

AISI403 马氏体不锈钢的热变形特性研究

Hot Deformation Features of AISI403
Martensitic Stainless Steel

马龙腾^{1,2}, 王立民², 胡 劲¹, 刘正东², 张秀丽³

(1 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2 钢铁研究总院 特殊钢研究所, 北京 100081;

3 东北特钢集团 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 辽宁 抚顺 113001)

MA Long-teng^{1,2}, WANG Li-min², HU Jin¹, LIU Zheng-dong², ZHANG Xiu-li³

(1 Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and

Technology, Kunming 650093, China; 2 Institute for Special Steels, Central Iron

and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 3 Technical Center of

Fushun Special Steel Co., Ltd., Dongbei Special Steel

Group Co., Ltd., Fushun 113001, Liaoning, China)

摘要: 采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机对 AISI403 马氏体不锈钢进行高温热压缩实验, 结合金相组织观察, 对其流变应力进行了研究。结果表明: 403 钢在 950~1150℃, 应变速率为 0.01~0.1s⁻¹ 的条件下, 发生了较明显的动态再结晶; 利用 Zener-Hollomon 参数的双曲对数函数能较好地描述 403 钢的流变行为; 经回归得到了 403 钢峰值应力 σ_p 的表达式和热变形激活能 Q 值; 通过热加工图的建立获得最佳热变形条件及预测流变失稳区。

关键词: AISI403 马氏体不锈钢; 动态再结晶; 热加工图

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.05.008

中图分类号: TG111.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)05-0038-06

Abstract: The hot compression experiment of AISI403 martensitic stainless steel was carried out by using Gleeble-1500D, and its flow stress was also investigated by means of microstructure analysis. The results show that the dynamic recrystallization of 403 steel occurs obviously at 950-1150℃ and strain rate from 0.01s⁻¹ to 0.1s⁻¹. The flow stress of 403 steel can be described well by a Zener-Hollomon parameter in the hyperbolic logarithm type equation. The regressed peak stress expression σ_p and the hot deformation activation energy Q of 403 steel during hot compression were concluded. Through the establishment of hot processing map, the best hot compression condition and the instability zones of flow behavior were acquired.

Key words: AISI403 martensitic stainless steel; dynamic recrystallization; hot processing map

据国际原子能机构公开的资料, 在世界第一座核反应堆运行成功至今的 60 余年里, 核能已经占世界能源总消耗量的 6% 左右^[1]。作为核反应堆堆内构件的重要部件之一, 压紧弹簧除了需要具有耐蚀、耐热性能外, 还要具有良好的力学性能来提供足够的补偿力。AISI403 钢属于高合金马氏体钢, 具有优良的综合力学性能, 是压紧弹簧制造的备选材料。目前对 AISI403 钢热加工工艺的研究还很不充分, 限制了其性能潜力的发挥。20 世纪 60 年代以来, 国内对高温变

形中的组织变化规律方面的研究方兴未艾, 如赵宪明等^[2]对弹簧钢 60Si2Mn 热变形, 程晓茹^[3]对管线钢 X65 再结晶动力学方面的研究, 以及刘宁等^[4]对 403Nb 钢的流变应力方面的研究。国外学者对高温变形方面的研究主要集中于高温合金^[5]和不锈钢^[6,7]。热加工图方面, Prasad 等^[8-10]根据大塑性变形连续介质力学、物理系统模拟和不可逆热力学理论建立了动态材料模型。本工作借助热模拟试验机 Gleeble-1500D 对 AISI403 钢在热压缩条件下的动态再结晶以

及组织特点进行了研究,并通过热加工图的绘制,拟获得钢种的最佳热加工工艺条件并预测其变形失稳区,为其热加工工艺的制订提供理论依据。

1 实验材料及设备

实验所用 403 钢采用真空感应炉冶炼,锭重 25kg,化学成分如表 1 所示。

表 1 403 钢的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of 403 steel
(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.11	0.36	0.77	0.011	0.008	12.62	0.41	Bal

