

316LN 高温热变形行为与热加工图研究

孙朝阳, 李亚民, 祥雨, 杨竞

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 通过 Gleeble 热模拟实验机在 1000~1200 °C, 应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 条件下的近等温热模拟压缩实验, 建立了 316LN 双曲正弦的流动应力预测模型及其热加工图。该流动应力预测模型考虑了实验过程中塑性变形和摩擦引起的温升, 对流动应力进行了修正, 考虑应变对流动应力预测模型参数的影响, 获得了统一流动应力预测模型, 模型预测值与实验值的相关系数为 0.992, 平均相对误差为 4.43%; 热加工图基于 Prasad 动态材料模型分别获得了不同应变速率、温度条件下的能量耗散率和失稳系数; 分析了应变率、温度和应变速率对于能量耗散率和失稳系数的影响。结果表明: 实验条件下最大能量耗散率值为 0.38, 且高应变速率下失稳, 并通过显微组织分析对热加工图进行了验证。

关键词: 316LN 不锈钢; 本构模型; 热加工图; 热变形行为

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)03-0688-08

316LN 不锈钢是一种具有优良耐晶间腐蚀、高温力学性能的奥氏体不锈钢, 被广泛地应用于大型承压部件的耐腐蚀管道中, 也是第 3 代压水堆核电主管道设备的重要材料^[1,2]。目前, 锻造和热挤压工艺是核电主管道的主要加工工艺方法, 而热加工过程变形量、变形速率和温度等因素对于 316LN 锻件的性能影响显著^[3]。因此, 制定合理的锻造及热挤压工艺就需要研究 316LN 高温下变形行为及其热加工性能。

国内外众多学者对 316LN 的热变形行为进行了研究, 潘品李等^[4]研究了 316LN 在 900~1200 °C、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 变形条件下的热加工性能, 建立了动态再结晶模型; 柏永青等^[5]采用温度为 900~1250 °C、应变速率为 0.005, 0.5, 5 s⁻¹ 的压缩实验, 建立了 316LN 的 Arrhenius 型流动应力方程; 张佩佩等^[6]研究了 316LN 在温度为 950~1250 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 的高温变形特征, 并采用 Zener-Hollomon 参数的指数形式描述了 316LN 高温流动应力; 黑志刚等^[3]还研究了温度和应变速率对 316LN 高温性能的影响。上述对于 316LN 热变形行为的研究主要基于压缩实验获得本构行为描述, 往往忽略了实验过程中温升对于流动应力及应变对本构模型材料参数的影响^[4-7]; 或者加工图缺少相应的金相实验验证^[5]。此外, 采用较少应变速率获得的本构关系^[4-6]限制了本构模型及其热加工图的使用范围。

因此, 本研究对 316LN 进行大范围应变速率近等

温热压缩变形实验, 修正温升引起的流动应力变化; 研究流动应力与应变速率、变形温度之间的关系, 同时考虑应变对模型参数的影响, 建立 316LN 热变形条件下的流动应力模型和热加工图, 分析获得较优的热加工条件, 为合理制定 316LN 热加工工艺提供指导。

1 实验

本实验采用的材料为 316LN 锻坯, 其主要化学成分(质量分数, %)为: C 0.017, Si 0.34, Mn 1.29, P 0.020, S 0.001, Cr 17.03, Ni 12.71, Mo 2.53, 实验采用 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 的圆柱试样, 实验设备为 Gleeble-1500D 热模拟实验机。考虑实际热加工过程特点, 先将试样以 10 °C/s 加热到设定的变形温度并保温 180 s 以保证试样温度均匀, 然后对试样以设定的应变速率压缩, 等温压缩结束后立即水冷以保持试样高温变形后的组织。其中变形温度分别为 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 °C; 应变速率分别为 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹; 所有组实验的压下量统一设定为 50%。取典型条件下的压缩后试样进行金相观察, 其中用氯化铜盐酸水溶液(氯化铜 2 g、盐酸 20 mL、水 20 mL)对纵截面进行侵蚀, 利用莱卡 DM4000M 金相显微镜对试样的稳定变形区内^[8]进行金相组织观察。

