

# 低碳、Ti-V 复合微合金化钢的流变应力模型

沈继程,贾涛,刘振宇

( 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,辽宁 沈阳 110819 )

**摘 要:**通过单道次压缩实验,研究了一种低碳、Ti-V 复合微合金化钢在温度为 1 173 ~ 1 373 K 及应变速率为 0.1 ~ 10 s<sup>-1</sup> 条件下的奥氏体应力-应变行为;基于 Akben 等对溶质阻碍动态再结晶的量化研究工作,获得了本实验钢的近似的形变激活能  $Q_{\text{def}}$  及 Zener-Hollomon 参数;采用 Jonas 等的分析方法,计算得到回复参数  $r$  和  $r'$ 、屈服应力  $\sigma_0$ 、饱和流变应力  $\sigma_{\text{sat}}$  和动态再结晶临界应力  $\sigma_c$  与  $Z$  参数的关系,获得了动态再结晶动力学,并最终建立流变应力数学模型。

**关 键 词:** 钛钒微合金钢;动态再结晶;流变应力;数学模型;单道次压缩

中图分类号: TG 111.5      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2016)05-0638-05

## Flow Stress Modeling in Low Carbon Titanium-Vanadium Microalloyed Steel

*SHEN Ji-cheng, JIA Tao, LIU Zhen-yu*

( State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: JIA Tao, E-mail: jiatao@ral.neu.edu.cn )

**Abstract:** Using the single-pass compression experiment, the stress-strain behavior of austenite in a low carbon titanium-vanadium microalloyed steel was studied. The investigated temperature and strain rate were in a range of 1 173 ~ 1 373 K and 0.1 ~ 10 s<sup>-1</sup>, respectively. The deformation activation energy  $Q_{\text{def}}$  and Zener-Hollomon parameter were determined according to Akben's work which quantified the drag effect of solutes on the dynamic recrystallization. Based on Jonas' analysis, the recovery parameters  $r$  and  $r'$ , yield stress  $\sigma_0$ , saturation stress  $\sigma_{\text{sat}}$ , and the critical stress for dynamic recrystallization  $\sigma_c$  were formulated as functions of  $Z$ -parameter and then the kinetics for dynamic recrystallization was derived. Eventually, a flow stress model was established.

**Key words:** titanium-vanadium microalloyed steel; dynamic recrystallization; flow stress; mathematical model; single-pass compression

热轧钢材的流变应力模型是轧制力计算的必要条件,是获得高尺寸精度产品的关键,而在轧制变形过程中伴随着加工硬化的动态回复、动态再结晶行为是奥氏体晶粒尺寸控制的重要步骤。因此,量化研究变形过程中的应力应变行为具有重要的理论与实践意义。最近,Jonas 等<sup>[1-3]</sup>对动态再结晶行为进行了更进一步的研究,不再以单道次压缩最后时刻的应力-应变状态为参考来定义动态软化率,而考虑任意时刻微观组织由未再结晶晶粒和动态再结晶晶粒组成,以即时状态来

定义该时刻的动态再结晶体积分数,建立了一种新的描述流变应力模型。

近年来,先进高强度钢的研发极大地增加了微合金元素的使用量,它们对微观组织调控和钢材强韧性的贡献也得到了进一步的关注。在应力-应变行为研究方面,Nb,Ti,Nb-Ti 及 V 微合金钢已有较多的研究<sup>[4-8]</sup>,但关于 Ti-V 微合金钢的研究却很少报道。本文利用 Gleeble-3500 热力模拟实验机,通过单道次压缩变形的实验方法研究了一种低碳、Ti-V 复合微合金化钢的应

力-应变行为, 并采用 Jonas 分析方法建立了流变应力模型.

### 1 实验材料和方法

实验钢的化学成分如表 1 所示, 铸坯经热轧开坯后加工成  $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  热模拟圆柱试样. 热模拟工艺如图 1 所示, 先将试样以  $10\text{ K/s}$  加热至  $1473\text{ K}$ , 保温  $3\text{ min}$ , 然后以  $10\text{ K/s}$  冷却至变形温度, 待温  $2\text{ s}$  以使试样温度稳定; 最后, 单道次压缩至  $0.6$  的真应变, 变形温度为  $1173, 1223, 1273, 1323, 1373\text{ K}$ , 变形速率为  $0.1, 1, 5, 10\text{ s}^{-1}$ .

