

高 Ti 微合金高强钢静态再结晶动力学模型

杭子迪¹, 冯运莉¹, 崔 岩¹, 万德成¹, 徐永先², 张 镇²

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 首钢京唐联合钢铁有限公司技术中心, 河北 唐山 063210)

摘 要: 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机, 通过应力松弛法对高 Ti 微合金高强钢的静态再结晶行为进行研究。结果表明: 在高的变形(保温)温度和大的变形量下, 静态再结晶进程加快, 变形速率对静态再结晶的影响较小; 计算出静态再结晶激活能 $Q_{\text{rex}} = 276.45 \text{ kJ/mol}$, 证实了微合金元素 Ti 有抑制再结晶的作用; 基于 Avrami 方程确定了试验钢静态再结晶动力学模型。

关键词: 高 Ti 微合金钢; 静态再结晶; 动力学模型; 再结晶激活能

中图分类号: TF76 ,TG115.5 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)01-0141-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.01.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Mathematical Modeling of the Recrystallization Kinetics of High Ti Microalloyed High Strength Steel

Hang Zidi¹, Feng Yunli¹, Cui Yan¹, Wan Decheng¹, Xu Yongxian², Zhang Zhen²

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Technology Center, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Static recrystallization behavior of high strength steel with high Ti microalloying was studied by a Gleeble 3500 thermal simulation testing machine and stress relaxation method. The results show that the static recrystallization process is accelerated and the deformation rate has little effect on the static recrystallization under high deformation temperature and large deformation. The calculated activation energy of static recrystallization is $Q_{\text{rex}} = 276.45 \text{ kJ/mol}$, which confirms that the microalloy element Ti can inhibit recrystallization. Based on Avrami equation, the static recrystallization model of experimental steel has been established.

Key words: high Ti microalloyed steel, static recrystallization, dynamic model, recrystallization activation energy

0 引言

热变形过程中, 奥氏体发生的再结晶行为能够有效地改变钢材的组织 and 性能, 因此奥氏体的再结晶行为一直是学者研究的重点。目前, 普碳钢和 Nb、V 微合金钢的研究相对较多, 且建立了一系列的

动力学模型, 但是关于 Ti 微合金钢的研究较少, 相关的再结晶模型建立较为少见^[1-3]。与 Nb、V 不同, Ti 作为合金元素, 同时拥有极好的晶粒细化和沉淀强化的作用, 具备单合金元素开发高强钢的潜力, 因此研究高 Ti 微合金钢再结晶行为有着重要意义。对于微合金钢, 由于合金元素的存在, 热变形过程中

收稿日期: 2019-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674123); 河北省自然科学基金资助项目(E2017209237 and E2016209390)。

作者简介: 杭子迪(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料及加工工程, E-mail: 413699869@qq.com; 通讯作者: 冯运莉, 教授, 博士, 主要研究方向为金属材料及加工工程, E-mail: tsfengyl@163.com。

常常伴有固溶和析出行为,使再结晶过程变得更为复杂,与普通碳钢区别较大。

目前,研究奥氏体静态再结晶的常见方法是利用两道次或者多道次热压缩变形获得的真应力应变曲线计算,主要的方法有补偿法(应变为0.2%或者2%处所对应的屈服应力)、后插法、5%总应变法和平均应变法^[4]。但是这些试验方法工作量大且没有标准化的试验方案,后续的数据处理方式也存在争议^[5-6]。近年来,逐渐兴起用应力松弛法研究奥氏体的再结晶行为,这种方法最早由OULU大学的Karjalainen L P教授^[7]在1994年提出并验证了其可靠性。近年来董洪波^[8]、李红^[9]等人也在试验中证明应力松弛法和双道次法得出的结果类似,且更接近定量金相组织测定结果,同时能够大幅减少工作量,因此笔者采用这种方法对高Ti微合金钢进行研究。

1 试验材料和方法

试验材料为高Ti微合金高强度铸坯,化学成分(质量分数,%)为C 0.07, Mn 1.90, Si 0.11, Ti 0.11, S 0.001, P 0.007, Fe 余量。在铸坯中心部位用线切割机加工成直径8 mm,长15 mm的圆柱体试样,在Gleeble-3500热模拟试验机上,以20 °C/s的速度加热到1 220 °C,保温3 min,以10 °C/s的速率冷却到变形温度,开始进行热压缩试验,变形后试样应力松弛5 min,水淬至室温。

