

理论与试验研究

Inconel 625 合金高速热变形动态再结晶的临界条件

陶琳, 程明, 宋广胜, 张士宏

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: 通过等温热压缩试验获得 Inconel 625 合金在变形温度为 1 000~1 200 °C, 应变速率为 1~80 s⁻¹ 条件下的真应力-应变曲线, 利用加工硬化率, 结合 $\ln \theta \epsilon$ 曲线上的拐点判据及 $-\partial(\ln \theta)/\partial \epsilon$ 曲线上的最小值, 来研究 Inconel 625 合金动态再结晶的临界条件。结果表明, 在本实验条件下, Inconel 625 合金的 $\ln \theta \epsilon$ 曲线均出现拐点特征, 对应的 $-\partial(\ln \theta)/\partial \epsilon$ 曲线出现最小值, 该最小值处对应的应变即为临界应变; 临界应变随应变速率的增大和变形温度的降低而增加, 并且临界应变和峰值应变之间有一定的关系, 即 $\epsilon_c = 0.69\epsilon_p$; 动态再结晶时临界应变的预测模型可以表示为 $\epsilon_c = 4.41 \times 10^{-4} Z^{0.14261}$ 。

关键词: Inconel 625 合金; 加工硬化率; 动态再结晶; 临界应变

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)02-0001-05

Critical Conditions of Dynamic Recrystallization during High Speed Hot Deformation of Inconel 625 Alloy

TAO Lin, CHENG Ming, SONG Guang-sheng, ZHANG Shi-hong

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Hot compression tests of Inconel 625 alloy were conducted at deformation temperature range of 1 000~1 200 °C and strain rates of 1~80 s⁻¹ to obtain true stress-true strain curves. The critical conditions of dynamic recrystallization for Inconel 625 alloy were studied by using the work hardening rate θ , combined with the inflection point criterion of $\ln \theta \epsilon$ curves and the minimum value of $-\partial(\ln \theta)/\partial \epsilon$ curves. The results indicate that the $\ln \theta \epsilon$ curve of Inconel 625 alloy presents the inflection point, and a minimum value of $-\partial(\ln \theta)/\partial \epsilon$ curve appears, which means the critical strain ϵ_c . The critical strain increases with the strain rate increasing and the temperature decreasing. And there is a relationship between the critical strain ϵ_c and peak strain ϵ_p , i. e. $\epsilon_c = 0.69\epsilon_p$. The predicting model of critical strain is described as $\epsilon_c = 4.41 \times 10^{-4} Z^{0.14261}$.

Key words: Inconel 625 alloy; work hardening rate; dynamic recrystallization; critical strain

Inconel 625 是以 Mo, Nb 为主要强化元素的固溶强化镍基变形合金, 在 650 °C 以下有良好的持久性能、疲劳性能、抗氧化和抗腐蚀性能, 从低温到 1 095 °C 温度范围内都具有良好的强度和韧性, 可

采用冷加工提高合金的强度, 合金能抗氯离子应力腐蚀, 可用于制造喷气发动机部件、航宇结构部件和化工设备^[1]。

金属材料在热变形过程当中, 随变形量的增加,

收稿日期: 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金钢铁联合基金重点项目资助(50834008)

作者简介: 陶琳(1986—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为金属塑性成形。

一方面材料内部产生大量位错,出现加工硬化现象;另一方面变形同时也产生抵消加工硬化的软化过程,包括动态回复和动态再结晶过程^[2]。不同的材料在热变形过程中可能发生的软化机制是不同的。研究表明^[3-5],Inconel 625 合金在变形过程中发生了动态再结晶。动态再结晶是材料热变形过程中非常重要的微观组织演化过程,准确找到材料发生动态再结晶时的临界应变是建立临界应变预测模型的关键。通常认为,动态再结晶在应变未达到峰值应力对应的应变 ϵ_p 时就已经发生^[6]。

确定材料动态再结晶发生时的临界条件,目前采用最广泛的是 Sellars 模型,即: $\epsilon_c = (0.6 \sim 0.85) \epsilon_p$,但是通过这种方法获得的临界应变只是一个较宽的范围。Poliak 和 Jonas^[7]提出了基于热力学不可逆原理的动力学临界条件,认为临界条件与 $-\partial\theta/\partial\sigma\sigma$ 曲线上的最小值以及 $\theta\sigma$ 或者 $\ln\theta-\epsilon$ 曲线上的拐点相对应。 θ 是材料加工硬化率,且 $\theta = d\sigma/d\epsilon$, θ 是表征流动应力随应变变化快慢的一个变量。Stewart^[8]研究了 304 不锈钢在不同温度和应变速率下的热变形行为,认为加工硬化率的变化对临界应变和峰值应变有影响;Gottstein^[9]利用 $\theta\sigma$ 曲线