2 结果与分析

收稿日期: 2015-03-18

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2014ZX04014-51); 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(U1330121); 国家自然科学基金(51105029)

作者简介: 孙朝阳, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083, 电话: 010-62334197, E-mail: suncy@ustb.edu.cn

图1是应变速率分别为0.01、10 s⁻¹时不同温度条件下最大温升值。可以看出, 应变速率为0.01 s⁻¹的温度变化较小而均匀, 应变速率为10 s⁻¹温升明显, 且其最大值随实验温度的升高而减小, 如温度为1000 °C、应变速率为10 s⁻¹条件下的温升最大值为27 °C。这是由于高应变速率下的剧烈变形热和摩擦热迅速增加, 产生大量的热量并聚集, 在短时间内无法通过热交换而散失, 从而使得变形过程中试样温度较预设温度升高明显, 导致实验得到的流动应力较预设温度条件下的真实流动应力偏小。为此, 本工作仅对应变速率为10 s⁻¹的流动应力-应变曲线进行温度修正。其中温升引起的流动应力变化可表示为^[9]:

$$\Delta\sigma = \left[\frac{\partial\sigma}{\partial(1/T)} \right]_{\epsilon} \cdot \left[\frac{1}{T_n + \Delta T} - \frac{1}{T_n} \right] \quad (1)$$

式中, $\Delta\sigma$ 表示温度升高引起的流动应力变化量, MPa; ϵ 表示该组实验的应变; T_n 表示实验预设定的温度, °C; ΔT 表示实验过程中的温度变化量, °C; T 表示实验过程中的温度, °C。

根据式(1)进行温度修正后可得经修正的316LN的流动应力曲线, 如图2d所示。从图2实验获得的流动应力曲线可以看出, 温度和应变速率对流动应力的影响非常大, 表现为流动应力随着温度的升高而减小, 随着应变速率的升高而增大。实验范围内, 材料在应变速率为1和10 s⁻¹表现为明显的动态回复型曲线, 在应变速

率为0.01和0.1 s⁻¹时表现为动态再结晶型曲线^[10]。

3 316LN 的热变形本构关系建立

3.1 热变形本构关系

S. Arrhenius 等^[11]提出一种用于描述变形温度、应变速率等对材料流动应力影响的模型, 研究表明^[12,13]材料在高温变形中任何一个流动应力都取决于温度和应变速率, 都存在由二者主导的应变强化和动态软化的动态平衡。此外, C. M. Sellars 和 W. J. McTegart 等^[14]提出了一种基于 Arrhenius 方程的双曲正弦函数来表示高温塑

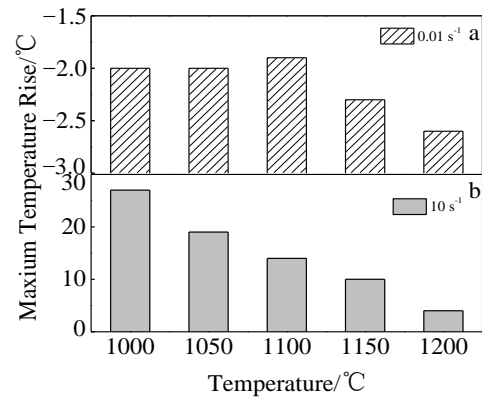


图1 应变速率为0.01和10 s⁻¹的最大温升值

Fig.1 Maximum temperature rise at strain rate 0.01 s⁻¹ (a) and 10 s⁻¹ (b)