冶炼后经开坯锻造轧制成 $\phi 17\text{mm}$ 棒材,加工成 $\phi 8\text{mm} \times 12\text{mm}$ 圆柱体热压缩试样。在 Gleeble-1500D 试验机上进行热模拟实验。

压缩过程中,在氩气保护下,同时在试样两端加放钼片,以减少摩擦对应力状态的影响。将试样以 $20^\circ\text{C}/\text{s}$ 加热到 1200°C ,保温 3min,使奥氏体均匀化;然后以 $10^\circ\text{C}/\text{s}$ 的冷却速率冷却到变形温度,并以一定的应变速率进行实验,试样总压缩量均为 60%。热压缩变形工艺如图 1 所示。

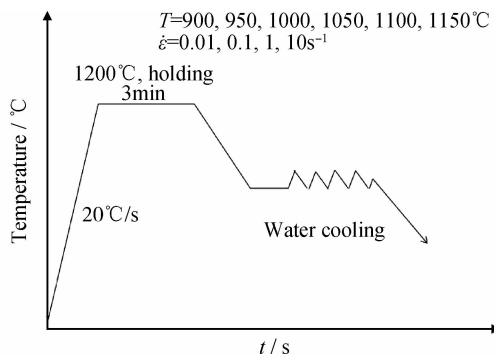


图 1 热压缩变形工艺

Fig. 1 Processes of hot compression

将实验后的试样过圆心沿轴线进行纵向切割,切割面打磨抛光后用高锰酸钾稀硫酸溶液进行化学腐蚀^[11],并用德国 Leica MEF4M 金相采集显微镜进行观察。

2 实验结果与分析

2.1 真应力-真应变曲线

热压缩真应力-真应变曲线如图 2 所示。其中 ϵ

为真应变, σ 为真应力。

在应变速率为 0.01s^{-1} 时,如图 2(a) 所示,除 900°C 之外,在其余各温度下,曲线均出现峰值,有明显的再结晶现象发生。在应变速率为 0.1s^{-1} 时,可看出除 900°C 有明显的加工硬化现象之外,在 950°C 和 1000°C 下,曲线的趋势都比较平缓,有动态回复现象发生;在更高的温度下,即 $1050 \sim 1150^\circ\text{C}$ 下,曲线出现了明显的峰值,有再结晶现象发生,如图 2(b) 所示。同理,如图 2(c) 所示,应变速率为 1s^{-1} 时,有明显加工硬化现象的温度为 $900 \sim 1050^\circ\text{C}$;有动态回复发生的温度为 1100°C ;有再结晶现象的温度为 1150°C 。应变速率为 10s^{-1} 时,基本没有曲线出现峰值,即没有动态再结晶现象的发生,如图 2(d) 所示。由以上现象可以看出:应变速率相同时,随温度升高,峰值应力和稳态流变应力都降低;应变速率相同时,随温度升高,曲线的变化趋势如下:应力随应变缓慢上升 \rightarrow 应力保持在一个基本平稳的状态 \rightarrow 曲线出现峰值;温度低,应变速率高时,曲线并无明显峰值;温度高,应变速率低,曲线出现峰值,即发生了明显的动态再结晶现象。

在变形温度为 900°C 时,如图 2(e) 所示,随着应变速率由 0.01s^{-1} 增至 10s^{-1} ,峰值应力由 141.2MPa 增至 262.82MPa 。变形温度为 1050°C ,如图 2(f) 所示,也可看到峰值应力随应变速率增加而升高的趋势。在曲线的形状方面,除在 0.01s^{-1} 下,有明显的动态回复现象发生外,其余更高的应变速率下都只有加工硬化发生。变形温度为 1050°C 时,除在 0.01s^{-1} 和 0.1s^{-1} 下,曲线出现明显的峰值外, 1s^{-1} 和 10s^{-1} 的应变速率下,只有加工硬化现象发生。由此可以看出:温度相同时,随应变速率升高,峰值应力和稳态流变应力也逐渐增加;同一温度下,较低的应变速率所在的曲线上更容易出现峰值,即出现动态再结晶。