表 1 实验用钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the experimental steel (mass fraction) %

C	Si	Mn	Al	V	Ti	P	S
0.06	0.22	1.5	0.05	0.052	0.09	0.0065	0.003

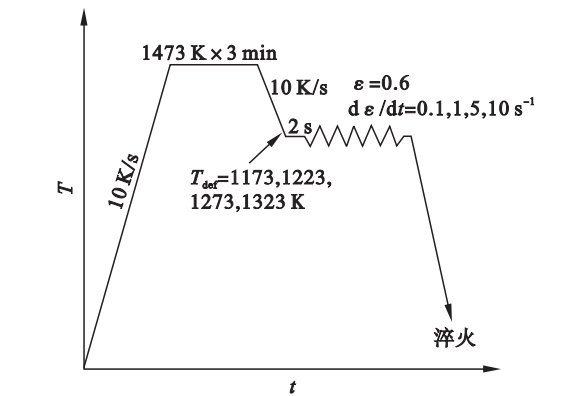


图 1 单道次压缩实验工艺图  
Fig. 1 Schematic illustration of experimental procedure or single-pass compression

### 2 流变应力模型

在传统流变应力模型中, 以实验最大应变值对应的应力值( $\sigma_{ls}$ )为参考来定义动态再结晶软化分数  $X$ , 即:

$$X = \frac{\sigma_{wh} - \sigma}{\sigma_{sat} - \sigma_{ls}} \tag{1}$$

其中  $\sigma_{wh}$  是未再结晶晶粒的流变应力,  $\sigma_{sat}$  是加工硬化与动态回复达到平衡时的饱和应力. 这一模型的缺陷在于, 任意时刻的软化率定义是以  $\sigma_{sat} - \sigma_{ls}$  为基准, 而这一最终状态将随着实验设备能力变化, 具有很大的随意性.

最近, Jonas 等<sup>[1-3]</sup>提出了一种新的定义方法, 即以即时状态来定义该时刻的动态再结晶体

积分数. 例如, 单道次压缩任意时刻, 微观组织可由未再结晶晶粒和已再结晶的晶粒组成, 其流变应力分别对应于  $\sigma_{wh}$  和  $\sigma_{rex}$ , 则动态再结晶体积分数  $X'$  为

$$X' = \frac{\sigma_{wh} - \sigma}{\sigma_{wh} - \sigma_{rex}} \tag{2}$$

那么, 流变应力模型可表述为

$$\sigma = \sigma_{wh} - X'(\sigma_{wh} - \sigma_{rex}) \tag{3}$$

2.1  $\sigma_{wh}$  和  $\sigma_{rex}$  的定义  
材料的加工硬化行为可由式(4)描述:

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = h - r\rho \tag{4}$$

即位错密度的变化由当前的位错密度、动态回复速率  $r$  和加工硬化速率  $h$  决定, 其中  $r$  和  $h$  与应变无关. 为了获得  $\sigma_{wh}$ , 需将式(4)进行积分并采用  $\sigma = M\alpha\mu b\sqrt{\rho}$  将位错密度转换为应力, 其中  $M$ ,  $\mu$  和  $b$  分别为泰勒因子、剪切模量和柏氏矢量,  $\alpha$  为与材料相关的常数, 取  $0.5$ . 根据以上推导, 可得

$$\sigma_{wh} = [\sigma_{sat}^2 - (\sigma_{sat}^2 - \sigma_0^2)\exp(-r(\varepsilon - \varepsilon_0))]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$\sigma_{wh}$  描述的是从屈服应力  $\sigma_0$  至饱和应力  $\sigma_{sat}$  间未再结晶晶粒的流变应力的演变过程, 其中  $\sigma_{sat}$  与  $h$ ,  $r$  紧密相关, 即:

$$\sigma_{sat} = M\alpha\mu b\sqrt{(h/r)} \tag{6}$$

$\sigma_{rex}$  为再结晶晶粒的平均流变应力. 当应变达到  $\varepsilon_c$  时, 再结晶开始发生, 再结晶晶粒的流变应力由  $\sigma_{wh}$  降低为  $\sigma_0$ . 随着应变的增加, 更多的晶粒发生再结晶并再次加工硬化, 最终达到稳态应力  $\sigma_{ss}$ . 对于大多数钢铁材料,  $\sigma_{ss}$  与动态再结晶时刻的极限应力  $\sigma_c$  相对应. 因此  $\sigma_{rex}$  为

$$\sigma_{rex} = [\sigma_c^2 - (\sigma_c^2 - \sigma_0^2)\exp(-r'(\varepsilon - \varepsilon_c))]^{1/2} \tag{7}$$

与  $r$  不同,  $r'$  不仅仅为动态回复速率, 还描述了动态再结晶新晶粒的产生速率. 与式(6)类似,  $\sigma_c$  可以用式(8)描述:

$$\sigma_c = M\alpha\mu b\sqrt{(h/r')} \tag{8}$$

图 2a 显示了实验获得的流变应力  $\sigma$ , 以及对应的未再结晶、再结晶晶粒的流变应力  $\sigma_{wh}$  和  $\sigma_{rex}$ .