碳钢应力松弛曲线的典型表现形式见图1。

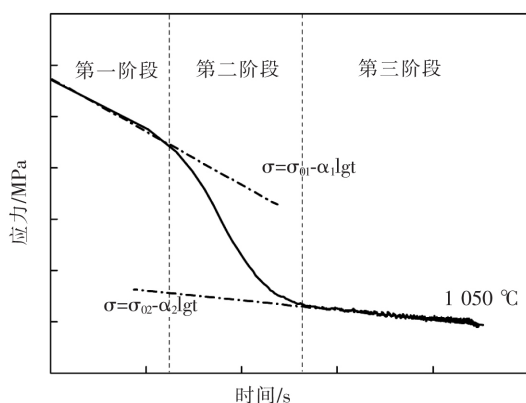


图1 应力松弛曲线

Fig.1 Stress relaxation curve of deformed samples held at 1 050 °C

由图1可以看出,曲线分为三个明显的阶段。第一阶段是变形奥氏体的回复阶段;第二阶段是变形奥氏体发生再结晶的阶段;第三阶段是再结晶完

成后的奥氏体回复阶段^[10]。其中第一阶段和第三阶段应力和对数时间呈直线关系,可以用以下的表达式描述:

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha_1 \lg t \quad (1)$$

其中 σ 是真应力, t 是变形后的松弛时间, σ_0 和 α 是常数。为方便区分,用式(2)、(3)表示第一阶段和第三阶段材料的应力:

$$\sigma = \sigma_{01} - \alpha_1 \lg t \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_{02} - \alpha_2 \lg t \quad (3)$$

如图1中虚线所示,第二阶段应力的急剧下降是由于变形奥氏体再结晶导致的,假设此时材料只有加工硬化的奥氏体和完全软化的奥氏体组成,可以通过混合法则将再结晶阶段的应力 σ 由松弛时间 t 表示:

$$\sigma = (1-X)(\sigma_{01} - \alpha_1 \lg t) + X(\sigma_{02} - \alpha_2 \lg t) \quad (4)$$

其中 X 是材料的软化率,通过式(4)可以得到材料软化率 X 的方程式:

$$X = \frac{[(\sigma_{01} - \alpha_1 \lg t) - \sigma]}{[(\sigma_{01} - \sigma_{02}) - (\alpha_1 - \alpha_2) \lg t]} \quad (5)$$

热变形过程中,静态再结晶可以用Avrami方程表示:

$$X = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^n \right] \quad (6)$$

其中 X 为软化率, t 为时间, $t_{0.5}$ 为再结晶发生50%所需时间, n 为常数。 $t_{0.5}$ 受变形温度、变形量、变形速率和初始奥氏体晶粒尺寸的影响,可以用式(7)表示:

$$t_{0.5} = A d_0^m \dot{\epsilon}^p \exp \left(\frac{Q_{\text{rex}}}{RT} \right) \quad (7)$$

其中 A 为材料有关的常数, d_0 为原始奥氏体晶粒尺寸, $\dot{\epsilon}$ 为变形量, $\dot{\epsilon}$ 为变形速率, T 为变形温度, Q_{rex} 为静态再结晶激活能, R 为气体常数,取8.314 J/(mol · K)。对式(7)两边同时取自然对数可得:

$$\ln(t_{0.5}) = \ln A + m \cdot \ln d_0 + p \cdot \ln \dot{\epsilon} + q \cdot \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q_{\text{rex}}}{RT} \quad (8)$$

