

文章编号:1673-9981(2012)01-0021-05

高、低铌 X80 钢动态再结晶的分析与对比

韩 晨¹, 孙付涛¹, 周新远²

1. 中色科技股份有限公司, 河南 洛阳 471039;
2. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072

摘要:利用热-力模拟试验机对高铌和低铌 X80 管线钢的动态再结晶行为进行了研究, 结果表明: 与低铌 X80 管线钢相比, 高铌 X80 管线钢需在较高的变形温度和较低的应变速率下才能发生动态再结晶. 高铌和低铌 X80 钢的动态再结晶激活能分别为 342.95, 306.02 kJ/mol, 动态再结晶模型分别为 $z = 4.091\sigma_p^{5.992}$, $z = 0.662\sigma_p^{5.643}$. 高铌抑制了奥氏体的动态再结晶, 延迟了应力-应变曲线向动态再结晶型转变, 进而提高了奥氏体的再结晶终止温度.

关键词:高温轧制工艺; X80 管线钢; 动态再结晶; 激活能
中图分类号: TG111.7 **文献标识码:** A

X80 管线钢在热轧变形过程中, 随着变形量增加, 金属内部畸变能不断升高. 当畸变能达到一定程度时, 在变形后的基体中形成新的结晶核心, 随新核心的边界向外移动, 晶粒不断长大. 这一发生在变形过程中的再结晶行为即为动态再结晶^[1]. 形变奥氏体的动态再结晶行为是决定钢的变形抗力、微观组织、力学性能的重要因素之一, 研究 X80 管线钢形变奥氏体动态再结晶行为是正确制定其轧制工艺的基础.

X80 管线钢板带轧制生产工艺有两种. 一种是 HTP(高温轧制)工艺, 主要用来生产低碳高铌成分的 X80 钢; 另一种是 TMCP(热机械轧制)工艺, 主要用来生产低铌并含钼成分的 X80 钢. 采用 HTP 高温轧制工艺生产的 X80 钢的显著特征是铌含量较高(0.09%~0.11%).

在本研究中, 利用热-力模拟试验机分别对高、低铌 X80 管线钢进行了单道次高温压缩实验, 分析了其在高温变形时的动态再结晶行为, 并建立了动态再结晶模型.

1 实验部分

实验材料为某企业生产的高铌和低铌 X80 管线钢连铸坯. 与用 TMCP 工艺生产的低铌 X80 管线钢相比, 用 HTP 工艺生产的高铌 X80 管线钢中铌含量提高了约一倍, 而钼含量却大大降低. 两种 X80 管线钢的主要化学成分见表 1.

实验方法:将 $\Phi 10\text{mm} \times 15\text{mm}$ 圆柱形试样以 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 速率加热至 $1220\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 3 min, 然后以 $5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 速率分别冷却至变形温度 850, 950, 1050, 1100,

表 1 实验用钢化学成分
Table 1 Chemical constitution of test steel plate

材料	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ceq	Pcm	其他
高铌 X80	0.035	0.27	1.70	0.009	0.003	0.098	0.40	0.18	适量 Ti, Ni,
低铌 X80	0.05	0.22	1.72	0.005	0.002	0.041	0.39	0.17	Mo, Cu, Cr

收稿日期: 2011-08-15

作者简介: 韩晨(1982-), 男, 河南正阳人, 工程师, 硕士.

1150 °C,保温1 min,再分别以不同的应变速率0.1, 1, 3, 10 s⁻¹变形,压缩率为60%(9 mm). 试样变形后立即淬火以保留高温奥氏体组织. 实验过程中,高、低铌X80管线钢的变量参数完全一致.

2 实验结果与分析

2.1 应变速率对应力-应变曲线的影响

为了分析高铌X80管线钢动态再结晶和应变速率的关系,在变形温度为1150 °C时进行实验,所测得的不同应变速率下的真应力-真应变曲线如图1所示.

