

环境适应性设计与分析

Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢热加工性能研究

崔海涛, 董旭光, 邵忠财

(沈阳理工大学, 沈阳 110159)

摘要: **目的** 研究 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢在 850~1050 °C, 不同应变速率条件下的热变形行为。**方法** 将实验钢锭热轧成 10 mm 厚板材, 然后取样在 MMS-300 多功能热模式试验机上进行单轴热压缩实验。根据获取的应力-应变曲线及微观组织演变规律, 系统研究 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢的热变形行为。**结果** 应变速率是影响 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢热变形行为的关键因素。在热变形过程中, 应变速率越低, Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢越容易发生动态再结晶。获得了实验钢的表观应力指数 $n=3.10$, 热变形激活能 $Q=412.151$ kJ/mol, 并建立了热加工方程。**结论** 当参数 $Z \leq 8.351 \times 10^{17}$ 时, Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢热加工性能较好。

关键词: 热变形; 微观组织; 动态再结晶; 高锰钢

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.001

中图分类号: TJ04; TG142.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)04-0001-04

Hot Deformation Behaviors of Fe-20Mn-4Al-2Si High-manganese Steel

CUI Hai-tao, DONG Xu-guang, SHAO Zhong-cai
(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

ABSTRACT: Objective To research hot deformation behaviors of Fe-20Mn-4Si-2Al high-manganese steel at 850 to 1050 °C and different strain rates. **Methods** Steel ingot for experiment was hot-rolled into 10 mm thick plate. Then it was sampled to carry out uniaxial hot compression test with MMS-300 multifunctional hot mode tester. Hot deformation behaviors of Fe-Mn-Si-Al high-manganese steel were investigated systematically based on the obtained stress-strain curve and evolvement rules of microstructure. **Results** Strain rate was the key factor that affected hot deformation behavior of Fe-Mn-Si-Al high-manganese steel. The dynamic recrystallization was likely to take place at low strain rate in hot deformation. The apparent stress exponent and the apparent activation energy of the specimens were 3.10 and 412.151 kJ/mol, respectively. The hot working equation of the tested steel was established. **Conclusion** The dynamic recrystallization was prone to occur when $Z \leq 8.351 \times 10^{17}$, and better hot deformation properties of Fe-20Mn-4Si-2Al high-manganese steel could be obtained under this condition.

KEY WORDS: hot deformation; microstructure; dynamic recrystallization; high-manganese steel

随着汽车工业的迅速发展, 先进高强韧性汽车用钢成为汽车轻量化的重要发展方向^[1-3]。由于 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢同时具备较高的强度和塑性, 在变形过程中产生形变诱导孪晶与形变诱导马氏体, 使得 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢具有较高的吸收能力, 在强度增加的同时塑性也得到提高, 是一种新型汽车用

钢^[4-6]。由于 Mn, Si, Al 等元素含量较高, 使得 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢的热塑性较差^[7], 热连轧时容易产生边裂。另外, 由于 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢的加工硬化率较大, 对工业轧机要求较高。因此, 在工业生产中需要首先解决 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢的成形问题。

要实现 Fe-Mn-Si-Al 系高锰钢的大规模工业化生

产,需要对其热变形行为进行深入研究,明确加工温度、应变速率等关键因素对其流变行为的影响规律。文中就典型成分的高锰钢进行了不同条件下的热模拟单道次压缩实验,分析了实验钢在高温变形过程中的热变形行为,观察了显微组织变化规律。利用热模拟实验得到不同变形温度和速率下的流变应力,建立该实验钢的变形抗力模型,对实际生产过程中的工艺制定及自动控制具有重要指导意义。