通过后续数据的拟合可以求出相对应 A 、 m 、 p 、 q 、 Q_{rex} 和 n 的值,从而确定试验钢的静态再结晶Avrami方程。

2 试验结果与讨论

图2、3分别是不同变形温度和不同变形速率下的真应力应变曲线,能够明显地看出应力随着应变的增加而升高,没有出现平台或者下降的情况,可以

确定在设定的变形温度和变形速率下没有发生回复和再结晶。此时试样内部保有大量的储存能,变形结束以后必然发生静态再结晶。

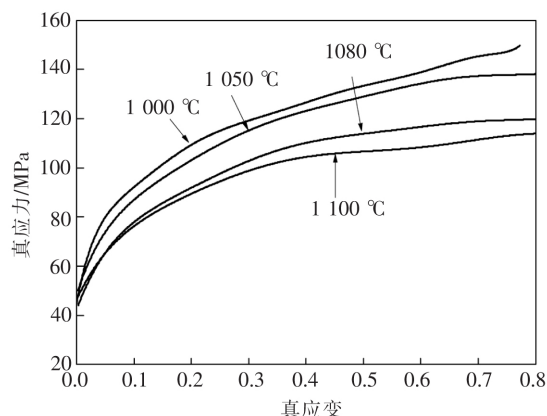


图 2 不同变形温度下应力—应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of sample deformed at different temperatures

图 4 是通过式 (5) 得到的不同变形温度、不同变形速率和不同压下量下的再结晶率曲线。一般地,将静态再结晶分数为 5%、50%、95% 所对应的时间作为静态再结晶的开始和结束时间,用 $t_{0.05}$ 、 $t_{0.5}$ 、

$t_{0.95}$ 表示。通过图 4 可以确定不同变形参数下相对应的 $t_{0.05}$ 、 $t_{0.5}$ 、 $t_{0.95}$ 如表 1 所示。

2.1 轧制温度的影响

在应力松弛试验中,变形温度即为再结晶退火的保温温度,保温温度对再结晶的影响十分显著。再结晶发生 50% 的时间 $t_{0.5}$ 与温度 T 的关系如下:

$$t_{0.5} \propto \exp\left(\frac{Q_{\text{rex}}}{RT}\right) \quad (9)$$

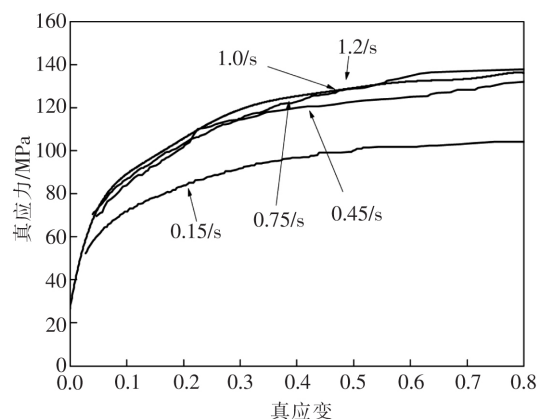
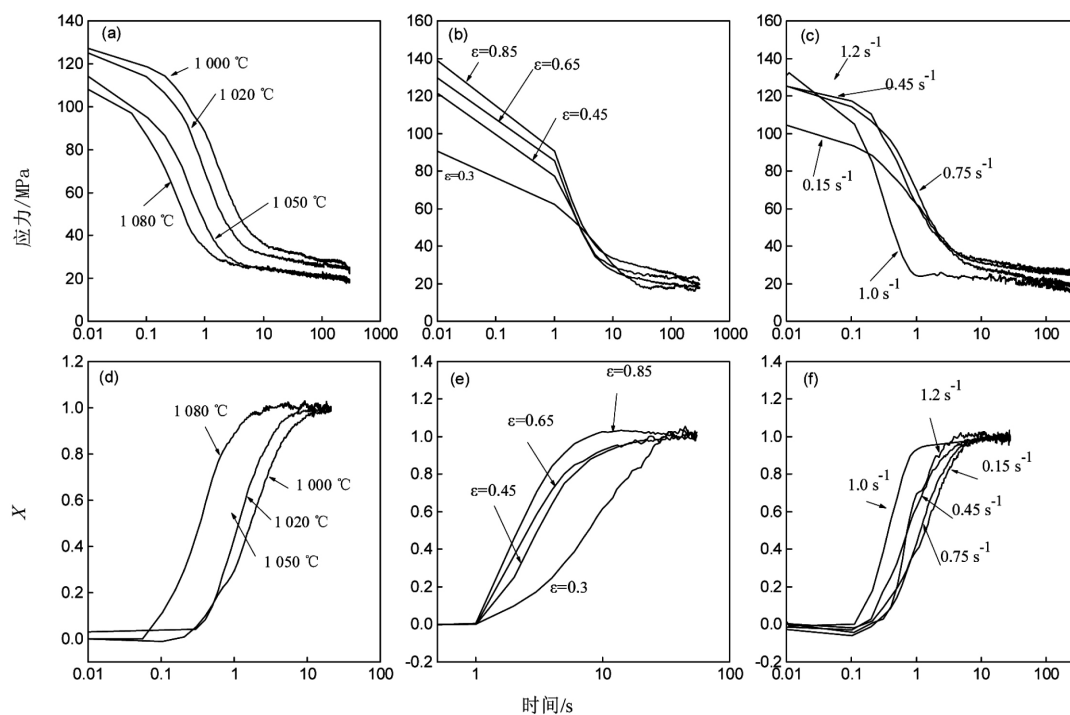