2.2 热变形方程的推导

在热变形过程中,流变应力 σ 主要受变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的影响。而 Zener-Hollomon 参数(Z 参数)概括了变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$,一般表示为

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: Q 为热变形激活能; R 为摩尔气体常数($R = 8.314\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 为绝对温度(K); $\dot{\epsilon}$ 为应变速率^[12]。在真应力-真应变曲线中, σ 和 $\dot{\epsilon}$ 的关系可用经典的双曲函数表示^[13]:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma_p)]^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: A 为常数; σ_p 为曲线的峰值应力; α 为应力因子,与钢种的成分有关,经过计算为 0.0087256 ; n 为应力

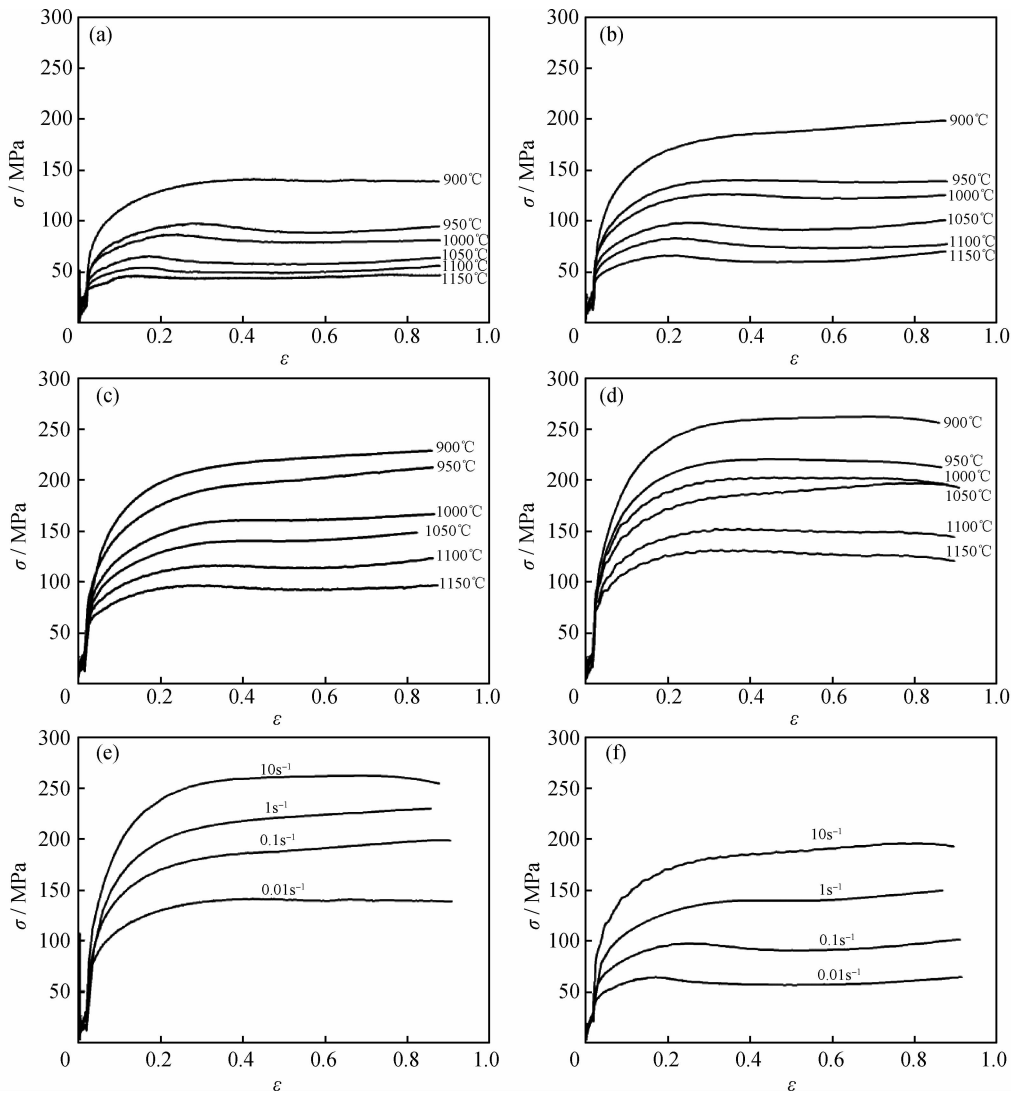


图2 AISI403 马氏体不锈钢的热变形曲线

(a) $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=0.1\text{s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon}=1\text{s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon}=10\text{s}^{-1}$; (e) 变形温度 900°C ; (f) 变形温度 1050°C

Fig. 2 Hot deformation curves of AISI403 martensitic stainless steel