1 实验材料和方法

实验钢采用真空感应炉熔炼,通过化学成分检测,各成分的质量分数见表1。实验钢铸锭制备完成后开坯,并轧制成厚10 mm的板材。在轧后的板材上切取热模拟试样,并在MMS-300型试验机上进行单道次热模拟压缩实验。试样尺寸为 $\phi 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,制定的热模拟变形温度区间为850~1050 $^{\circ}\text{C}$,间隔50 $^{\circ}\text{C}$ 取一个实验温度,变形速率 $\dot{\epsilon}$ 分别为0.01, 0.10, 1.00, 10.0 s^{-1} ,具体实验工艺为:将试样以20 $^{\circ}\text{C/s}$ 加热至1200 $^{\circ}\text{C}$;保温3 min,确保试样完全奥氏体化;以10 $^{\circ}\text{C/s}$ 的冷却速度,将试样冷却至既定变形温度后并保温20 s;以既定变形速率将试样压缩至真应变0.6;变形结束后,为保留高温组织,立即对试样进行喷水冷却。

完成热模拟后的试样沿纵截面切取并制备金相试样,然后再在光学显微镜下观察其显微组织。

表1 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢的化学成分

%					
Mn	Si	Al	C	S	P
19.5	3.95	1.98	0.02	0.007	0.009

2 实验结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线分析

图1为实验钢在不同温度条件下,应变速率为 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon}=1.00\text{ s}^{-1}$ 时的流变应力曲线。可以看出,当应变速率较低时($\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$),流变应力随应变的增加先迅速增加到最大值而后逐渐下降,在变形过程中发生动态再结晶是造成这一现象的原因。当应变速率较高($\dot{\epsilon}=1.00\text{ s}^{-1}$)时,流变应力在达到峰值后基本不再发生变化,说明变形过程中实验钢发生了动态回复。

图2为不同应变速率下实验钢在900 $^{\circ}\text{C}$ 时的流变曲线。由图2可以看出,变形温度一定,随着变形速率的增加,实验钢的峰值应力和峰值应变也随之增加。在应变速率比较低时,试样发生了明显的动态再

结晶,流变应力曲线在 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 及 $\dot{\epsilon}=0.10\text{ s}^{-1}$ 时为动态再结晶型。随着变形速率的增加,峰值应力和应变提高,动态再结晶发生困难。当 $\dot{\epsilon}=1.00\text{ s}^{-1}$ 及 $\dot{\epsilon}=10.0\text{ s}^{-1}$ 时,流变应力曲线为动态回复型。这是因为变形速率越大,加工硬化现象越显著。以上结果说明应变速率是影响热加工性能的主要因素。

