation between peak stress and strain rate

$$Q=219 \text{ kJ/mol}, n=5.914, A=1.2789 \times 10^{14};$$

相应的热变形方程可表示为:

$$\dot{\epsilon} = 1.2789 \times 10^{14} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{5.914} \exp\left(-\frac{219000}{RT}\right) \quad (3)$$

在单相奥氏体区, 低碳钢热变形激活能为:

$$Q=322 \text{ kJ/mol}, n=6.07, A=3.7189 \times 10^{14};$$

相应的热变形方程可表示为:

$$\dot{\epsilon} = 3.7189 \times 10^{14} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{6.07} \exp\left(-\frac{322000}{RT}\right) \quad (4)$$

Z 参数被广泛用以表示变形温度及应变速率对热变形过程的综合作用, 通过已求得的热变形激活能 Q , 可以计算低碳钢热变形的 Z 参数 ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$)。低碳钢热变形峰值应力与 Z 参数的关系曲线如图 5 所示, 随着 Z 值的增加, 低碳钢热变形的峰值应力相应增加。

3 结论

(1) 在单相奥氏体区域, 低碳钢热变形激活能为 322 kJ/mol; 其热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 3.7189 \times 10^{14} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{6.07} \exp\left(-\frac{322000}{RT}\right).$$

(2) 在单相铁素体区域, 低碳钢热变形激活能为 219 kJ/mol; 其热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.2789 \times 10^{14} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{5.914} \exp\left(-\frac{219000}{RT}\right).$$

(3) 在单相奥氏体区域和铁素(下转第 20 页)

能下降^[12]。而 AEX4112 合金中形成的热稳定性高的 Al_2Ca 相沿着晶界分布,可在高温下阻止基体和晶界的滑移,使合金的抗蠕变性能得以提高。

4 结论

(1) 在 125~175℃、88~112MPa 下, AEX4112 合金的压蠕变量和蠕变速率随温度和应力的增加而增大;稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 的对数分别与 $\ln\sigma$ 和 $1/T$ 有较好的线性关系。

(2) 在本实验温度和压力条件下, AEX4112 合金的稳态压蠕变速率与温度和应力的关系为 $\dot{\epsilon}_s = 2.88 \times 10^{-13} \sigma^{6.24} \exp[-37510/(RT)]$; 应力指数 n 相近, 平均值为 6.24, 表观激活能 Q_a 相差不大, 平均值为 37.51 kJ/mol, 材料的结构常数为 2.88×10^{-13} 。

(3) AEX4112 合金中在晶界处形成的 Al_2Ca 相具有很高的热稳定性, 能有效地钉扎于晶界, 阻止位错和晶界滑移, 提高合金的抗压蠕变性能。

参考文献:

- [1] Polmear I J. Magnesium alloys and applications [J]. Materials Science and Technology, 1994, 10(1): 1-16.
- [2] Poktmear I J. Recent development in light alloys [J]. Materials Transaction JIM, 1996, 37(1): 12-31.
- [3] 丁绍松, 孙扬善, 白晶. Ca 对 AE41 合金的显微组织和力学性能的影响 [J]. 江苏冶金, 2003, 31(1): 11-15.
- [4] Koray Ozturk, Yu Zhong, Zi-Kui Liu, *et al.* Creep resistant Mg-Al-Ca alloys: computational thermodynamics and experimental investigation [J]. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 2003, 55 (11): 40-44.
- [5] 薛山, 孙扬善, 丁绍松, 等. Ca 和 Sr 对 AE42 合金蠕变性能的影响 [J]. 东南大学学报, 2005, 35(2): 261-265.
- [6] 黄德明, 陈云贵, 唐永柏, 等. AE42 和 Mg-Al-RE-Ca 合金的压蠕变性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(12): 1864-1868.
- [7] 刘子利, 陈照峰, 刘希琴, 等. Sb 合金化对 AE41 镁合金耐热性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2006, 20(2): 186-190.
- [8] 陈振华. 耐热镁合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [9] Wei X W, Zu X T, Fu H. Compressive creep resistance of Mg-14Li-Al-MgO/Mg₂Si composites [J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(8): 903-907.
- [10] Shi L, Northwood D O. Strain-hardening and recovery during the creep of pure polycrystalline Magnesium [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(3): 871-877.
- [11] Humble P. Towards a cheap resistant magnesium alloy [J]. Material Forum, 1997, 21: 45-56.
- [12] 平修二, 郭廷纬. 金属材料的高温强度理论设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. H

(上接第 16 页)

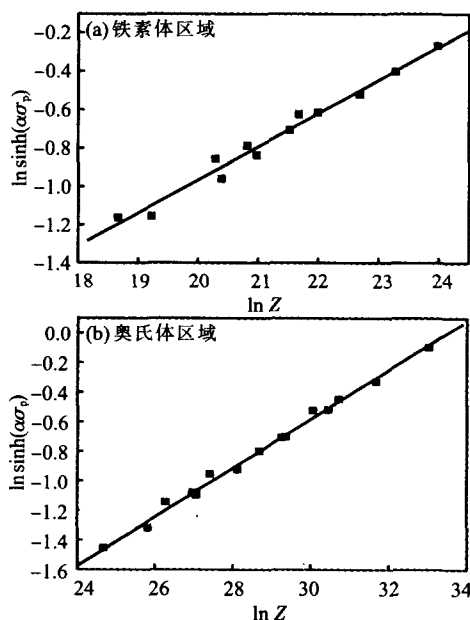


图 5 峰值应力与 Z 参数的关系

Fig.5 The relation between peak stress and Z

体区域内, 低碳钢峰值应力随变形温度的升高而降低, 而在两相区域内, 其峰值应力随变形温度的升高而升高。

参考文献:

- [1] Grossheim H, Schotten K, Bleck W. Physical simulation of hot rolling in the ferrite range of steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60(1-4): 609-614.
- [2] 陈小龙, 常军, 王建辉, 等. 铁素体区轧制技术及应用于钒钢生产的可行性 [J]. 钢铁钒钛, 2000, 2(6): 40-46.
- [3] 陈礼斌, 王维东, 耿立唐. 薄板坯连铸连轧生产中的铁素体轧制工艺 [J]. 轧钢, 2003, 20(2): 35-36.
- [4] 徐光, 徐楚韶, 赵嘉蓉. 国内外铁素体轧制的应用研究 [J]. 特殊钢, 2005, 26(5): 35-37.
- [5] 蔡大勇. 低碳钢铁素体轧制技术的应用研究 [R]. 唐山: 唐钢技术中心, 2005.
- [6] Sellars C M, Glover G. Recovery and recrystallization during high temperature deformation of iron [J]. Metall Trans, 1973, 4(3): 765-775. H