

321 奥氏体不锈钢动态再结晶的研究

胡伟华 康永林 唐兴昌

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要 通过 Gleeble-1500 热模拟试验机研究了 321 钢 (/% : 0.028C、0.69Si、1.21Mn、0.030P、0.001S、17.33Cr、9.19Ni、0.31Ti) 单道次高温 (900 ~ 1 200 °C) 压缩 (0.01 ~ 1 s⁻¹) 时的动态再结晶。结果表明, 变形温度越高, 应变速率越低, 321 钢的软化作用越强, 热变形条件下的真应力-真应变曲线一般没有明显的应力峰值, 在应变速率 0.01、0.1、1 s⁻¹ 时 321 钢动态再结晶开始发生的温度分别为 1 050、1 150、1 150 °C; 在 1 200 °C 变形时, 仍然只发生部分动态再结晶。321 钢热变形激活能 $Q = 422.72 \text{ kJ/mol}$, 动态再结晶 Z 参数 $Z = \dot{\epsilon} \exp[422720/(RT)]$, 临界应变 $\epsilon_c = 0.03567Z^{0.06604}$ 。

关键词 321 奥氏体不锈钢 动态再结晶 热模拟

A Study on Dynamic Recrystallization of Austenite Stainless Steel 321

Hu Weihua, Kang Yonglin and Tang Xingchang

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The dynamic recrystallization of steel 321 (/% : 0.028C, 0.69Si, 1.21Mn, 0.030P, 0.001S, 17.33Cr, 9.19Ni, 0.31Ti) has been studied by single pass hot compression with 0.01 ~ 1 s⁻¹ at 900 ~ 1 200 °C on a Gleeble-1500 thermal simulation machine. Results show that with higher deformation temperature and lower strain rate, the softening effect of steel 321 is stronger; generally there is no obvious peak stress at hot deformation true stress-true strain curves; with strain rate 0.01, 0.1 and 1 s⁻¹, the temperature of initial dynamic recrystallization for steel 321 is respectively 1 050 °C, 1 150 °C and 1 150 °C, and as deforming at 1 200 °C, the partial dynamic recrystallization only occurs in steel. The activation energy Q for dynamic recrystallization in hot deformation process of steel 321 is 422.72 kJ/mol, the dynamic recrystallization Z parameter is $\dot{\epsilon} \exp[422720/(RT)]$ and critical strain $\epsilon_c = 0.03567Z^{0.06604}$.

Material Index Austenite Stainless Steel 321, Dynamic Recrystallization, Thermal Simulation

321 不锈钢属于铬镍系奥氏体不锈钢, 由于添加了稳定化元素钛, 具有优异的耐晶间腐蚀性能和高温性能, 被广泛应用于管道、换热器和耐磨酸容器等的制造中。在 321 不锈钢的热轧生产过程中一般会发生动态再结晶, 动态再结晶是一种重要的软化机制, 对晶粒大小及均匀程度有着重要的影响。因此, 研究 321 不锈钢的动态再结晶规律, 对优化钢的热加工工艺, 改善材料性能, 有着重要的意义。本实验通过高温热压缩试验, 并结合数学分析方法, 研究得到了 321 不锈钢动态再结晶模型和动态再结晶发生的临界条件。

1 实验材料及方法

实验材料取自钢厂提供的 321 不锈钢连铸坯, 化学成分如表 1 所示。连铸坯断面尺寸为 1 540 mm × 220 mm, 取样位置为铸坯头部的中间位置。取样后用线切割法将材料加工成 Φ8 mm × 15 mm 的试样。

在 Gleeble-1500 热模拟实验机上进行单道次高温压缩实验。将试样以 10 °C/s 的升温速率加热到

表 1 实验用 321 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel 321 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ti
0.028	0.69	1.21	0.030	0.001	17.33	9.19	0.014	0.31

1 250 °C, 保温 180 s, 然后以 5 °C/s 的冷却速度分别冷却到 900、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 °C, 保温 60 s 后压缩, 应变速率分别为 0.01、0.1、1 s⁻¹, 工程应变达到 60% 后水淬, 工艺路线如图 1 所示。将变形试样沿加载方向剖开成大小相同的两部分, 取其中一部分, 打磨、抛光, 采用 CuSO₄ + HCl + H₂O 溶液浸蚀以观察组织。