由图1可知,当应变速率为3 s⁻¹和10 s⁻¹时,应力-应变曲线没有出现峰值,且随着应变量的增加,变形抗力逐渐增大. 在这两种应变速率下,高铌钢奥氏体只发生加工硬化和动态软化,没有出现动态再结晶. 当应变速率为1 s⁻¹时,变形抗力到达峰值后基本保持稳定,此时动态软化和加工硬化程度基本相当. 当应变速率降低到0.1 s⁻¹时,变形抗力出现了峰值,并随着应变量的增加而下降,这表明在该应变速率下钢的动态软化超过了加工硬化,发生了明显的动态再结晶. 这说明随着应变速率的降低,应力-应变曲线由加工硬化型向部分动态再结晶型和完全动态再结晶型转变.

由图1还可看出,在变形温度相同的条件下,当变形量相同时,变形抗力随着轧制时应变速率的降低而减小. 因为在较低的应变速率下,C原子及代位

原子Mn有充分的时间扩散,再加上奥氏体的动态回复等因素,使形变引起的畸变能降低,这类似于升高变形温度的效应^[2],从而降低了轧制时的变形抗力.

由此可知,高铌X80钢在较低的应变速率下发生动态再结晶,并且随应变速率的增加,发生动态再结晶的临界应变值也随之增加. 当应变速率足够大时,奥氏体只发生加工硬化和动态回复过程,而不发生动态再结晶.

2.2 变形温度对应力-应变曲线的影响

在应变速率为0.1 s⁻¹时,变形温度对高铌X80管线钢应力-应变曲线的影响,如图2所示. 由图2可看出,在变形温度为850, 950 °C时,奥氏体只发生加工硬化和动态回复过程,而没有发生动态再结晶. 当变形温度为1050, 1100, 1150 °C时,应变-应力曲线上出现了应力峰值和应力平稳阶段,表明发生了动态再结晶.

图2表明,变形温度对变形抗力的影响比较明显. 随着变形温度升高,变形抗力降低. 在所实验的变形温度下,形变开始后,随着应变量的增加,变形抗力快速增加;当应变达到一定程度时,变形抗力达到峰值;随变形温度的进一步升高,峰值应力降低,同时峰值应力对应的应变也逐渐减小. 随着变形温度的降低,应力峰值向着应变增大的方向移动. 这体现了变形温度对发生动态再结晶时临界变形量的影响,即变形温度越低,发生动态再结晶的临界变形量越大.

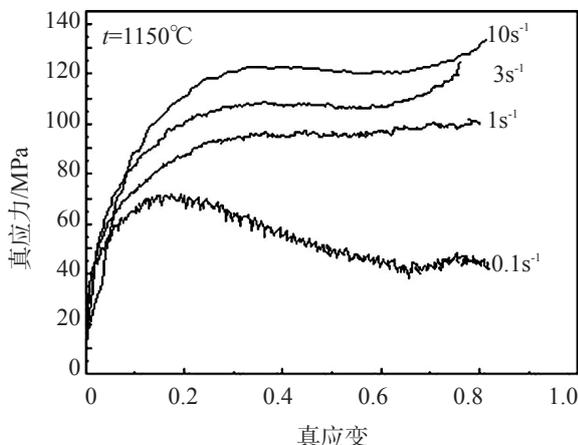


图1 1150 °C时高铌钢在不同应变速率下的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of high-Nb steel at 1150°C under different strain rates

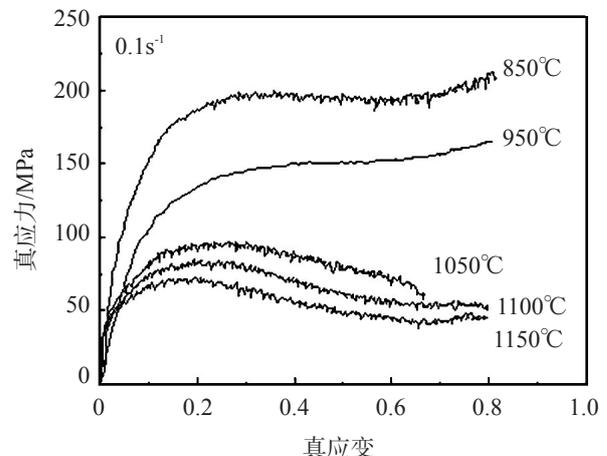


图2 0.1s⁻¹时不同温度下高铌钢的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of high-Nb steel under different temperatures at 0.1s⁻¹

由此可知,高铌X80钢动态再结晶发生于较高的变形温度下,并且随变形温度的降低,发生动态再结晶的临界应变值增加.当变形温度较低时,奥氏体只发生加工硬化和动态回复过程,而不发生动态再结晶.

