

## X52 管线钢热变形行为的研究

张 龙 张春玲 史东日 蔡大勇 廖 波

(燕山大学亚稳材料制备科学与技术国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

**摘 要** 用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 X52(L360) 管线钢(%: 0.08C, 0.20Si, 0.93Mn, 0.024Als, 0.02Nb, 0.02Ti) 在 950~1 200 ℃、应变速率 0.01~10 s<sup>-1</sup> 时进行 50% 热压缩变形试验, 得出真应力-应变曲线。通过回归分析, 确定 X52 钢热变形激活能和热变形方程, 得出应变速率、温度和 Z 参数对热变形峰值应力的影响。结果表明, 变形温度降低, 峰值应力增加并向应变增大方向移动, 随变形速率增加, 峰值应力增大并且也向应变增大方向移动; X52 钢热变形激活能为 232 kJ/mol; 随 Z 参数增加, 热变形峰值应力增加。

**关键词** X52 管线钢 热变形行为 激活能 Z 参数

## A Study on Hot Deformation Behavior of Pipeline Steel X52

Zhang Long, Zhang Chunling, Shi Dongri, Cai Dayong and Liao Bo

(State Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

**Abstract** The 50% hot deformation test on pipeline steel X52(L360) (%: 0.08C, 0.20Si, 0.93Mn, 0.024Als, 0.02Nb, 0.02Ti) with strain rate 0.01~10 s<sup>-1</sup> at 950~1 200 ℃ was carried out by Gleeble-3500 thermal simulator to get true stress-strain curves. Based on regression analysis, the activation energy and equation of hot deformation of steel X52 is defined and the effects of strain rate, temperature and Z parameter on peak stress of hot deformation are obtained. Results show that with decreasing the deformation temperature, the peak stress increases and moves in the direction of strain increment, and with increasing the strain rate, the peak stress increases and also moves in the direction of strain increment; the activation energy of hot deformation of steel X52 is 232 kJ/mol; and with increasing Z parameter, the peak stress of hot deformation increases.

**Material Index** Pipeline Steel X52, Hot Deformation Behavior, Activation Energy, Z Parameter

管线钢为西气东输、中俄石油管道等各种国内重大工程项目的材料, 而管线钢的使用环境往往极其复杂和苛刻, 因此增强管线钢的品质是一种环保节能的手段。通过改善工艺来提高管线钢的品质, 既经济实用又切实可行。晶粒超细化是一种十分有效的强化热处理方法, 而且是管线钢最主要的强化机制, 已在实际生产中得到应用。而通过高温热变形细化晶粒, 对提高强韧性尤其韧性是非常有效的, 即在奥氏体再结晶温度区域进行高温热变形后得到尽可能细小的奥氏体再结晶晶粒, 由组织遗传性可知细化后再相变得到的组织(如铁素体或马氏体组织)必然也是细小的, 从而提高了钢材的强韧性。近年来人们已作了大量的工作<sup>[1~5]</sup>, 研究管线钢的热变形行为及其晶粒细化与形变参数的关系, 并取得了许多卓有成效的结果。

### 1 试验材料及方法

本试验采用河北钢铁集团唐山钢铁股份公司

表 1 X52 管线钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of pipeline steel X52 / %

C	Mn	S	P	Si	Als	Nb	Ti
0.08	0.93	0.004	0.013	0.20	0.024	0.022	0.015

1700 热轧薄板生产线生产的 X52(L360) 管线钢的铸坯。把该生产线连铸机生产的 X52 管线钢的铸造钢坯加工成 Φ10 mm × 15 mm 的圆柱型试样, 化学成分如表 1 所示。

把试样以 10 ℃/s 的速度加热至 1 200 ℃, 保温 5 min, 得到均匀化奥氏体组织。再以 5 ℃/s 的速度冷却至变形温度(1 200、1 150、1 100、1 050、1 000、950 ℃), 保温 30 s 后, 分别采用 0.01、0.1、1、10 s<sup>-1</sup> 的变形速率, 在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行变形量为 50% 的热压缩变形试验, 记录应力-应变数据, 变形后对所有试样立即水淬。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 应力-应变曲线分析

图1为X52管线钢在不同变形温度和不同变形速率下的应力-应变曲线,可见变形温度和变形速率对变形抗力、加工硬化和动态软化都有明显的影响。

如图1所示,变形速率为 $0.1\text{ s}^{-1}$ 时,X52管线钢在各个温度均发生了不同程度动态再结晶;而在变形速率为 $10\text{ s}^{-1}$ 时,只在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时发生了动态再结晶。可见在相同变形温度下,当应变

量一定时,变形速率越高,所对应的应力值越大。同时,随着应变速率的增加,峰值应力也向应变增大的方向移动。说明随应变速率的增大,动态再结晶不易发生。这是由于应变速率越大,再结晶驱动力也越大,同时加工硬化作用也随着应变速率的增大而增大。因此,再结晶软化与加工硬化两者的作用效果相互平衡时的峰值应力及峰值应变均增大。