2.2 模型参数确定  
根据 Jonas 等的推导:

$$\sigma \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0.5r\sigma_{sat}^2 - 0.5r\sigma^2 \tag{9}$$

通过  $\sigma \cdot d\sigma/d\varepsilon$  与  $\sigma^2$  的线性拟合, 获得的斜率  $m$  即为  $-0.5r$ , 截距为  $0.5r\sigma_{sat}^2$ . 在此过程中,

需要注意两点:①式( 9)是针对未再结晶晶粒的应力应变行为,而 $\sigma - \varepsilon$ 曲线与 $\sigma_{wh} - \varepsilon$ 曲线在 $\sigma_0 - \sigma_c$ 段重合,即仅需要采用该段数据进行线性拟合,如图 2b 所示;②在 Jonas 的推导中, $\varepsilon = 0$  对应于 $\sigma = \sigma_0$ ,即需要将 $\sigma - \varepsilon$ 曲线向左平移 0.2%.

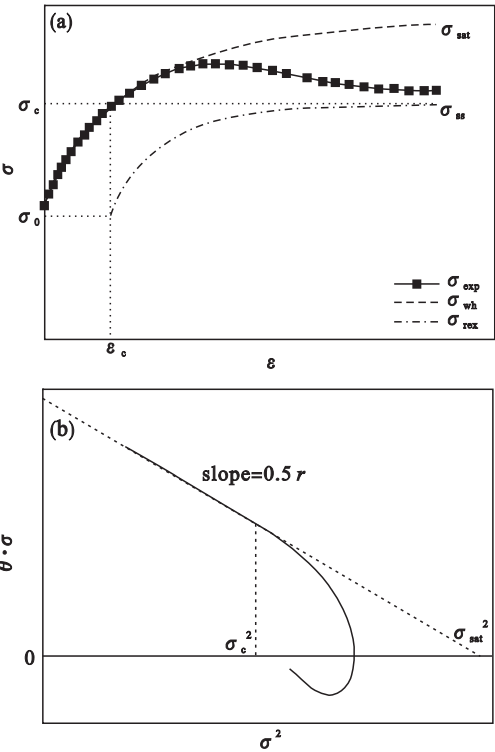


图 2 模型参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model parameters  
( a )— $\sigma - \sigma_{wh}$ 与 $\sigma_{rex}$ 曲线;( b )— $\theta\sigma - \sigma^2$ 线性拟合.

根据  $r$  和  $\sigma_{sat}$ ,

$$h = r \left( \frac{\sigma_{sat}}{M\alpha\mu b} \right)^2. \tag{10}$$

其中  $M\alpha$  分别取 3 和 0.5, $\mu^{[9]}$ 和 $b^{[10]}$ 考虑了温度相关性.在  $h$  和  $\sigma_c$  已知的条件下,通过式( 8 ) 可以计算出  $r'$ .

3 实验结果及模型建立

3.1 实测应力-应变曲线

图 3a 为  $d\varepsilon/dt = 5\text{ s}^{-1}$  时,不同温度下实验钢的流变应力曲线.可以看出,流变应力随着变形温度的降低而增大,即较低的变形温度不利于位错的热激活运动,例如位错攀移.图 3b 为  $T = 1\,273\text{ K}$  时,不同应变速率条件下的流变应力曲线.随着应变速率增大,流变应力增加,即较高的应变速率不能为位错的回复运动提供充足时间.值得注意的是,部分流变应力曲线的末端出现上

翘的趋势,例如图 3a 中  $T = 1\,173 \sim 1\,273\text{ K}$  曲线,这与单道次压缩最终阶段未能保持恒定应变速率相关,但这并不影响建立流变应力模型.

在当前实验条件下,由于峰值应力数据不足,不能直接从实验数据中计算得到形变激活能  $Q_{def}$ .在 Akben 等<sup>[11]</sup>的研究工作中,采用了溶质阻止动态再结晶参数( soluble retardation parameters, SRP )来量化各种溶质原子对动态再结晶的阻碍作用;研究表明 Nb 和 Ti 对动态再结晶的抑制作用显著,V 的作用较弱,其单位原子数的 SRP 比值约为 20:5:1,转换得到单位质量分数的 SRP 比值为 10:5:1.因此,作为一种近似,实验钢中 0.09% Ti - 0.052% V 可以与 0.05% Nb 等价,这与文献[ 4 ]中实验钢 No. 4 的合金成分非常接近.因此,根据其计算结果,本实验钢的  $Q_{def}$  可近似为 432 kJ/mol.