研究了奥氏体钢 800H 的动态再结晶变化情况;黄光杰^[10]采用单参数方法,建立起 AZ31 镁合金初始动态再结晶的临界条件,即临界应变 ϵ_c 与变形条件的定量关系。

文中通过热压缩试验获得的应力-应变曲线数据绘制加工硬化率曲线图,并采用 $\ln\theta-\epsilon$ 曲线上的拐点判据及 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon-\epsilon$ 曲线上的最小值,确定动态再结晶临界应变。

1 实验材料及方法

实验材料为锻态 Inconel 625 合金饼料,其化学成分见表 1。将合金在 1 150 °C 保温 8 h 均匀化处理后,机加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱试样,利用 Gleeble-3500 热模拟实验机在预设的变形温度和应变速率下进行恒温、恒应变速率压缩实验。实验温度分别为 1 000, 1 050, 1 100, 1 150, 1 200 °C,应变速率分别为 1, 10, 50, 70, 80 s^{-1} 。升温速率为 5 °C/s,到达预设温度后保温 3 min 开始变形。热压缩完成后立即水冷到室温,以保留变形组织。

表 1 实验用材料 Inconel 625 合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of Inconel 625 alloy

Cr	Mo	Nb	Fe	Si	C	Al	Ti	Mn	S	P	Co	Ni
21.3	8.58	3.73	0.11	0.09	0.053	0.18	0.16	0.04	0.001	0.004	0.025	含量

2 实验结果及分析

2.1 应力-应变曲线

Inconel 625 合金在不同应变速率及变形温度下的真应力-应变曲线如图 1 所示。变形开始时,加工硬化非常明显,应力随应变的增加急剧升高到峰值应力,此后由于动态再结晶软化作用增强,应力随应变的增加缓慢下降^[11]。从图 1 中可以看出,峰值应力随变形温度的降低和应变速率的升高而升高,低的应变速率给予动态再结晶晶粒足够的时间形核,高的温度则使晶界扩散速率增加,从而使动态再结晶更充分。变形温度一定时,低应变速率下,如 1 s^{-1} 和 10 s^{-1} 时,曲线比较光滑;而在应变速率为 50 ~ 80 s^{-1} 时,曲线波动较大。这是由于应变速率较大时,动态再结晶没有足够的时间充分进行,表现出硬化与软化作用的交替进行。

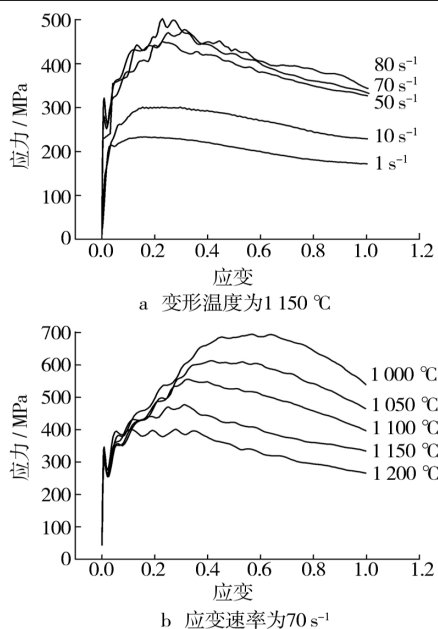


图 1 Inconel 625 合金的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of Inconel 625 alloy

2.2 利用加工硬化率分析临界应变

材料的应力-应变曲线出现峰值意味着材料内部发生了动态再结晶,但是应力-应变曲线并不能直观地反映材料变形何时发生动态再结晶,需要由材料的应力-应变曲线获得加工硬化率曲线,通过加工硬化率 θ 来预测动态再结晶发生的临界应变。Poliaik 和 Jonas^[12] 认为材料发生动态再结晶时, θ - σ 曲线出现拐点,即 $-\partial^2\theta/\partial\sigma=0$,利用偏导数关系可以推导出如下关系: $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon=\partial\theta/\partial\sigma$,说明不仅 θ - σ 曲线有拐点特征, $\ln\theta$ - ϵ 曲线也必然出现拐点特征。这样,根据 Inconel 625 合金热压缩试验获得应力-应变曲线绘制 $\ln\theta$ - ϵ 及 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 曲线图,再采用 $-\partial^2(\ln\theta)/\partial\epsilon=0$ 判据,即可直接得到相应的动态再结晶临界应变 ϵ_c 。