2.3 铌含量对应力-应变曲线的影响

采用HTP工艺生产的高铌X80钢能在更高的温度范围内进行轧制,主要得益于铌对奥氏体再结晶的抑制作用.铌含量提高,固溶于奥氏体中的铌和奥氏体中应变诱导析出的铌的第二相粒子就会增多,铌原子的拖曳作用和第二相粒子钉扎奥氏体晶界的作用进一步增强,从而使奥氏体未再结晶区能扩大到更高的温度范围内.而在再结晶终止温度以下进行变形都会增加奥氏体晶粒的拉长程度,这

也正是高温轧制工艺的精髓所在^[3-4].

因为在较高的应变速率和较低的变形温度范围内所研究的X80钢不会发生动态再结晶.为了分析铌含量对X80钢应力-应变曲线的影响,对应变速率为 0.1 s^{-1} 时变形温度为 $950, 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和应变速率为 1.0 s^{-1} 时变形温度为 $1050, 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下高、低铌X80管线钢的应力-应变曲线进行对比,如图3、图4所示.

从图3可看出,当应变速率为 0.1 s^{-1} 、变形温度为 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,低铌钢发生了动态再结晶,而高铌钢仍是加工硬化和动态软化,没有发生动态再结晶.当温度提高到 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高铌及低铌X80钢都发生了动态再结晶,且高铌钢的峰值应力高于低铌钢.

从图4可看出,当应变速率为 1.0 s^{-1} 、变形温度

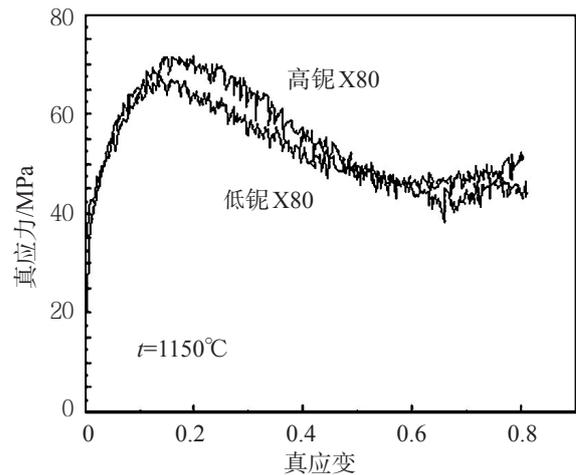
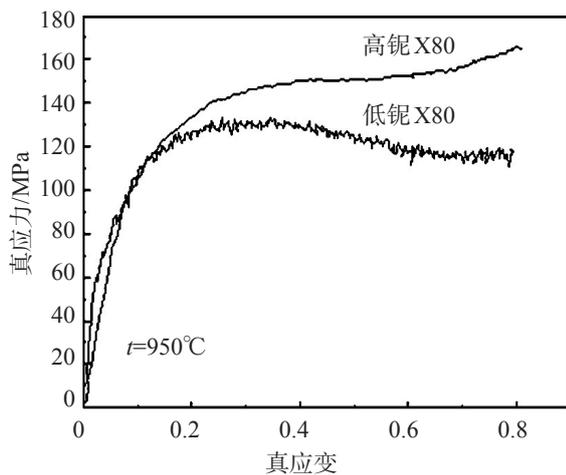


图3 应变速率 0.1 s^{-1} 时不同温度下高、低铌钢的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of high & low-Nb steel under different temperatures at 0.1 s^{-1}