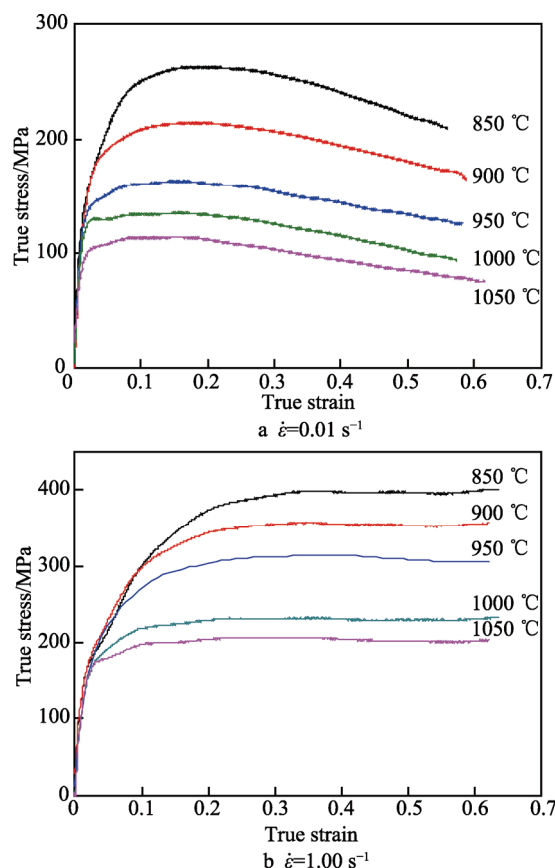


图1 实验钢在不同温度下的流变应力曲线

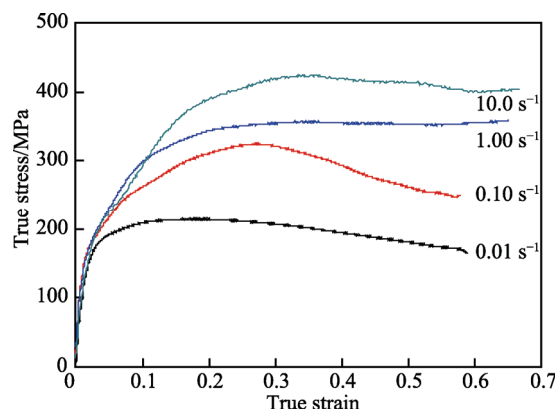


图2 实验钢在 $t_d=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同应变速率下的流变应力曲线

2.2 微观组织的观察

图3为 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 的应变速率时,实验钢在不同变形温度下的金相组织。可以看出,当变形温度 $t_d=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,组织内有少量再结晶晶粒;当 $t_d=900\text{ }^{\circ}\text{C}$

时,再结晶晶粒有所增多;当 $t_d=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,产生了大量的再结晶晶粒;当变形温度继续升高到 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和

$1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,显微组织全部为再结晶晶粒。可见,变形温度越高,动态再结晶现象越明显。

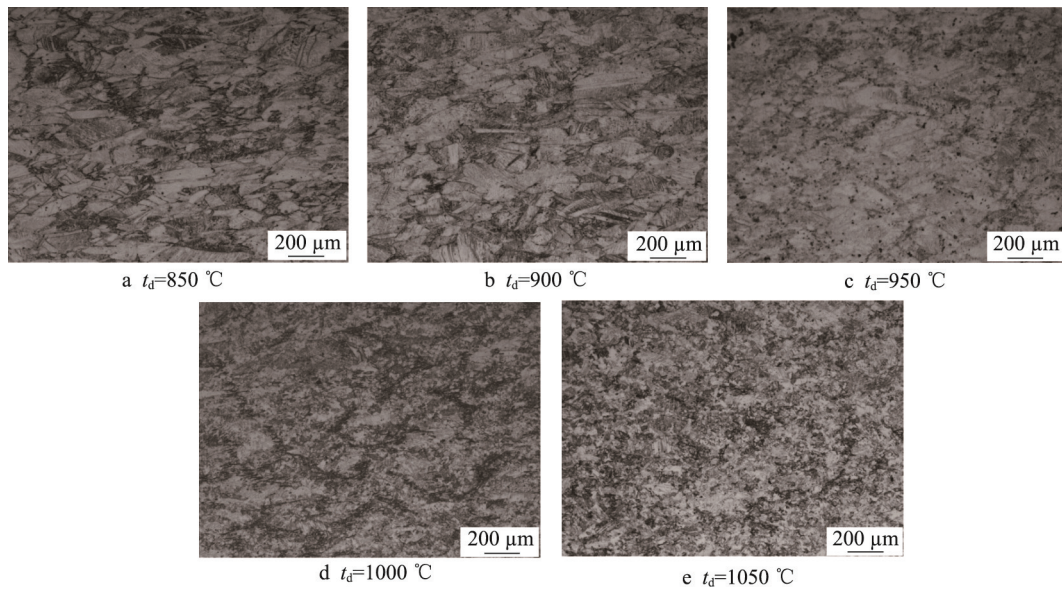


图 3 实验钢在 $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 时不同变形温度下的金相组织

Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢在不同变形温度和不同应变速率下的金相组织如图 4 所示。由实验钢在 $t_d=850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=10\text{ s}^{-1}$ 时的显微组织(图 4a)观察可知,此时未发生动态再结晶;在 $t_d=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ 时(图 4b),晶界上有少量再结晶,这与之前的流变曲线呈现的结果一致。