Inconel 625 合金在变形温度为 1 150 °C、应变速率为 70 s⁻¹ 时的应力-应变曲线如图 2 所示。首先对曲线进行拟合,得到拟合方程,再对拟合方程进

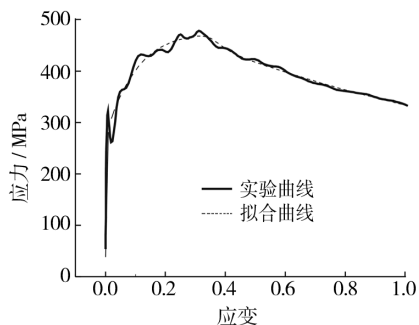


图2 变形温度为 1 150 °C,应变速率为 70 s⁻¹ 时的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of Inconel 625 alloy at temperature of 1 150 °C and strain rate of 70 s⁻¹

行求导,得到各应变条件下的斜率,绘制 $\ln\theta$ - ϵ 曲线,确定临界条件。

对如图 2 所示的应力-应变曲线进行拟合,得到拟合方程:

$$\sigma = (-0.006\ 08 + 53.914\ 41\epsilon + 77.260\ 13\epsilon^2 - 803.315\ 44\epsilon^3 - 1\ 396.911\ 55\epsilon^4 + 5\ 917.833\ 24\epsilon^5) / (0.000\ 17 + 0.181\ 9\epsilon - 0.597\ 05\epsilon^2 + 1.444\ 81\epsilon^3 - 8.028\ 42\epsilon^4 + 12.427\ 77\epsilon^5 + 6.092\ 52\epsilon^6) \quad (1)$$

根据拟合方程(1)及 $\partial\sigma/\partial\epsilon \approx \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ 关系得到 $\ln\theta$ - ϵ 曲线,如图 3 所示。

为了确定拐点的位置,对曲线进行拟合,拟合方

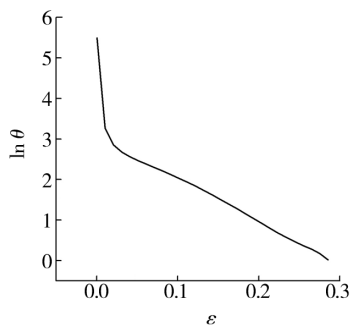


图3 在变形温度为 1 150 °C,应变速率为 70 s⁻¹ 时 $\ln\theta$ 与应变 ϵ 之间的关系

Fig. 3 Relationship between $\ln\theta$ and ϵ at temperature of 1 150 °C and strain rate of 70 s⁻¹

程为:

$$\ln\theta = 4.182\ 87 - 45.236\ 07\epsilon + 200.040\ 27\epsilon^2 - 344.244\ 14\epsilon^3 \quad (2)$$

对方程(2)进行求导得到:

$$-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon = 45.236\ 07 - 400.080\ 54\epsilon + 1\ 032.732\ 42\epsilon^2 \quad (3)$$

根据方程(3)绘制 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 关系曲线,如图 4 所示。当 $-\partial^2(\ln\theta)/\partial\epsilon=0$ 时对应的应变即为临界应变, $\epsilon_c=0.193\ 7$ 。

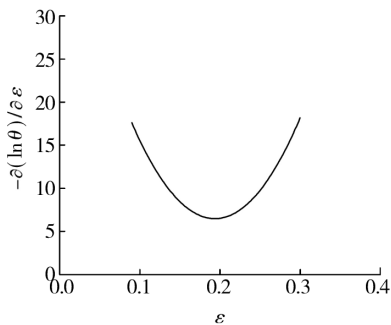


图4 在变形温度为 1 150 °C,应变速率为 70 s⁻¹ 时 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 与应变 ϵ 之间的关系

Fig. 4 Relationship between $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ and ϵ at temperature of 1 150 °C and strain rate of 70 s⁻¹

2.3 临界条件的确定

采用以上相同的方法,绘制其它热变形条件下的 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 曲线,如图 5 和图 6 所示。可以看出,所有曲线均具有最小值,最小值处对应的应变即为动态再结晶的临界应变。