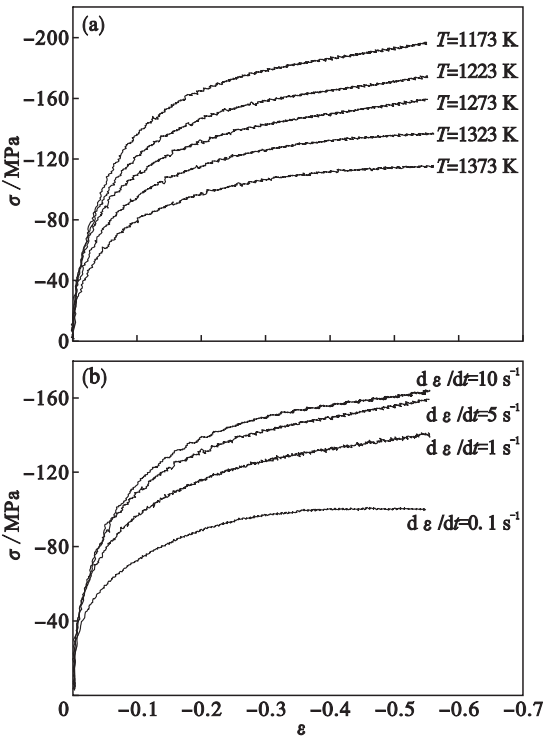


图 3 单道次压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve for single compression tests  
( a )— $d\varepsilon/dt = 5\text{ s}^{-1}$ ;( b )— $T = 1\,273\text{ K}$ .

3.2 建立流变应力模型

采用 7 次多项式,对图 3 中的流变应力曲线中  $\sigma_0 - \sigma_c$  线段进行拟合,然后可推导出  $\theta\sigma - \sigma^2$  图,如图 4 所示;其中空心圆数据点代表极限应力  $\sigma_c$ .采用 P-J( Poliak - Jonas )方法<sup>[12]</sup>求得,即  $\sigma_c$  对应于  $-dT/d\sigma - \sigma$  曲线上的极限值.

采用 2.2 节中参数确定方法,可分别计算出  $r$ , $r'$ 和 $\sigma_{sat}$ .在 Quelennec 等<sup>[2-3]</sup>的研究中  $r$  和  $r'$

随着  $Z$  参数的增大先减小,而后逐渐趋于饱和,其中  $Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(Q_{\text{def}}/RT)$ . 相对而言,本文中的实验条件对应的  $Z$  参数较大,即  $r$  和  $r'$  均已达到稳定状态,分别为 10.9 和 7.8,如图 5 所示. 图 6 为  $\sigma_0$ 、 $\sigma_c$  和  $\sigma_{\text{sat}}$  与  $Z$  参数的关系,可表示为

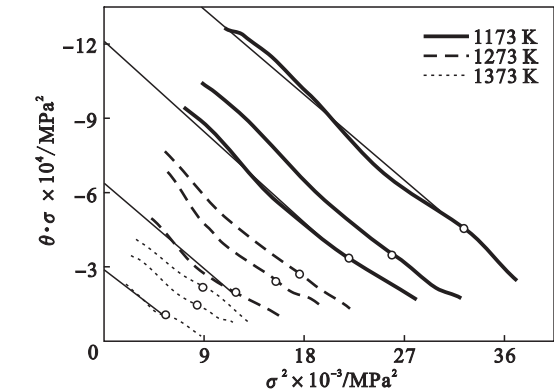


图 4 根据应力应变曲线推导的  $\theta\sigma - \sigma^2$  图  
Fig. 4  $\theta\sigma$  vs  $\sigma^2$  curve plot derived from experimental stress-strain curves

$$\sigma_0 = 3.274 \times \lg(Z) + 32.8, \quad (11)$$

$$\sigma_c = 10.757 \times \lg(Z) + 40.8, \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{sat}} = 11.003 \times \lg(Z) + 60.1. \quad (13)$$