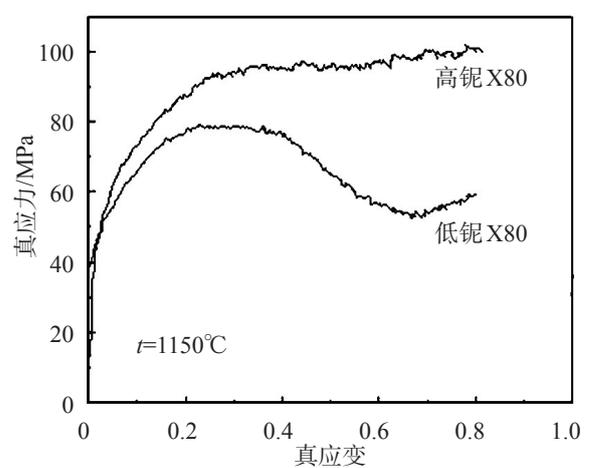
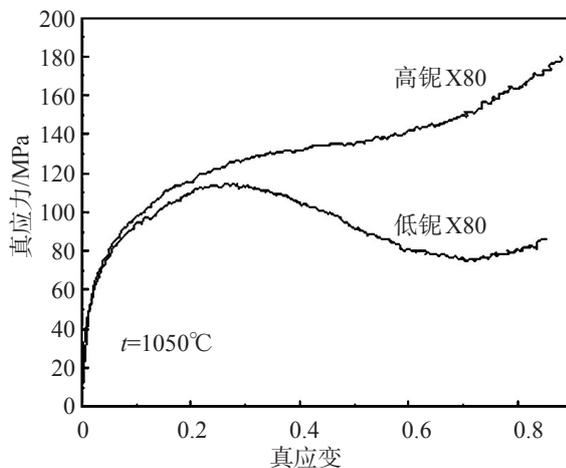


图4 应变速率 1.0 s^{-1} 时不同温度下高、低铌钢的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of high & low-Nb steel under different temperatures at 1.0 s^{-1}

为 1050 °C 时,低铌钢发生了显著的动态再结晶,而高铌钢仍以加工硬化为主,变性抗力随应变的增加而增大.当温度提高到 1150 °C 时,高铌钢仍未发生动态再结晶,但此温度下其动态软化和加工硬化程度基本相同,变形抗力随应变提高而增大的趋势不明显.

实验结果表明,即使在较低的应变速率 0.1 s^{-1} 下,高铌钢发生动态再结晶的变形温度也要在 1050 °C 以上.所以,铌含量的提高,使奥氏体发生动态再结晶的能力受到一定抑制.动态再结晶临界值的提高,必然使得高铌钢在相同条件下的动态软化能力降低,从而在相同的应变时表现出较大的变形抗力.当发生动态再结晶时,铌含量的增加使峰值应力右移,相应应变增大,其主要原因是铌原子的拖曳及铌的碳氮化物钉扎奥氏体晶界的双重作用.为了降低高铌钢较大的变性抗力以减小轧机载荷,并保证两阶段轧制在奥氏体再结晶区及未再结晶区严格进行,必然要求轧制温度进一步提高,而铌对奥氏体再结晶的有效抑制及延迟,能够使控轧在更高的温度区间进行.

高的铌含量增加了钢的变形抗力,并延缓了应力-应变曲线向动态再结晶型的过渡和转变.变形温度越低、应变速率越高,这种趋势也越明显.在发生动态再结晶时,较高的铌含量增大了钢的峰值应力.如在变形温度为 1150 °C、应变速率为 0.1 s^{-1} 时,低铌钢的峰值应力为 66.0 MPa,而高铌钢的峰值应力为 71.5 MPa.

3 动态再结晶模型

以上实验结果表明,是否发生动态再结晶与变形温度和应变速率有关.所研究的 X80 管线钢在热变形过程中发生的动态再结晶行为是受峰值应力、变形温度 T 和应变速率为变量的热激活过程所支配的.

为综合考虑变形温度与应变速率对钢的动态再结晶的影响,引入参数 Z . Z 参数与峰值应力、发生动态再结晶的临界变形量、动态再结晶的体积分、动态再结晶晶粒直径以及应力-应变曲线形状等因素是密切相关的.对于高、低铌 X80 管线钢,采用公式(1)和(2)所示的动态再结晶数学模型进行研究.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q_{\text{def}}/RT), \quad (1)$$

$$Z = A \exp(B\sigma_p), \quad (2)$$

式(1)中 $\dot{\epsilon}$ —应变速率, s^{-1} ; Q_{def} —动态再结晶激活能, kJ/mol ; R —气体常数, $8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$; T —变形绝对温度, K ; A, B —材料自身常数; Z —参数,有温度补偿的应变速率因子; σ_p —峰值应力, MPa .