图 3 不同变形速率下应力—应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of sample deformed at different strain rates



(a、b、c 分别是不同温度、应变量和应变速率所对应的应力松弛曲线, d、e、f 分别是不同温度、应变量和应变速率所对应再结晶率曲线)

图 4 不同变形温度、不同变形速率和不同压下量下的应力松弛曲线和静态再结晶率曲线

Fig.4 Stress relaxation curve and static recrystallization rate curve under different deformation temperature, strain and strain rate

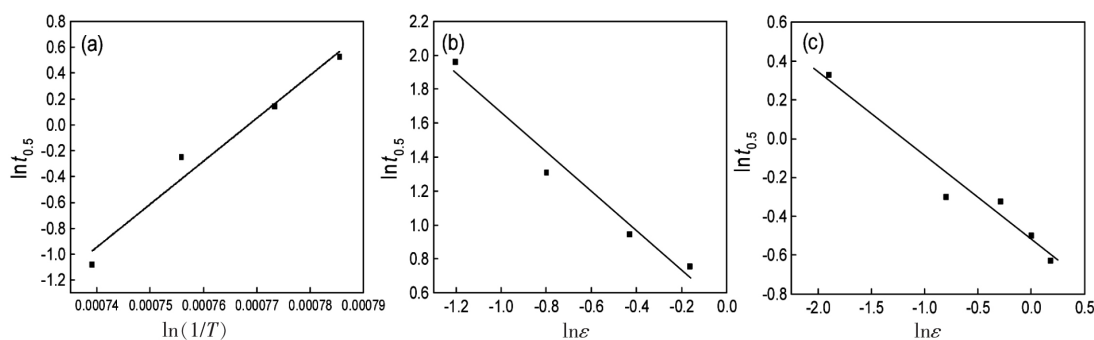
表1 静态再结晶开始及结束时间
Table 1 Starting and ending time of static recrystallization

试验参数			软化时间/s		
$T/^{\circ}\text{C}$	ε	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	$t_{0.05}$	$t_{0.5}$	$t_{0.95}$
1 000	0.92	0.75	0.30	1.69	8.64
1 020	0.92	0.75	0.29	1.15	4.91
1 050	0.92	0.75	0.24	0.78	2.97
1 080	0.92	0.75	0.07	0.34	1.45
1 020	0.92	0.15	0.25	1.39	5.30
1 020	0.92	0.45	0.22	0.74	4.19
1 020	0.92	0.75	0.32	1.16	4.87
1 020	0.92	1.0	0.13	0.37	1.44
1 020	0.92	1.2	0.34	0.72	2.67
1 020	0.30	1.0	1.43	7.86	25.57
1 020	0.45	1.0	1.15	3.03	14.09
1 020	0.65	1.0	1.10	2.57	12.06
1 020	0.85	1.0	1.086	2.13	5.70

从式(9)可以看出,温度 T 越高, $t_{0.5}$ 越小,即随着温度的升高,再结晶时间所需时间缩短。

以 $\ln t_{0.5}$ 为纵坐标, $\ln(1/T)$ 为横坐标,将相应数据代入后进行线性拟合,如图5(a)所示,可以得出静态再结晶激活能 $Q_{\text{rex}} = 276.45 \text{ kJ/mol}$,略低于含Nb钢^[11]的再结晶激活能 $Q_{\text{rex}} = 319.45 \text{ kJ/mol}$,高于普碳钢^[4]的再结晶激活能 $Q_{\text{rex}} = 218.67 \text{ kJ/mol}$ 。再结晶激活能 Q_{rex} 的值反应了材料发生静态再结晶的能量壁垒,证实了合金元素Ti有抑制再结晶的作用,但是效果没有合金元素Nb强烈。