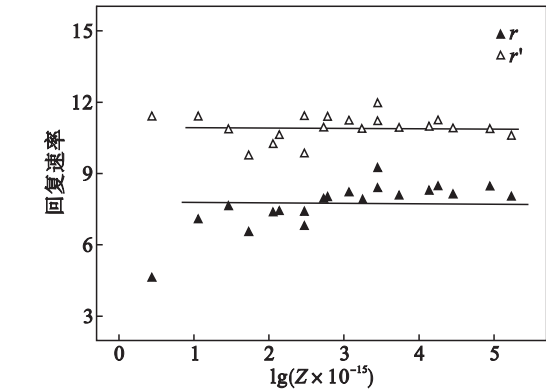


图 5  $r$  和  $r'$  与  $Z$  参数的相关性  
Fig. 5 Dependence of  $r$  and  $r'$  on  $Z$

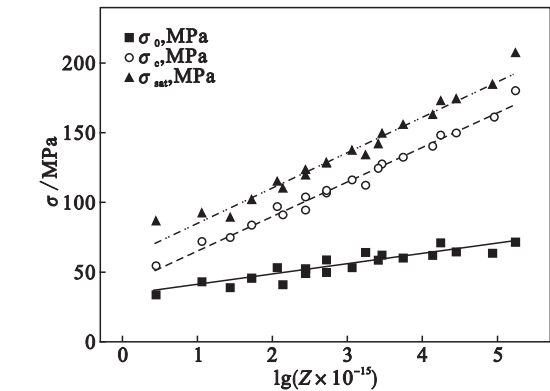


图 6  $\sigma_0$ 、 $\sigma_c$  和  $\sigma_{\text{sat}}$  与  $Z$  参数的相关性  
Fig. 6 Dependence of  $\sigma_0$ 、 $\sigma_c$  和  $\sigma_{\text{sat}}$  on  $Z$

如图 7 所示,在以上数据基础上,可以建立任意变形条件( $Z$  参数)下的  $\sigma_{\text{wh}}$  和  $\sigma_{\text{rex}}$  流变应力曲线,并采用式(2)可计算出该条件下的动态再结晶动力学曲线,进而建立描述动态再结晶动力学的 Avrami 模型,即指数  $n$  和参数  $k$  与变形条件的数学关系. 图 7b 中对采用式(1)和式(2)获得的两种动态再结晶动力学曲线进行了对比,可以看出两者存在约 10% 的差异,而且这种差异会随着  $Z$  的增大而增大<sup>[2]</sup>.

至此,通过采用式(3),以及  $\sigma_0$ 、 $\sigma_c$ 、 $\sigma_{\text{sat}}$ 、 $r$ 、 $r'$ ,  $n$  和  $k$  与  $Z$  的函数关系,可以预测任意温度、变形速率条件下的流变应力曲线,如图 7a 中的  $\sigma_{\text{model}}$ .

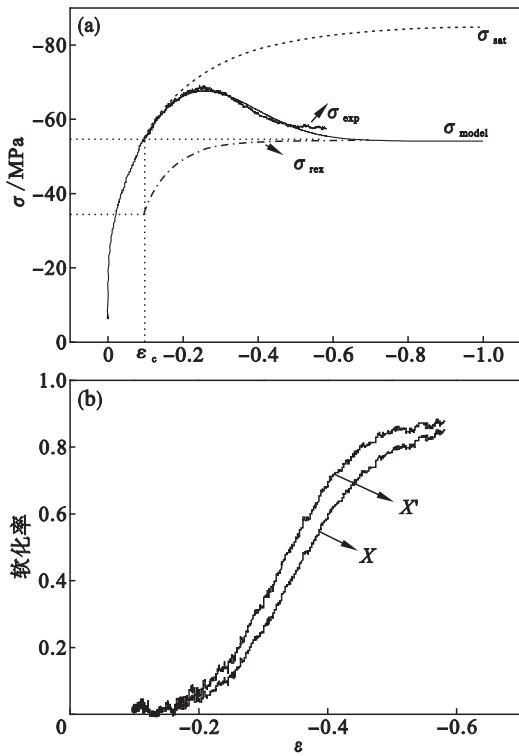


图 7 建模结果  
Fig. 7 Modeling results  
(a)—流变应力曲线实测值与模型预测值;  
(b)—动态再结晶分数  $X$  与  $X'$  对比.

## 4 结 论

1) 通过单道次压缩实验研究变形条件对应力-应变行为的影响,流变应力随着变形温度的降低、变形速率的增加而增大.

2) 以一种低碳、Ti-V 复合微合金化钢为例,通过采用 Jonas 等的分析方法,计算可得回复参数  $r$  和  $r'$ 、屈服应力  $\sigma_0$ 、饱和流变应力  $\sigma_{\text{sat}}$  和动态再结晶临界应力  $\sigma_c$  与  $Z$  参数的关系,从而建立流变应力数学模型.