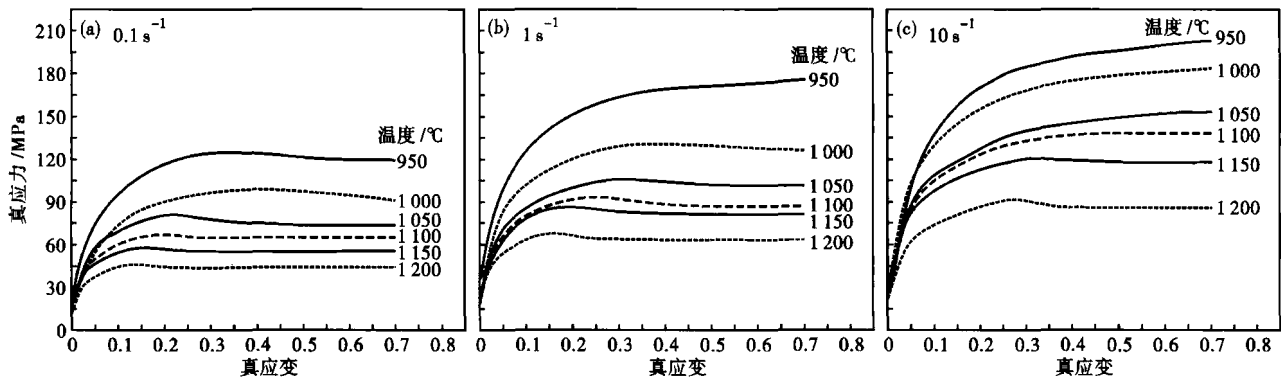


图1 X52 管线钢真应力-应变曲线  
Fig. 1 True Stress-strain curves of pipeline steel X52

X52 管线钢在变形温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,均发生了明显的动态再结晶;而 $1100$ 、 $1050$ 、 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,只在变形速率较低的情况下发生了动态再结晶;同时可以看到在变形速率和应变值相同的情况下,变形温度越高,所对应的应力值越低,并且随着变形温度的降低,峰值应力不断增加同时向应变增大的方向移动。原因为在温度较低时,加工硬化率较高,回复软化较难进行。随着变形温度的升高,空位原子扩散和位错进行交滑移、攀移的驱动力增大,从而就更易于发生动态软化,即动态再结晶;当变形温度降低时,峰值应力向应变增大的方向移动,这表明了变形温度对发生动态再结晶的临界变形量的影响趋势。即温度越低,动态再结晶越难发生;而温度越高,动态再结晶越容易发生。

2.2 热变形激活能及热力学方程

金属材料的高温流变应力既与成分有关,又与变形温度 $T$ 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及应变 $\epsilon$ 有关。在材料的成分不变时,流变应力 $\sigma$ 与变形条件之间的关系如下<sup>[1,2]</sup>:

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

式中: $\sigma$ - 峰值应力( $\sigma_p$ )或稳态

流变应力( $\sigma_s$ ),或相应于某特定应变量的流变应力; $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$ - 与变形温度无关的常数; $Q$ - 热变形激活能; $R$ - 气体常数; $T$ - 绝对温度。

从图1中分别找出X52管线钢不同应变速率和变形温度下的峰值应力,绘制出 $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$ 关系曲线,如图2(a,b)所示。

可见 $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$ 都近似成直线关系,分别是以 $\sigma$ 和 $\ln\sigma$ 为因变量、以 $\ln\dot{\epsilon}$ 为自变量的直线方程,其直线斜率的倒数分别为 $n'$ 和 $\beta$ 的值。经拟合计算, $n' = 6.304$ , $\beta = 0.0879$ ,由式 $\beta = \alpha n'$ 可以求得 $\alpha = 0.0139$ 。对式(1)两端求对数得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n} \ln\dot{\epsilon} - \frac{1}{n} \ln A + \frac{Q}{nRT} \quad (2)$$

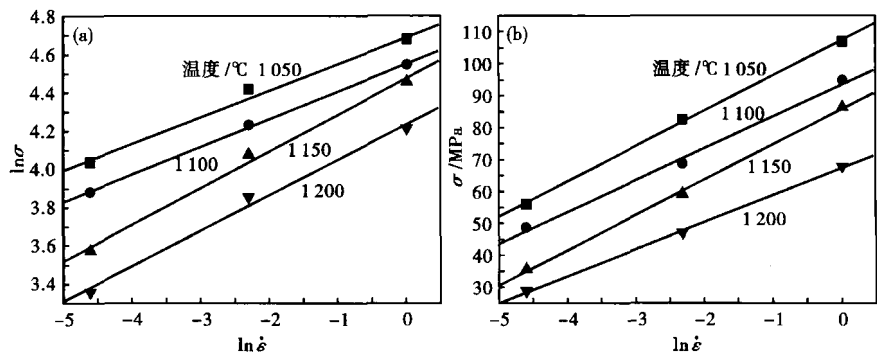


图2 X52 管线钢  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (a) 和  $\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (b) 曲线  
Fig. 2 Curves of  $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (a) and  $\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$  (b) of pipeline steel X52