图6是不同温度下再结晶开始和结束曲线,从图6可以发现,随着温度的升高,再结晶速率加快。理论上,变形温度越高,基体越容易发生回复软化,形变储能能将减小,再结晶过程将难以发生,但是保温温度的升高使得再结晶形核率提高、长大速率增加,且影响远远大于温度对形变储能能的影响,从而加快了再结晶进程。



(a) $\ln t_{0.5} - \ln(1/T)$; (b) $\ln t_{0.5} - \ln \varepsilon$; (c) $\ln t_{0.5} - \ln \dot{\varepsilon}$

图5 拟合关系

Fig.5 The fitting relationship

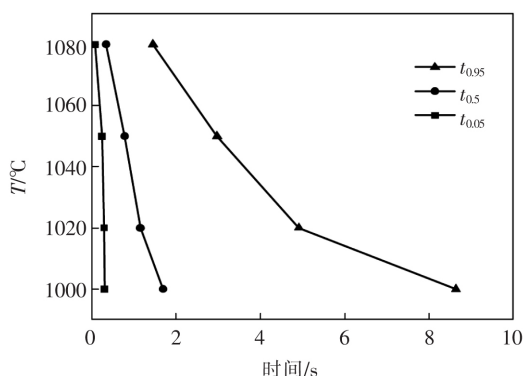


图6 变形温度对再结晶开始、结束时间的影响
Fig.6 Effect of deformation temperature on the starting and ending time of recrystallization

2.2 变形量的影响

变形量是影响储能能最主要的因素,当其他变

形参数一定时,变形量越大储能能越高,而储能能的高低直接影响着静态再结晶的发生过程。因此变形量对再结晶过程有重要影响。再结晶发生50%的时间 $t_{0.5}$ 与变形量的关系如下:

$$t_{0.5} \propto \varepsilon^p \quad (10)$$

以 $\ln t_{0.5}$ 为纵坐标, $\ln \varepsilon$ 为横坐标,将相应数据代入后进行线性拟合,如图5(b)所示,直线斜率即为 p 值 $p = -1.2$ 。即 ε 越大, $t_{0.5}$ 越小,随着变形量的增大,再结晶速率加快。

图7是不同变形量下再结晶开始与结束时间关系曲线,可以发现,随着变形量的增大, $t_{0.05}$ 基本没有变化, $t_{0.95}$ 逐渐减小。这是因为静态再结晶晶核在变形过程中形成,变形量对静态再结晶孕育期影响较小,但是对再结晶的速率影响较大,随着变形量的增加,形变储能能升高,再结晶速率加快。

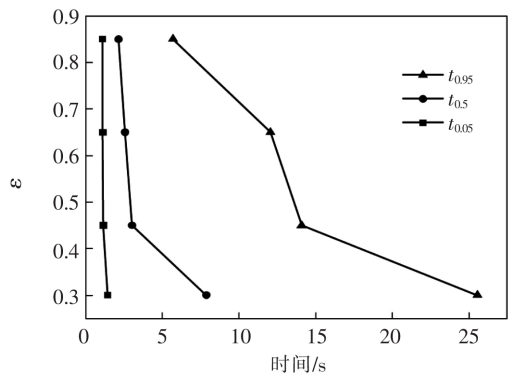


图 7 应变对再结晶开始、结束时间的影响
Fig.7 Effect of strain on start and end time of recrystallization

2.3 变形速率的影响

理论来说,变形速率的增快,使得位错移动、增殖速度加快,动态回复程度较小,材料形变储存能得以保存,提高了静态再结晶驱动力,加快再结晶发生速率。但是大量研究表明,变形速率对再结晶的作用是复杂的,很多情况下具有双重性。从式(11)可得 $t_{0.5}$ 与变形速率的关系如下:

$$t_{0.5} \propto \dot{\varepsilon}^{-q} \quad (11)$$

如图 5(c) 所示,以 $\ln t_{0.5}$ 为纵坐标, $\ln \dot{\varepsilon}$ 为横坐标,将相应数据代入后进行线性拟合,直线斜率即为 q 值, $q = -0.44$ 。