2 实验结果及分析

2.1 321 不锈钢高温热压缩真应力-真应变曲线及组织

图 2 为 321 不锈钢在不同条件下单道次高温压缩所获得的真应力-真应变曲线。可以看出, 变形量、应变速率和变形温度对 321 不锈钢高温热变形行为有着重要的影响。在相同应变速率下, 随着变

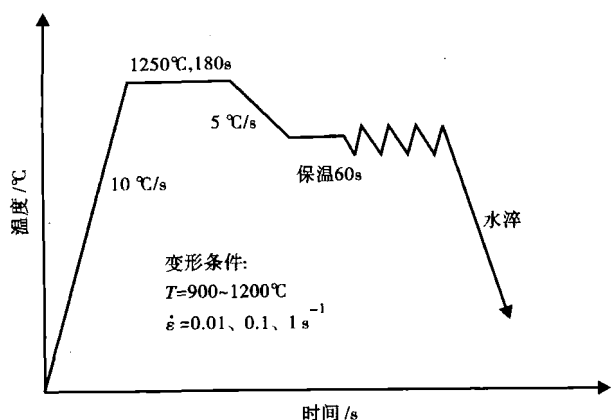


图 1 321 钢高温压缩实验示意图

Fig. 1 Schematic of compression test at high temperature for steel 321

程,对加工硬化抵消作用及软化作用逐渐增强,因此,合金的流变应力逐渐降低;在相同变形温度条件下,随着应变速率的增加,应力逐渐增大。这是由于合金的软化需要一个时间过程,应变速率高,合金软化就不充分,流变应力就大。

由图 2 还可以看出,在应变速率为 0.1 s^{-1} 的条件下,温度为 $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,真应力-真应变曲线表现为加工硬化型,即动态软化作用不足以抵消热加工硬化作用,随着应变量的增加,应力也不断增加;变形温度为 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上,随着应变量的增加,应力先是不断增加,然后趋于稳定,真应力-真应变曲线表现为动态回复型。因此,在应变速率相同的条件下,变形温度越高,软化作用就越强。

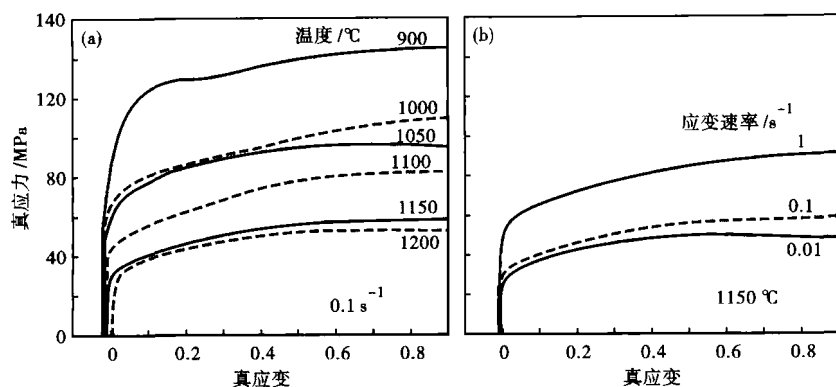


图 2 321 钢高温压缩真应力-真应变曲线:(a) 0.1 s^{-1} ; (b) $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of compression test at high temperature for steel 321: (a) 0.1 s^{-1} ; (b) $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$

在变形温度为 $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,应变速率为 1 s^{-1} 时,真应力-真应变曲线表现为加工硬化型;应变速率为 0.1 s^{-1} 时,真应力-真应变曲线表现为动态回复型;应变速率为 0.01 s^{-1} 时,真应力-真应变曲线表现为动态再结晶型。因此,在变形温度相同的条件下,应变速率越低,动态再结晶就越容易发生。

从真应力-真应变曲线上来看,321 不锈钢在热变形条件下的真应力-真应变曲线一般没有明显的应力峰值出现。即便应变速率很低(如为 0.1 s^{-1}),变形温度较高(如为 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$),其真应力-真应变曲线仍然不是动态再结晶型。