可见,  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 10\,000/T$  都呈一次线性关系, 而斜率分别为  $1/n$  和  $Q/(nR)$ 。则可以通过线性拟合求得  $Q$ 、 $n$  和  $A$ 。

X52 钢应变速率和温度对热变形峰值应力影响的曲线如图 3(a, b) 所示。根据公式(2), 对流变应力的结果进行回归分析。可得:

$$Q = 232 \text{ kJ/mol}; n = 4.660; A = 6.88 \times 10^9$$

X52 管线钢的热变形方程可表示为:

$$\dot{\epsilon} = 6.88 \times 10^9 [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{4.66} \exp\left(-\frac{232\,000}{RT}\right) \quad (3)$$

### 2.3 Z 参数与峰值应力的关系

Z 参数被广泛用于表示变形温度及应变速率对热变形过程的综合作用, 由已求得的热变形激活能  $Q$ , 通过线性拟合, 可以计算出 X52 管线钢热变形的 Z 参数 [ $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ ] [5]。

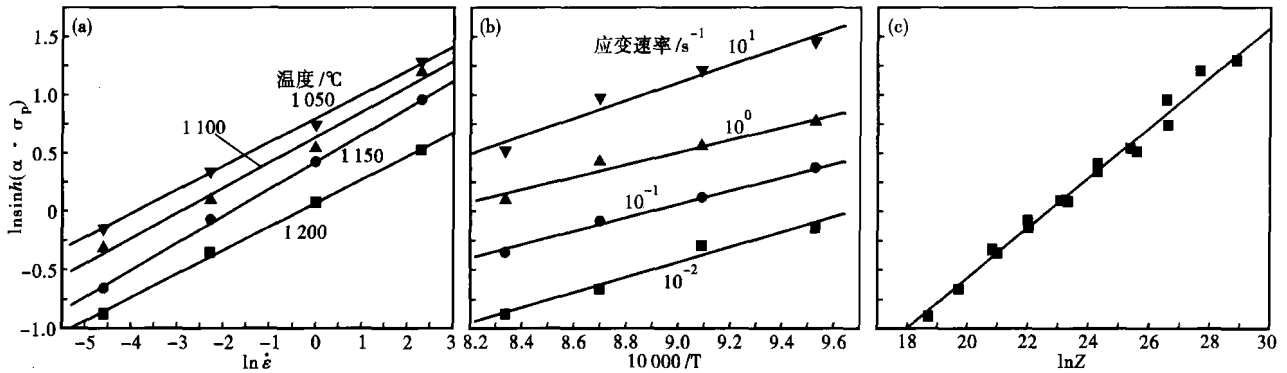


图 3 应变速率(a), 温度(b)和 Z 参数(c)对 X52 管线钢热变形峰值应力的影响

Fig. 3 Effect of strain rate (a), temperature (b) and Z parameter (c) on peak stress of hot deformation of pipeline steel X52

由图 3(c) 可见, 随着 Z 值的增加, X52 管线钢热变形峰值应力也相应增加。

### 3 结论

(1) 在变形速率和应变量相同的情况下, 变形温度越高, 所对应的应力值越低, 并且随着变形温度的降低, 峰值应力不断增加同时向应变增大的方向移动。在变形温度下和应变量一定时, 变形速率越高, 所对应的应力值越大。同时, 随着应变速率的增加, 峰值应力也向应变增大的方向移动。

(2) X52 管线钢热变形激活能为 232 kJ/mol, 热变形方程可表示为:

$$\dot{\epsilon} = 6.88 \times 10^9 [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{4.66} \exp\left(-\frac{232\,000}{RT}\right)$$

(3) 随着 Z 参数的增加, X52 管线钢热变形峰值应力相应增加。

河北省自然科学基金资助项目 (E2009000456)

### 参考文献

- 1 刘文昌, 郑扬曾, 王明智, 等. 18Mn-18Cr-0.5N 奥氏体钢热变形行为. 钢铁, 1994, 29(7): 55
- 2 高维林, 白光润, 周志敏, 等. 含 Nb 钢热变形行为和金属塑性形变中流变应力的预测. 金属学报, 1992, 28(8)A: 351
- 3 周晓光, 吴迪, 刘振宇, 等. FTSR 轧制含镍钢的再结晶行为. 钢铁研究学报, 2008, 20(3): 42
- 4 Laasaraoui A, Jonas J J. Prediction of Steel Flow Stresses at High Temperatures and Strain Rates. Metallurgical Transaction, 1991, 22A: 1545
- 5 Wang Jin, Chen Jun. Hot Deformation Behavior and Flow Stress Model of F40MnV Steel. Cent. South Univ. Technol, 2007, 14(1): 19

张 龙(1984-), 男, 硕士研究生, 先进钢铁材料及轧辊材料开发。

收稿日期: 2009-08-06

欢迎订阅 2010 年《特殊钢》杂志

邮发代号: 38-183

定价: 16.00 元/期 96.00 元/年

全国各地邮局订阅