图 8 是不同应变速率下再结晶开始与结束时间关系曲线,可见随着变形速率的提高,再结晶时间呈杂乱分布,没有出现明显的规律,与查阅文献所得的结果相一致。

2.4 初始晶粒大小的影响

热变形前晶粒尺寸越小,形变时产生的位错密度越大,形变储存能也会随之上升;与此同时,由于新生晶粒主要在三叉晶界及其附近形核,因此,初始晶粒尺寸越细小,越容易发生再结晶形核;这两个因素都能有效地促进静态再结晶的发生。由式(12)可以得到 $t_{0.5}$ 与初始奥氏体的晶粒尺寸关系如下:

$$t_{0.5} \propto d_0^m \quad (12)$$

式中 m 的值,对于高 Ti 微合金钢,多种文献指出为 1。因此,随着原始奥氏体晶粒尺寸 d_0 的减小,再结晶过程将加快。

2.5 静态再结晶动力学模型的建立

上文已经提到,热变形过程中的再结晶行为可以用 Avrami 方程来描述,将式(6)两边取自然对数,可得:

$$\ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = \ln 0.693 + n \ln t + n \ln t_{0.5} \quad (13)$$

通过线性回归 $\ln\left(\frac{1}{1-X}\right) - \ln t$, 求出不同变形条件下的 n 值如表 2 所示,并求其平均数得: $n = 1.144$, 即:

$$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{1.144}\right] \quad (14)$$

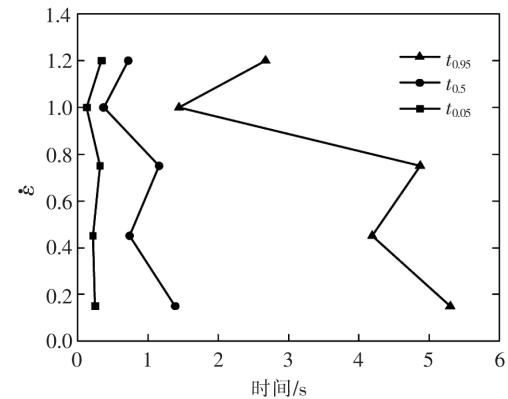


图 8 应变速率对再结晶开始、结束时间的影响
Fig.8 Effect of strain rate on start and end time of recrystallization

对于某一特定的变形条件下, $t_{0.5}$ 为确定值,如式(7)所示,在前文中已经确定了 m, p, q, Q_{rec} , 将试验所得数据代入式(7)并进行拟合可以确定 A 值。表 2 中已经列出不同变形参数下求得的 A 值,取平均数可得 $A = 1.68 \times 10^{-14}$ 。即

$$t_{0.5} = 1.68 \times 10^{-14} d_0 \dot{\varepsilon}^{-1.2} \dot{\varepsilon}^{-0.44} \exp\left(\frac{276450}{RT}\right) \quad (15)$$

表 2 不同试验参数下的 n 值和 A 值
Table 2 n value and A value under different experimental parameters

试验参数			n	A
$T/^\circ\text{C}$	ε	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$		
1 000	0.92	0.75	1.107	1.51E-14
1 020	0.92	0.75	1.235	1.54 E-14
1 050	0.92	0.75	1.059	1.87E-14
1 080	0.92	0.75	0.957	1.42E-14
1 020	0.92	0.15	1.052	9.14E-15
1 020	0.92	0.45	1.324	7.89E-15
1 020	0.92	0.75	1.077	1.55E-14
1 020	0.92	1.0	1.091	5.61E-15
1 020	0.92	1.2	1.013	1.18E-14
1 020	0.3	1.0	1.201	3.11E-14
1 020	0.45	1.0	1.208	1.95E-14
1 020	0.65	1.0	1.301	2.57E-14
1 020	0.85	1.0	1.257	2.94E-14

将试验中各个工艺参数代入求得的再结晶动力学方程中,求出理论的 $t_{0.5}$ 值,和实际值比较,如图9所示。可见预测的静态再结晶 $t_{0.5}$ 与实际值相吻合度较高,从而认为笔者所推出的高Ti微合金高强钢的静态再结晶动力学方程具有一定的可信度。