应变速率对合金动态再结晶临界应变的影响规律如图 7 所示。由图 7 可以看出,随应变速率的增

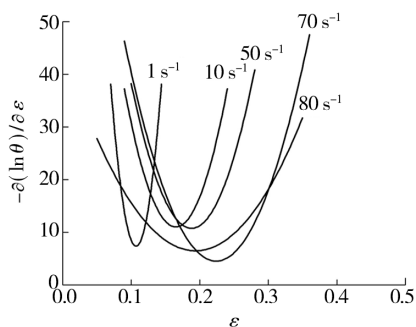


图5 变形温度为 1150 °C 时不同应变速率下 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 与应变 ϵ 之间的关系

Fig. 5 Relationship between $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ and ϵ at temperature of 1150 °C and different strain rates

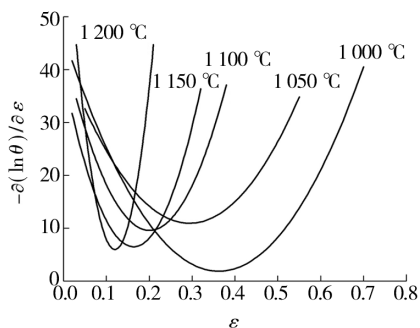


图6 应变速率为 70 s^{-1} 时不同变形温度下 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 与应变 ϵ 之间的关系

Fig. 6 Relationship between $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ and ϵ at strain rate of 70 s^{-1} and different temperatures

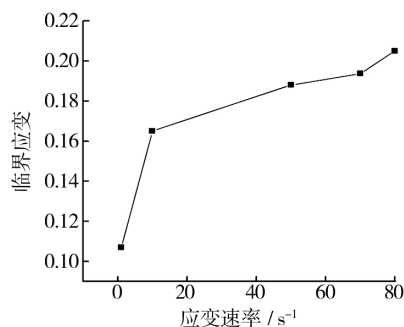


图7 变形温度为 1150 °C 时应变速率对临界应变的影响

Fig. 7 Effect of strain rate on critical strain at temperature of 1150 °C

加,临界应变相应提高^[13]。这是由于应变速率较小时,变形晶粒内部产生的位错有足够的时间迁移合并,这时变形至较小应变时就能发生动态再结晶。应变速率增大时,位错没有足够的时间迁移,这时就需要更大的变形量提高位错密度,从而临界应变增

大。

变形温度对合金动态再结晶的临界应变的影响规律如图8所示。由图8可以看出,升高变形温度,

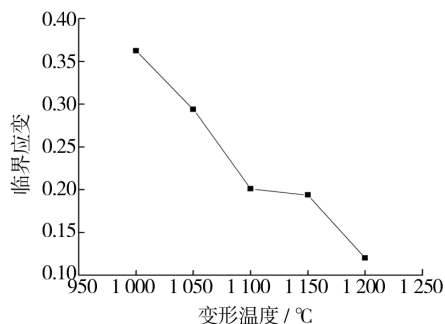


图8 应变速率为 70 s^{-1} 时变形温度对临界应变的影响

Fig. 8 Effect of temperature on critical strain at strain rate of 70 s^{-1}

临界应变相应地降低^[13]。这是由于升高变形温度,有利于位错的迁移,在较小的变形量时就能发生动态再结晶。

2.4 临界应变预测模型

目前使用最广泛的是 Sellars^[14] 模型,即:

$$\epsilon_c = aZ^b \quad (4)$$

式中: a, b 均为常数; Z 为 Zener-Hollomon^[15] 参数,

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{RT}, \text{ 其中 } Q \text{ 为热变形激活能。} \quad (5)$$

为了确定材料的激活能,先对 Zener-Hollomon 参数两边取对数,然后对实验数据进行多元线性回归处理,即按照 $Q = Rn \left[\frac{\partial \ln \sinh(\alpha\sigma)}{\partial \ln(1/T)} \right]$ 计算出 Inconel 625 合金高温高速热变形时的热激活能为 442.97 kJ/mol。

根据所得到的各临界应变值及相对应的 Z 值,绘制 $\ln\epsilon_c$ 和 $\ln Z$ 的关系曲线,如图9所示,可见 $\ln\epsilon_c$ 和 $\ln Z$ 之间有良好的线性关系,对其进行线性拟合,得到拟合方程:

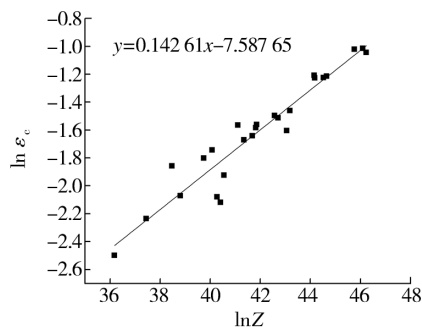
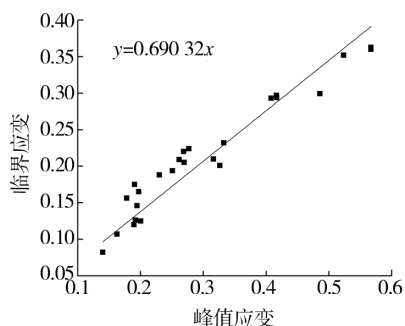
$$\ln\epsilon_c = 0.1426 \ln Z - 7.58765 \quad (6)$$

也即临界应变预测模型可以表示为:

$$\epsilon_c = 4.41 \times 10^{-4} Z^{0.143} \quad (7)$$

临界应变 ϵ_c 和峰值应变 ϵ_p 的关系曲线如图10所示,二者也呈现较好的线性关系,进一步对其进行线性拟合,可知临界应变与峰值应变之间的关系是:

$$\epsilon_c = 0.69\epsilon_p \quad (8)$$

图9 $\ln \epsilon_c$ 和 $\ln Z$ 的关系曲线Fig. 9 Relationship between $\ln \epsilon_c$ and $\ln Z$ 图10 临界应变 ϵ_c 与峰值应变 ϵ_p 的关系Fig. 10 Relationship between ϵ_c and ϵ_p

3 结语

1) Inconel 625 合金在热变形过程中发生动态再结晶, 动态再结晶的临界应变随应变速率的增大和变形温度的降低而增加, 并且临界应变和峰值应变之间有一定的关系, 即 $\epsilon_c = 0.69\epsilon_p$ 。

2) Inconel 625 合金在高温高速条件下的热变形, 发生动态再结晶时的临界应变的预测模型可以表示为 $\epsilon_c = 4.41 \times 10^{-4} Z^{0.143}$ 。

参考文献:

- [1] 冶军. 美国镍基高温合金[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 228.
- [2] 姜科, 孙圣洁. 动态再结晶临界判据和机理的研究[J]. 有色金属加工, 2009, 38(6): 19-27.

- [3] 闫士彩, 程明, 张士宏, 等. Inconel 625 合金的高温高速热变形行为[J]. 材料研究学报, 2010, 24(3): 239-244.
- [4] 郭青苗, 李德富, 郭胜利, 等. GH625 合金热变形过程的动态再结晶行为研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 51-56.
- [5] 刘志超, 周海涛, 李庆波, 等. GH625 合金的热变形行为[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(12): 31-35.
- [6] 欧阳德来, 鲁世强, 崔霞, 等. 应用加工硬化率研究 TA15 钛合金 β 区变形的动态再结晶临界条件[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 17-23.
- [7] POLIAK E I, JONAS J J. A One-parameter Approach to Determining the Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization[J]. Acta Materials, 1996, 44(1): 127-136.
- [8] STEWART G R, JONAS J J, MONTHEILLET F. Kinetics and Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization in 304 Stainless Steel[J]. ISIJ International, 2004, 44(9): 1581-1589.
- [9] GOTTSTEIN G, FROMMERT M, GOERDELER M, et al. Prediction of the Critical Conditions for Dynamic Recrystallization in the Austenitic Steel 800H [J]. Materials Science and Engineering, 2004, 387-389: 604-608.
- [10] 黄光杰, 钱宝华, 汪凌云, 等. AZ31 镁合金初始动态再结晶的临界条件研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(12): 2080-2083.
- [11] 刘伟, 唐远永. 依据热流变曲线研究材料在热形变过程中显微组织的变化[J]. 中南矿冶学院学报, 1986(2): 93-110.
- [12] POLIAK E I, JONAS J J. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation[J]. ISIJ International, 2003, 43(5): 684-691.
- [13] 陈振华, 许芳艳, 傅定发, 等. 镁合金的动态再结晶[J]. 化工进展, 2006, 25(2): 140-146.
- [14] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling[J]. Metal Science, 1979, 13(3): 187-194.
- [15] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 15(1): 22-26.