(a) $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=0.1\text{s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon}=1\text{s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon}=10\text{s}^{-1}$; (e) $T=900^{\circ}\text{C}$; (f) $T=1050^{\circ}\text{C}$

指数。

对式(2)两边取对数,并分别对 $\ln\dot{\epsilon}$ 和 $1/T$ 求偏导,得

$$\frac{1}{n} = \left[\frac{\partial \ln \sinh(\alpha \sigma_p)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right] T \tag{3}$$

$$\frac{Q}{nR} = \left[\frac{\partial \ln \sinh(\alpha \sigma_p)}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right] \dot{\epsilon} \tag{4}$$

分别绘制 $\ln[\sinh(\alpha \sigma_p)]-1/T$, $\ln[\sinh(\alpha \sigma_p)]-\ln\dot{\epsilon}$ 曲线,如图 3 和图 4 所示。

根据最小二乘法^[14],进行线性回归,得到 403 钢的热变形激活能 $Q=395.165\text{kJ/mol}$, $n=5.415232$ 。代入式(1)可得

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{395165}{RT}\right) \tag{5}$$

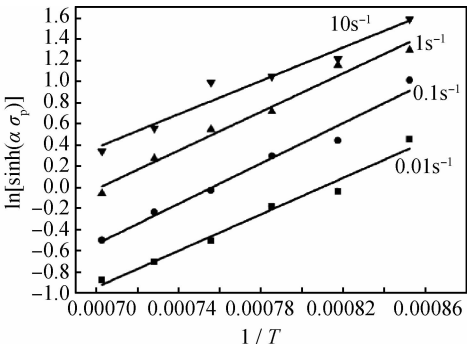


图3 AISI403 钢峰值应力与变形温度的关系

Fig. 3 Relationship curves between peak stress and deformation temperature for AISI403 steel