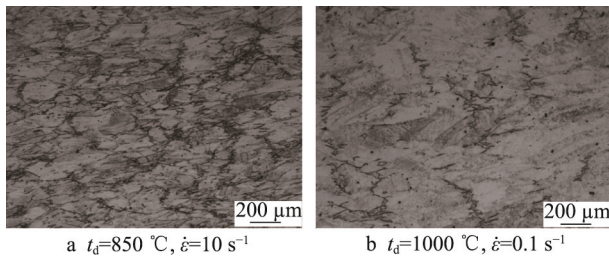


图 4 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢在不同变形温度和不同应变速率下的金相组织

2.3 热加工方程的建立

流变应力受应变速率和变形温度的影响,在高温变形时通常采用式(1)描述三者之间的关系^[8-9]:

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: A 为常数; Q 为材料热变形激活能; α 为应力因子; n 为应力指数; σ_p 为材料峰值应力; R 为气体常量,这里取 $8.31\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

对式(1)两边取对数并整理后得:

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

温度恒定时,对式(2)中 $\ln\dot{\varepsilon}$ 求偏导,得:

$$\frac{1}{n} = \left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]}{\partial \ln\dot{\varepsilon}} \right]_T \quad (3)$$

变形速率恒定时,对式(2)中 $\frac{1}{T}$ 求偏导,得:

$$Q = nR \left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\varepsilon}} = Rnb \quad (4)$$

图 5 为通过对实验数据处理获得的实验钢峰值应力 σ_p 与应变速率和温度的关系。由图 5 可知,当温度恒定时, $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 与 $\ln\dot{\varepsilon}$ 之间满足线性关系,其斜率的倒数即为 n ,可以求出实验钢的 $n=3.10$ 。

当应变速率相同时, $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 与 $1000/T$ 也呈线性关系,直线的平均斜率为 b ^[10]。图 5b 为实验钢峰值应力与变形温度的关系,可求出 $b=16$ 。将已求得的 n , b 数据带入式(4)中,可以求出 $Q=412.151\text{ kJ/mol}$ 。将求得数据带入式(1),可求出 $A=1.78\times 10^{14}$ 。

由此可得,温度为 $850\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢的热加工方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 1.78\times 10^{14} [\sinh(\alpha\sigma_p)]^{3.10} \exp\left(-\frac{412.151}{RT}\right) \quad (5)$$

2.4 动态再结晶规律的研究

通过以上求得的热变形激活能,可计算 Z 参数^[11]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = A[\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \quad (6)$$

Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢热变形峰值应力与 Z 参数的关系如图 6 所示。由图 6 可知,二者之间呈线性关系,利用最小二乘法确定线性相关性系数 $R^2=0.92$ 。

经线性回归得到峰值应力方程为:

$$\sigma_p = 83.33 \sinh^{-1} (2.53 \times 10^{-5} \times Z^{0.3226}) \quad (7)$$