图 3 为 321 不锈钢在应变速率为 0.1 s^{-1} 时不同温度下高温热压缩后的组织。从图 3 可以看出,

随着变形温度的升高,流变应力下降,这是因为变形温度升高,热激活作用增强,原子动能增大,原子间结合力减弱,位错滑移的临界切应力下降,变形的过程中出现的动态回复、动态多边化、动态再结晶等软化过

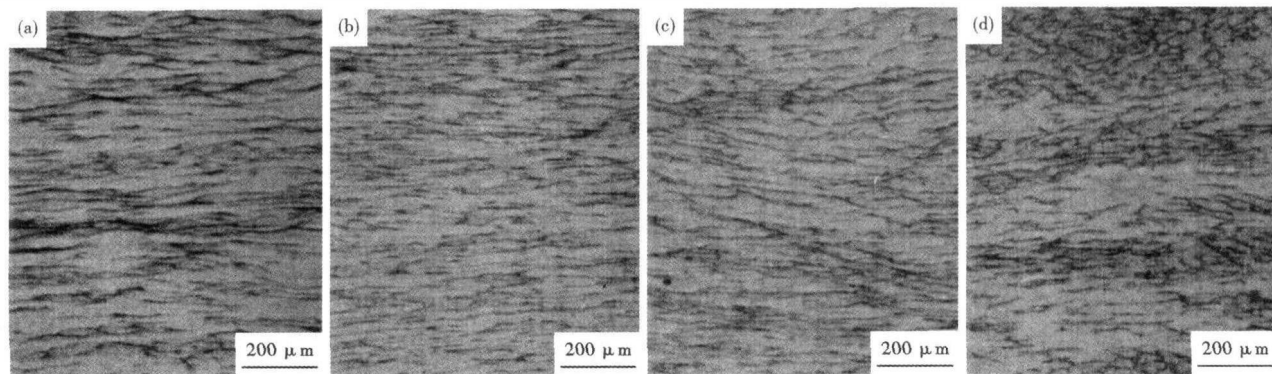


图 3 321 钢热压缩后的组织:(a) $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 0.1 s^{-1}

Fig. 3 Morphology of structure of steel 321 after hot compression at $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (a), $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (b), $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) and $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (d), strain rate 0.1 s^{-1}

在变形温度为 900 °C 和 1 100 °C 时,显微组织以变形晶粒为主,变形大晶粒沿垂直于压缩轴的方向被严重压扁。从高温热变形组织上来说,此应变速率条件下,变形温度在 1 100 °C 以下,基本上没有动态再结晶的发生。而当变形温度升高到 1 150 °C 时,在原奥氏体晶界上开始出现少量细小的动态再结晶晶粒,这标志着在此温度下动态再结晶的发生。当变形温度升高到 1 200 °C 时,再结晶晶粒明显增多,并且尺寸变大,但动态再结晶仍然只是部分发生,其显微组织由变形大晶粒和部分动态再结晶晶粒组成。在应变速率为 0.01、1 s⁻¹ 的条件下,动态再结晶开始发生的温度分别为 1 050 °C 和 1 150 °C。

321 不锈钢高温热压缩的真应力-真应变曲线所反映的规律和其组织所反映的规律其实是一致的。在应变速率为 0.1 s⁻¹ 的条件下,在各温度下真应力-真应变曲线均没有出现明显的峰值,而反映在组织上,各变形条件下的组织主要为变形晶粒或变形晶粒 + 部分再结晶晶粒,没有出现完全由再结晶晶粒组成的组织。

2.2 321 不锈钢动态再结晶激活能

动态再结晶是由热激活能控制的过程,与 Z 参数有关, Z 可表示为应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 T 的各种组合,因为 Z 参数结合了热加工过程中的温度、应变速率等参数,因此常用来表征热处理特征,反映热加工状态^[1]。 Z 表示为^[1]:

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

321 不锈钢真应力-真应变曲线的峰值应力 σ (或稳态应力)与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、变形温度 T 之间又符合以下热变形方程^[2-5]:

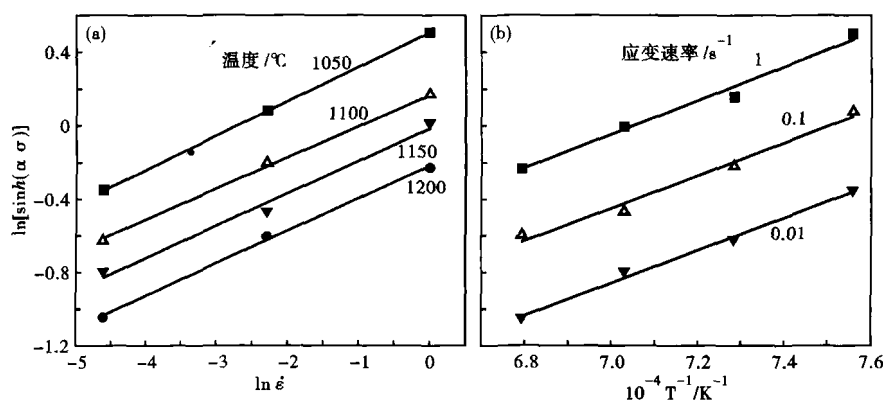


图4 321 钢热变形过程 $\ln \dot{\epsilon}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (a) 以及 $10^{-4}T^{-1}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (b) 的关系曲线

Fig.4 Relation between $\ln \dot{\epsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (a) and $10^{-4}T^{-1}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (b) for steel 321 during hot deformation process

$$\dot{\epsilon} = A \sinh(\alpha\sigma)^n \exp[-Q_{\text{def}}/(RT)] \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, A 、 α - 与材料有关的常数; n -加工硬化指数; Q_{def} - 变形激活能/(J · mol⁻¹); R - 普适气体常数/[J · (mol · K)⁻¹]; Z - Zener-Hollomon 参数。其中,对 321 不锈钢, $\alpha = 0.010064$ ^[6]。

结合上述两式,可得:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp[Q_{\text{def}}/(RT)] = A \sinh(\alpha\sigma)^n \quad (3)$$

经转化可得:

$$\ln \dot{\epsilon} + Q_{\text{def}}/(RT) = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (4)$$

由式(4)可知, $\ln \dot{\epsilon}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 呈线性关系, $Q_{\text{def}}/(RT)$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 也呈线性关系。如果将不同条件下单道次压缩时试样的峰值应力 σ 随应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的变化情况代入式(4),并进行线性拟合,则可求出加工硬化指数 n ;如果将不同条件下单道次压缩时试样的峰值应力 σ 随变形温度 T 的变化情况代入式(4),并进行线性拟合,则可求出 $Q_{\text{def}}/(Rn)$,由于 n 值已经确定,故可进一步求出热变形激活能 Q_{def} 。

图4(a)反映了 $\ln \dot{\epsilon}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系,根据线性拟合结果,可得加工硬化率 $n = 5.63$ 。图4(b)反映了 $10^{-4}T^{-1}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系,根据线性拟合结果,可得热变形激活能 $Q_{\text{def}} = 422.72$ kJ/mol。故可得动态再结晶的数学模型:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp[422.720/(RT)] \quad (5)$$

2.3 321 不锈钢动态再结晶发生的条件

动态再结晶只有在一定条件下才能发生。金属材料在热变形过程中能否发生动态再结晶取决于 Z

和变形量 ϵ 。当 Z 一定时,随着变形量的增大,材料组织发生由加工硬化→动态回复→部分再结晶→完全再结晶的变化;反之,当 ϵ 一定时,随着 Z 值的变大,材料组织由完全动态再结晶→部分动态再结晶→动态回复。假定临界应变 ϵ_c 是发生动态再结晶所需的最小应变。 ϵ_c 与峰值应变 ϵ_p 的关系如下^[7]:

$$\epsilon_c = B \epsilon_p \quad (6)$$

式中: B - 常数。

各个变形温度和应变速率下的动态再结晶临界应变量和峰值应变量的值可由加工硬化率 θ ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$) 与真应力 σ 之间的关系曲线确定, 该曲线最初的拐点是动态再结晶临界应力点, $\theta = 0$ 的点为动态再结晶峰值应力点。通过拟合可得对 321 不锈钢, 有:

$$\varepsilon_c = 0.622\varepsilon_p \tag{7}$$

对于金属材料, 峰值应变 ε_p 与应变速率和变形温度有关, 它们的关系如下:

$$\varepsilon_p = CZ^m \tag{8}$$

式中: C 、 m - 与材料有关的常数。上式两边取自然对数得:

$$\ln\varepsilon_p = \ln C + m\ln Z \tag{9}$$

这说明 $\ln\varepsilon_p$ 与 $\ln Z$ 呈线性关系, 代入试验数据并进行线性拟合, 可求得 $m = 0.06604$, $C = 0.05735$ 。故可得出临界应变 ε_c 与应变速率和变形温度的关系如下:

$$\varepsilon_c = 0.03567Z^{0.06604} \tag{10}$$

因此, 要发生动态再结晶, 应变 ε 必须满足:

$$\varepsilon \geq 0.03567Z^{0.06604} \tag{11}$$

3 结论

(1) 应变速率和变形温度对 321 不锈钢高温热变形行为有着重要的影响。变形温度越高、应变速率越低, 321 不锈钢高温热压缩的软化作用就越强。

(2) 在变形结束后立即水冷的条件下, 321 不锈钢在应变速率为 0.01、0.1、1 s⁻¹ 的热变形条件下, 动态再结晶开始发生的温度分别为 1050、1150、1150 ℃, 但 321 不锈钢在热变形过程中很难发生完

全动态再结晶, 即使热变形温度为 1200 ℃, 仍然只能发生部分动态再结晶。其高温热压缩真应力-真应变曲线一般没有明显的峰值出现。

(3) 利用热模拟实验对 321 不锈钢高温热变形进行研究, 并回归出 321 不锈钢热变形激活能和动态再结晶数学模型, 即:

$$Q = 422.72 \text{ kJ/mol}$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[422720/(RT)]$$

(4) 利用热模拟实验方法对 321 不锈钢高温热变形进行研究, 并拟合出 321 不锈钢动态再结晶发生条件的数学模型:

$$\varepsilon \geq \varepsilon_c = 0.03567Z^{0.06604}$$

参考文献

- 1 王有铭, 李曼云, 韦光. 钢材的控制轧制与控制冷却[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- 2 Srinivasan N, Prasad Y V R K. Hot Working Characteristics of Nimonic 75, 80A and 90 Superalloys: a Comparison Using Processing Maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51: 171-192.
- 3 Salvatori, Inoue K T, Nagai. Ultrafine Grain Structure Through Dynamic Recrystallization for Type 304 Stainless Steel[J]. ISIJ International, 2002, 42(7): 744-750.
- 4 Poliak E I, Jonas J J. Critical Strain for Dynamic Recrystallization Invariable Strain Rate Hot Deformation[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 692-700.
- 5 李红. AISI347 不锈钢热加工特性的实验和数值模拟研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2007.
- 6 李亚萍. 321 不锈钢高温热变形特性及其热加工图[D]. 北京: 北京科技大学, 2011.
- 7 Sun W P, Hawbolt E B. Comparison Between Static and Meta Dynamic Recrystallization-An Application to the Hot Rolling of Steels[J]. ISIJ International, 1997, 37(1): 1000-1007.

胡伟华(1986-), 男, 硕士研究生, 不锈钢的产品开发及工艺控制研究。E-mail: huweihua121@sina.com

收稿日期: 2012-05-23

下 期 要 目

宽规格板坯连铸结晶器浸入式水口的数值模拟	舒宏富等
130 t 单嘴精炼炉真空室内覆盖脱硫渣的钢液流场数值模拟	芮其宣等
硅还原钨酸钙固相反应实验研究	刘吉刚等
250 ~ 320 mm 连铸板坯堆垛缓冷过程仿真计算	王卫华等
汽车用第 3 代先进高强度钢的研发进展	张志勤等
高温渗碳齿轮钢的研究进展	杨延辉等
高品质 GCr15 轴承钢 80 t 转炉-钢包炉精炼渣的研究	刘发友等
100 t EAF-LF-RH-CC 流程生产洁净管线钢的工艺实践	武守防等
VOD 不锈钢水的初始温度对精炼效果的影响	安杰等