由式(1)和式(2)可得

$$Z = A[\sinh(\alpha \sigma_p)]^n \tag{6}$$

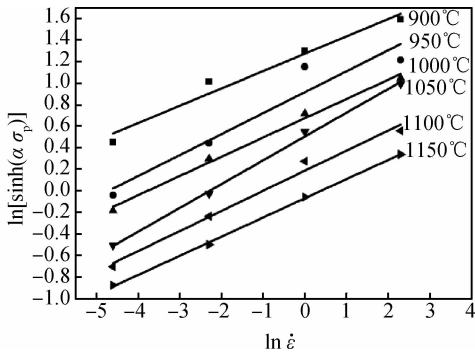


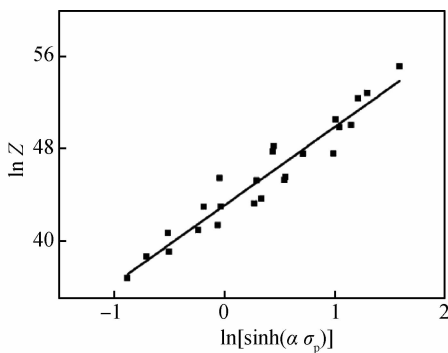
图4 AISI403 钢峰值应力与应变速率的关系

Fig. 4 Relationship curves between peak stress and strain rate for AISI403 steel

对式(6)两边取对数得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] \quad (7)$$

由式(7)可以看出, $\ln Z$ 与 $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 呈线性关系。从式(5)可以求得 Zener-Hollomon 参数, 然后作出 $\ln Z$ 和 $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 之间的关系曲线, 如图 5 所示, 可以看出, 实验值基本落在回归直线的附近, 线性相关系数为 0.92272, 表明实验数据很好地反映了式(6)所表达的意义。通过确定回归直线的截距即可确定式(6)中的常数 $A = 4.9991 \times 10^{18}$ 。

图5 $\ln Z$ 与 $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 之间的关系Fig. 5 Relationship curves between $\ln Z$ and $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$

将 A 值代入式(6)中得到 Z 参数与 σ_p 和 T 之间的关系, 即 $\dot{\epsilon}$ 和 T 与 σ_p 的关系

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{395165}{RT}\right) =$$

$$4.9991 \times 10^{18} \times \ln [\sinh(0.0087256 \sigma_p)]^{5.415232} \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon} = 4.9991 \times 10^{18} [\sinh(0.0087256 \sigma_p)]^{5.415232} \cdot$$

$$\exp\left(-\frac{395165}{RT}\right) \quad (9)$$

2.3 压缩后试样的金相组织

图 6 为不同变形条件下 AISI403 钢的典型组织。由图 6(a)可知, 在变形温度较低时, 晶粒仍然是热压缩后被拉长的状态, 结合流变曲线可知, 此时动态软化

作用较弱, 加工硬化仍然占主导地位, 发生动态再结晶较困难。这是由于变形温度较低时, 螺位错的交滑移和刃位错的攀移均较易进行, 这样就容易从结点和位错网中解脱出来而与异号位错相互抵消, 因此亚组织中的位错密度较低, 剩余的储能不足以引起动态再结晶, 软化机制以动态回复为主^[15]。从图 6(b)和图 6(c)可知, 在应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 两个变形温度下均有再结晶的发生。随着变形温度的升高或者应变速率的降低, 材料获得更大的形变储能, 而形变储能可以为晶界的迁移提供驱动力, 当这种驱动力大于由于界面曲率存在而引起的驱动力时, 会导致晶界向外弓出, 形成新晶粒的核心, 有助于再结晶发生。对比图 6(c)和图 6(d)可知, 在变形温度为 1050°C 时, 材料在两种应变速率下均发生了再结晶; 且在应变速率为 10 s^{-1} 时, 晶粒尺寸明显要小于应变速率为 0.01 s^{-1} 时的晶粒。应变速率增加, 由于变形产生的位错密度越大, 峰值应力和储存能均增加, 亚态再结晶的驱动力也增大, 可有效抑制晶粒长大现象的发生。

2.4 热加工图的建立

热加工图的建立主要基于动态材料模型, 该模型认为, 材料热变形过程中的能量消耗行为取决于材料显微组织的变化^[16]。Prasad^[8]介绍了热加工图建立的理论依据和方法。根据此模型建立的 403 马氏体不锈钢的热加工图如图 7 所示, 材料的真应变为 0.4。

图 7 中等值线为能量消耗效率 η , 它描述了材料热变形过程中因微观组织的变化而消耗的能量与总能量的比值, 其数值越高说明材料的热加工性越好。

流变失稳判据则采用式(10)。阴影区域代表流变失稳区。

$$\xi = \left\{ \frac{\partial \ln \left[\frac{m}{m+1} \right]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right\} \quad (10)$$