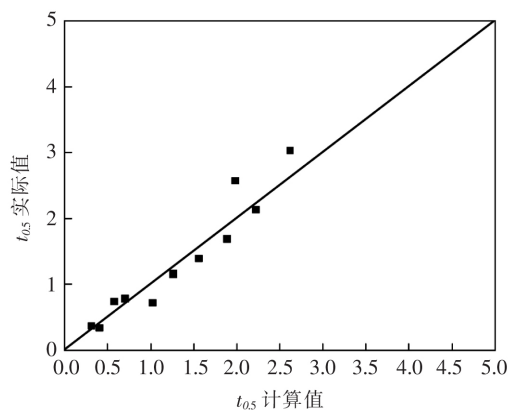


图9 $t_{0.5}$ 实际值和计算值的对比

Fig.9 Comparison of actual and calculated values of $t_{0.5}$

3 结论

1) 变形参数对试验钢静态再结晶均有影响,变形(保温)温度、变形量的影响较大,变速速率影响较小。在高变形(保温)温度和大的变形量下,静态再结晶进程加快。

2) 确定了Ti微合金钢再结晶激活能 $Q_{\text{rex}} = 276.45 \text{ kJ/mol}$,高于普碳钢,低于含Nb钢。证实了微合金元素Ti能够抑制静态再结晶的发生,但是效果没有Nb强烈。

3) 建立了静态再结晶 Avrami 方程: $X = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^{1.144} \right]$,其中 $t_{0.5} = 1.68 \times 10^{-14} d_0 \varepsilon^{-1.2} \dot{\varepsilon}^{-0.44} \exp \left(\frac{276.450}{RT} \right)$ 经过验证后结果吻合度较高,可在一定条件下作为参考。

参考文献

- [1] Salehi M S, Serajzadeh S. A neural network model for prediction of static recrystallization kinetics under non-isothermal conditions [J]. *Comput. Mater. Sci.* 2010, 49: 773.
- [2] Chen F, Cui Z S, Chen S J. Recrystallization of 30Cr2Ni4MoV ultra-super-critical rotor steel during hot deformation. Part 1: Dynamic recrystallization [J]. *Mater. Sci. Eng.* 2012, A528: 5073.
- [3] Chen X M, Lin Y C, Wen D X, et al. Dynamic recrystallization behavior of a typical nickel-based superalloy during hot deformation [J]. *Mater. Des.* 2014, 57: 568.
- [4] Rao Guang. Study on Recrystallization behavior under hot deformation and grain size prediction of 55 steel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University 2017.
(饶广. 55 钢热变形再结晶行为研究与晶粒度预报 [D]. 镇江: 江苏大学 2017.)
- [5] Kliber J, Schindler I. Recrystallization/precipitation behaviour in microalloyed steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60: 597-602.
- [6] Andrade H L, Akben M G, Jonas J J. Effect of molybdenum, niobium and vanadium on static recovery and recrystallization and on solute strengthening in microalloyed steels [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1983, 14(8): 1967-1976.
- [7] Karjalainen L P. Stress relaxation method for investigation of softening kinetics in hot deformation [J]. *Materials Science and Technology*, 1995, 11(6): 557-565.
- [8] Dong Hongbo, Kang Yonglin. Investigation of static softening behavior of a low carbon bainitic steel by stress relaxation method [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment* 2011, 32(3): 103-106.
(董洪波, 康永林. 应力松弛法研究低碳贝氏体钢的静态软化行为 [J]. *材料热处理学报* 2011, 32(3): 103-106.)
- [9] Li Hong, Luo Haiwen, Yang Caifu, et al. Dynamic recrystallization kinetics in austenitic stainless steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research* 2008(9): 32-35, 49.
(李红, 罗海文, 杨才福, 等. 奥氏体不锈钢的再结晶动力学 [J]. *钢铁研究学报* 2008(9): 32-35, 49.)
- [10] Li Xiaolin, Wang Zhaodong. Interphase precipitation behaviors of nanometer-sized carbides in a Nb-Ti-bearing low-carbon microalloyed steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica* 2015, 51(4): 417-424.
(李小琳, 王昭东. 含 Nb-Ti 低碳微合金钢中纳米碳化物的相间析出行为 [J]. *金属学报* 2015, 51(4): 417-424.)
- [11] Zhe Yuan. Studied on the recrystallization behavior of Nb micro-alloyed steel [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology 2007.
(折媛. Nb 微合金钢再结晶行为研究 [D]. 西安建筑科技大学 2007.)