将公式(1)和(2)两端取对数,合并整理后得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln \sigma_p - Q_{\text{def}}/RT + \ln A, \quad (3)$$

利用 SPSS 软件,对在较高变形温度和较低应变速率下发生动态再结晶的高、低铌 X80 钢的数据进行回归,将回归所得到的参数(表 2)代入公式(3)

表 2 高、低铌 X80 钢相关常数的计算结果

Table 2 Calculation results of correlation constants of high & low-Nb X80 steel

钢种	n	A	回归相关系数	激活能 $Q_{\text{def}}/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
高铌 X80 钢	5.992	4.091	0.991	342.95
低铌 X80 钢	5.643	0.662	0.996	306.02

中,得到高铌及低铌 X80 钢的动态再结晶激活能分别为 342.95, 306.02 kJ/mol .

由表 2 可看出,当钢中铌含量提高时,动态再结晶激活能明显升高,高铌钢的激活能比低铌钢高 36.93 kJ/mol .所以,含铌量高能推迟动态再结晶的发生.

高、低铌 X80 钢的动态再结晶数学模型表达式如(4)和(5)式:

$$\text{高铌 X80 管线钢: } Z = 4.091 \sigma_p^{5.992}, \quad (4)$$

$$\text{低铌 X80 管线钢: } Z = 0.662 \sigma_p^{5.643}, \quad (5)$$

从公式(1)和(2)X80 管线钢动态再结晶模型可知,随着变形温度 T 升高和应变速率减小,参数 Z 变小,其动态再结晶的临界应变也必然减小,因此容易发生动态再结晶.同时,由公式(4)、(5)可知,在相同的变形温度和应变速率下,高铌钢的 Z 值高于低铌钢,这说明在一定的条件下高铌 X80 管线钢

的动态再结晶是难以发生的. 所以,加入一定量的铌可有效抑制X80管线钢的动态再结晶行为.

4 结 论

与低铌X80钢相比,高铌X80钢需在较高的变形温度和较低的应变速率下才会发生动态再结晶. 当真应变为0.8时,低铌钢在 $\dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$, $t=950\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$, $t=1050\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下均发生动态再结晶,而高铌钢只在 $\dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$, $t=1050\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下才发生动态再结晶. 铌含量的增加能有效抑制奥氏体的动态再结晶,延迟钢的应力-应变曲线向动态再结晶型转变,并使变形抗力和峰值应力提高,相应变形量也随之增大. 通过回归计算,得出了高、低铌X80管线钢的动态再结晶激活能分别为

342.95, 306.02 kJ/mol, 动态再结晶的方程式分别为.
 $Z=4.091\sigma_p^{5.992}$, $Z=0.662\sigma_p^{5.643}$

参考文献:

- [1] SUBRAMANIAN S V, KLINKENBERG C. Ultra-fine grain size by dynamic recrystallization in strip rolling of Nb microalloyed steel[J]. Materials Science Forum, 2005, 8(475): 141-148.
- [2] 毛卫民. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994.
- [3] DEARDO A J. Fundamental metallurgy of niobium in steel: niobium science & technology[M]. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2003.
- [4] 常大勇, 刘雅政, 何建中, 等. 含Nb管线钢动态再结晶特性的室验研究[J]. 轧钢, 2005, 22(2): 12-15,

Analysis and comparison on dynamic recrystallization of high-Nb and low-Nb X80 pipeline steel

HAN Chen¹, SUN Futao¹, ZHOU Xinyuan²

1. China Nonferrous Metals Processing Technology Co., Ltd, Luoyang, 471039, China; 2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing, 100072, China

Abstract: Dynamic recrystallization behavior of high-Nb and low-Nb X80 pipeline steel was studied by thermal-mechanical simulation tester. Some conclusions were obtained: the high-Nb steel had the behavior of dynamic recrystallization at a higher temperature and a lower strain rate compared with the low-Nb steel; the dynamic recrystallization activation energy of the high-Nb and low-Nb pipeline steel were 342.95kJ/mol and 306.02kJ/mol respectively, and the models of dynamic recrystallization were $Z=4.091\sigma_p^{5.992}$, $Z=0.662\sigma_p^{5.643}$; the high-Nb content could restrain the dynamic recrystallization of austenite and delay the transformation of stress-strain curve towards dynamic recrystallization, thereby increasing the recrystallization termination temperature.

Key words: high temperature processing; X80 pipeline steel; dynamic recrystallization; activation energy