式中 m 表征材料热变形中的软化程度。

流变失稳区(图 7 中 D1 区)主要出现在较低温度和较高应变速率下, 流变失稳区内的能量耗散效率 η 较低, 最大值不超过 0.27; 随变形温度的升高或应变速率的降低, 能量耗散效率值总体上呈增加趋势, 且出现了两个能量耗散效率值较高的区域 D2 和 D3。其中, D2 区主要分布在温度为 $930 \sim 975^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.025 \text{ s}^{-1}$ 的区域, 该区域内的最小 η 值不低于 0.36; D3 区主要分布于 $1025 \sim 1080^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.017 \text{ s}^{-1}$ 的区域, 该区域内的最小 η 值同样不低于 0.36。

图 7 中流变失稳区(D1 区)的典型组织如图 8 所

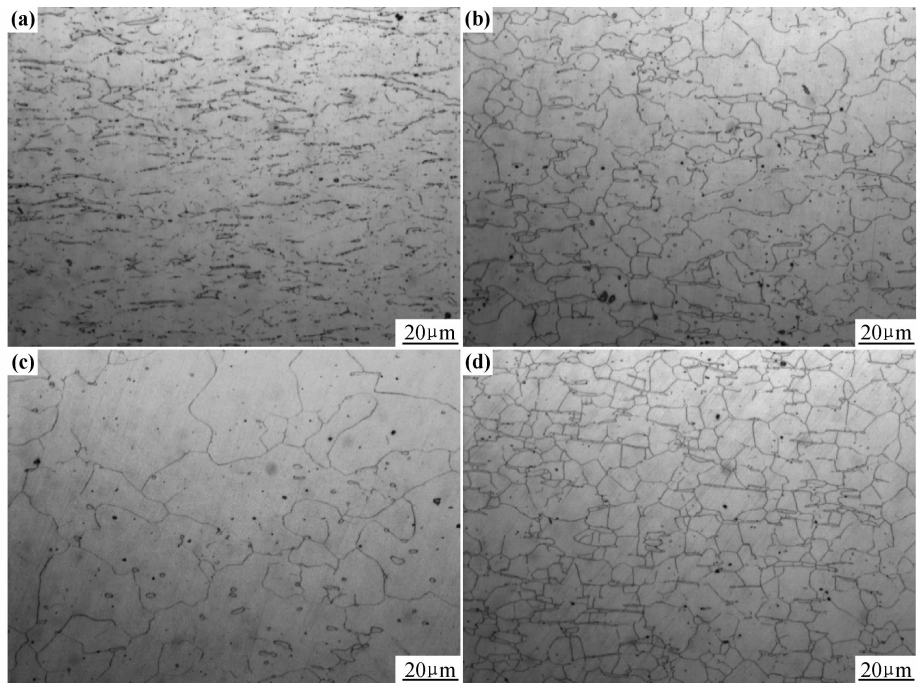


图 6 不同变形条件下 AISI403 钢的典型组织

(a) 变形温度 900℃, 应变速率 0.1s⁻¹; (b) 变形温度 950℃, 应变速率 0.01s⁻¹;
(c) 变形温度 1050℃, 应变速率 0.01s⁻¹; (d) 变形温度 1050℃, 应变速率 10s⁻¹

Fig. 6 Typical microstructure of AISI403 steel under different deformation conditions

(a) $T=900^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.1\text{s}^{-1}$; (b) $T=950^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$; (c) $T=1050^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$; (d) $T=1050^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=10\text{s}^{-1}$

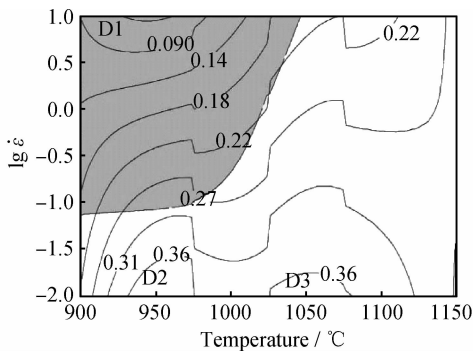


图 7 AISI403 钢的热加工图($\epsilon=0.4$)