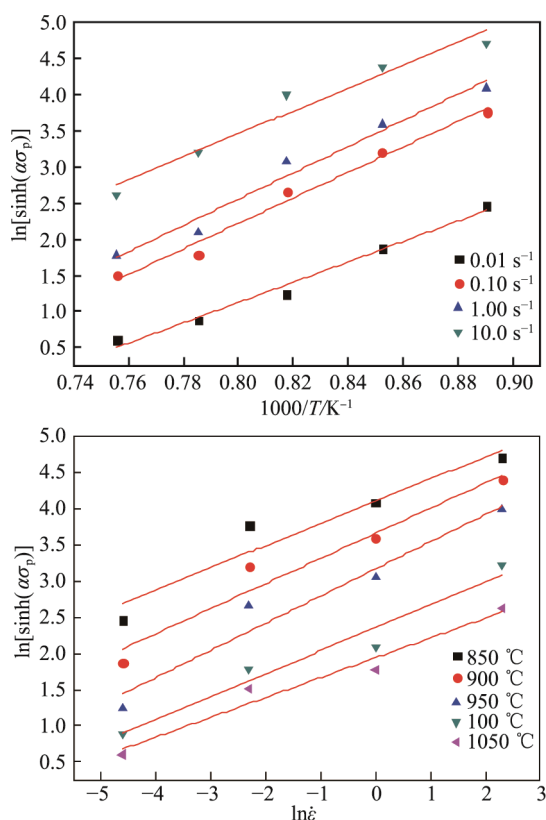


图5 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢峰值应力与变形温度和应变速率的关系

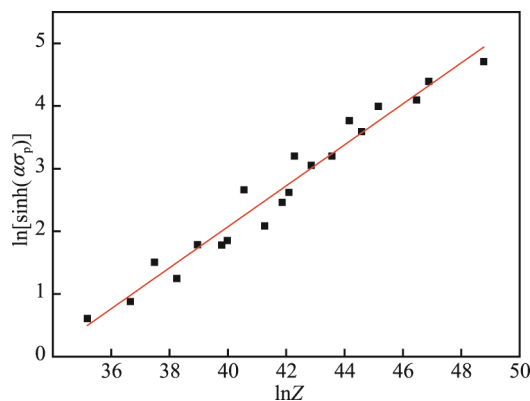


图6 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢峰值应力与 Z 参数的关系

通过实验钢在 $t_d=850\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率 $=0.01\sim 10.0\text{ s}^{-1}$ 条件下的高温显微组织分析, 可获得 $\ln Z$ 与变形组织的关系。当 $\ln Z \leq 41.26630$, 即 $Z \leq 8.351 \times 10^{17}$ 时, Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢易发生动态再结晶。因此, Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢易发生动态再结晶的条

件是在较高温度及较低应变速率时变形。

3 结论

1) 在高温状态下, 应变速率对 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢的动态再结晶行为有显著影响。

2) Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢的热变形激活能为 $Q=412.151\text{ kJ/mol}$, 热加工方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.78 \times 10^{14} [\sinh(\alpha\sigma_p)]^{3.10} \exp\left(-\frac{412151}{RT}\right)$$

3) 在进行 Fe-20Mn-4Si-2Al 高锰钢轧制的过程中, 应在高温及低应变速率下变形, 有利于降低轧机的负荷。

参考文献:

- [1] 康永林, 朱国明. 中国汽车发展趋势及汽车用钢面临的机遇与挑战[J]. 钢铁, 2014, 49(12): 1-7.
- [2] OLIVER H. Innovative Steel Products and Technologies for Automotive Lightweight Design[C]//Proceedings of 2009 International Symposium on Automobile Steel. Dalian: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [3] 王爱华. 我国汽车用钢市场及其发展趋势[J]. 轧钢, 2012, 29(6): 49-51.
- [4] DING Hao, DING Hua, QIU Chun-lin, et al. Formability of TRIP/TWIP Steel Containing Manganese of 18.8% [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(1): 36-40.
- [5] MA Li-li, WEI Ying-hui, HOU Li-feng, et al. Microstructure and Mechanical Properties of TWIP Steel Joints [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21(8): 749-756.
- [6] 米振莉, 唐获, 江海涛, 等. Fe-28Mn-3Si-3Al TWIP 钢变形的微观组织特征[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 1200-1203.
- [7] 白韶斌, 李大赵, 宋金路, 等. 孪晶诱导塑性(TWIP)钢组织性能研究现状[J]. 热加工工艺, 2016, 45(2): 9-12.
- [8] 曹金荣, 刘正东, 程世长, 等. 应变速率和变形温度对 T122 耐热钢流变应力和临界动态再结晶行为的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(1): 35-40.
- [9] 余琨, 黎文献, 王日初, 等. Mg-5.6Zn-0.7Zr-0.8Nd 合金高温塑性变形的热/力模拟研究[J]. 金属学报, 2003, 39(5): 492-498.
- [10] 张维娜. 高锰 TRIP 钢组织性能演变机理及薄带成型方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [11] 范永革, 汪凌云, 黄光胜, 等. 变形镁合金高温变形流变应力分析[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(2): 9-11.