Fig. 7 Hot processing map for AISI403 steel ($\epsilon=0.4$)

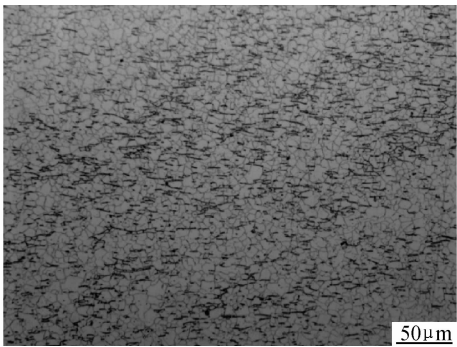


图 8 流变失稳区典型组织(950℃, 10s⁻¹)

Fig. 8 Typical microstructure of instability zones (950℃, 10s⁻¹)

示。在变形温度为 950℃, 应变速率为 10s⁻¹ 下, 能量耗散效率较低, 为 0.078 左右。从图 8 中可知, 材料已经开始发生动态再结晶, 在再结晶完成的晶粒晶界处, 有不少小的晶粒存在, 晶粒尺寸十分不均匀, 混晶严重, 因而, 此变形条件下并不适合热加工。D2 区为再结晶区, 典型组织如图 6(b) (950℃, 0.01s⁻¹) 所示。可以看出, 其组织为均匀细小的等轴晶粒, 这是典型的动态再结晶组织, 具有良好的综合力学性能。D3 区同样为再结晶完成的区域, 晶粒尺寸稍大于 D2 区。由此可见, 在图 7 中的 D2 区和 D3 区都是热加工的安全区域, 且 D2 区更适宜热加工。

3 结论

(1) AISI403 不锈钢在 950~1150℃, 应变速率在 0.01~0.1s⁻¹ 的条件下, 发生了较明显的动态再结晶; 当应变速率为 1s⁻¹ 和 10s⁻¹ 时, 主要发生了动态回复。

(2) 403 钢热压缩变形条件下的 Z 参数表达式和热变形方程分别为 $Z = 4.9991 \times 10^{18} \ln [\sinh (0.0087256\sigma_p)]^{5.415232}$ 与 $\dot{\epsilon} = 4.9991 \times 10^{18} [\sinh (0.0087256\sigma_p)]^{5.415232} \cdot \exp(-\frac{395165}{RT})$; 403 钢的热变形激活能 $Q=395.165\text{kJ/mol}$ 。

(3)真应变为 0.4 时,有两个区域能量消耗效率达到最高值:变形温度 930~975℃,应变速率 0.01~0.025s⁻¹;变形温度 1025~1080℃,应变速率 0.01~0.017s⁻¹。此时能量消耗效率为 0.36 左右,进行热加工可获得大小均匀的再结晶组织。

参考文献

- [1] 李宏明,马巧红. 核电及核电用钢的发展[J]. 世界钢铁, 2007, (2):70-72.
LI Hong-ming, MA Qiao-hong. The development of nuclear power and the nuclear power steel [J]. World Iron & Steels, 2007, (2): 70-72.
- [2] 赵宪明,吴迪,陈学军. 60Si2Mn 钢动态再结晶数学模型的实验研究[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(5):32-34.
ZHAO Xian-ming, WU Di, CHEN Xue-jun. Experimental research on mathematical model of dynamic recrystallization for 60Si2Mn Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15 (5): 32-34.
- [3] 程晓茹,李虎兴. 管线钢 X65 高温变形动态再结晶研究[J]. 金属学报, 1997, 33(12):1275-1281.
CHENG Xiao-ru, LI Hu-xing. Dynamic recrystallization of steel X65 during high temperature deformation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(12):1275-1281.
- [4] 刘宁,王立民,陈礼清,等. 403Nb 钢高温热压缩变形条件下的流变应力研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3):114-118.
LIU Ning, WANG Li-min, CHEN Li-qing, et al. Investigation on flow stress of 403Nb steel during hot compression [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 114-118.
- [5] SALEHI A R, TAHERI A K. Flow behavior and microstructural evolution of 53Fe-26Ni-15Cr superalloy during hot compression test[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2007, 34(2):151-156.
- [6] STEWARD G R, ELWAZRI A M, YUE S, et al. Modeling of dynamic recrystallization kinetics in austenitic stainless and hyper-eutectoid steels[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22 (5):519-524.
- [7] DEHGHAN-MANSHADI A, BARNETT M R, HODGSON P

(上接第 37 页)
- [11] MIYAMOTO H, HARADA K, MIMAKI T. Corrosion of ultra-fine grained copper fabricated by equal-channel angular pressing [J]. Corrosion Science, 2008, 50(5): 1215-1220.
- [12] ROFAGHA R, LANGER R, EL-SHERIK A M, et al. The corrosion behavior of nanocrystalline nickel[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25 (12): 2867-2872.
- [13] KIM S H, ERB U, AUST K T, et al. The corrosion behavior of nanocrystalline electrodeposits[J]. Plat Surf Finish, 2004, 91 (4): 68-70.
- [14] KIM S H, FRANKEN T, HIBBARD G D, et al. Effect of pH on the corrosion behavior of nanocrystalline cobalt[J]. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, 2003, 15-16:643-648.
- [15] PALUMBO G, THORPE S J, AUST K T. On the contribution of triple junctions to the structure and properties of nanocrystal-

- D. Microstructural evolution during hot deformation of duplex stainless steel[J]. Materials Science and Technology, 2007, 23 (12):1478-1484.
- [8] PRASAD Y V R K, GEGEL H L, DORAIVELU S M. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1984, 15 (10): 1883-1892.
- [9] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps for hot deformation of rolled AZ31 magnesium alloy plate: anisotropy of hot workability[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487 (1):316-327.
- [10] SRINIVASAN N, PRASAD Y V R K. Microstructural control in hot working of IN-718 superalloy using processing map[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25(10):2275-2284.
- [11] 韩德伟,张建新. 金相试样制备与显示技术[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005. 156-158.
- [12] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of strain rate upon the plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-32.
- [13] SELLARS C M, TEGART W J M. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9):1136-1138.
- [14] 中国科学院数学研究所统计组. 常用数理统计方法[M]. 北京:科学出版社, 1974. 92-100.
- [15] 胡庚祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础[M]. 2 版. 上海:上海交通大学出版社, 2000. 210-213.
- [16] SRINIVASAN N, PRASAD Y V R K. Hot working characteristics of nimonic75, 80A and 90 superalloys: a comparison using processing maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51(1):171-192.

基金项目:大型先进压水堆科技重大专项(2011ZX06004-016)

收稿日期:2012-05-04;修订日期:2012-11-26

作者简介:马龙腾(1988—),男,硕士研究生,研究方向为耐热钢和高温合金,联系地址:北京市海淀区学院南路 76 号钢铁研究总院特殊钢研究所(100081),E-mail:m_l_t_@msn.com

line materials[J]. Scripta Metall Mater, 1990, 24(7): 1347-1350.

[16] WANG N, PALUMBO G, WANG Z, et al. On the persistence of four-fold triple line nodes in nanostructured materials[J]. Scripta Metall Mater, 1993, 28(2): 253-256.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51104113);中国博士后科学基金资助(212M511981);陕西省自然科学基金青年人才项目(2011JQ6016)

收稿日期:2012-01-10;修订日期:2012-04-16

作者简介:王庆娟(1973—),女,博士,副教授,主要从事超细晶材料的制备及组织性能研究,联系地址:陕西省西安市碑林区雁塔路 13 号西安建筑科技大学冶金工程学院(710055),E-mail:jiandawqj@yahoo.com.cn