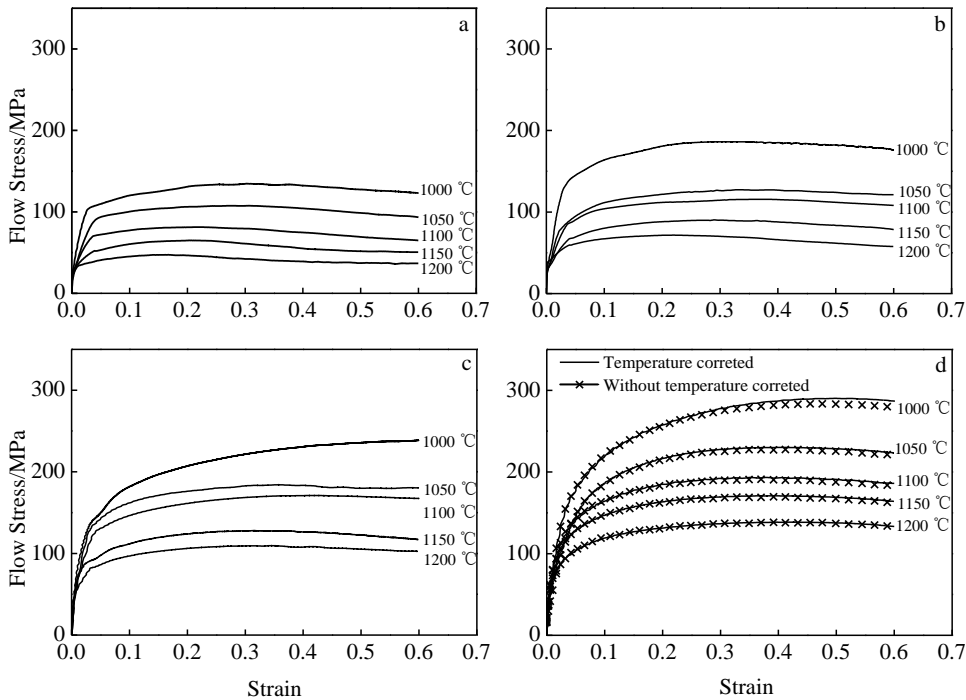


图2 不同应变速率下的流动应力-应变曲线

Fig.2 Flow stress-strain curves of 316LN stainless steel under different strain rates: (a) 0.01 s⁻¹, (b) 0.1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, and (d) 10 s⁻¹

性变形条件下应变速率、流动应力和温度之间的关系:

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 表示应变速率, s^{-1} ; R 为摩尔气体常数, $8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$; Q 为变形激活能, $kJ \cdot mol^{-1}$; σ 为流动应力, MPa; $F(\sigma)$ 是关于应力的表达式; A 为材料常数。

利用该双曲正弦函数能够很好的描述流动应力与变形温度和应变速率之间的关系, 其中 C. Zener 和 H. Hollomon 等^[15]提出温度和应变速率对流动应力的影响可以通过式(3)Z 系数表示, Z 系数是温度补偿的应变速率因子:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

式(2)中, $F(\sigma)$ 是根据不同的应力水平而设定的应力表达式, 分别适用于低应力水平、高应力水平和任意应力水平 3 种情况^[16], 下式为 3 种不同应力水平的表达式:

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n_1} & \alpha\sigma < 0.8 \\ \exp(\beta\sigma) & \alpha\sigma < 1.2 \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^n & \text{for all } \sigma \end{cases} \quad (4)$$

式中 n_1, n, α, β 均为材料常数, 其中 $\alpha = \beta/n_1$ 。

3.2 本构关系材料常数的确定

不同变形条件下近等温压缩实验得到的流动应力-应变数据可以用于确定本构关系中的材料常数, 下面以应变量为 0.1 为例求解本构关系中的材料常数。

将式(4)中的低应力水平和高应力水平 $F(\sigma)$ 分别代入式(2), 取自然对数并移项后可以得到:

$$\ln \sigma = \frac{1}{n_1} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{n_1} \ln A + \frac{Q}{RTn_1} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{\beta} \ln A + \frac{Q}{\beta RT} \quad (6)$$

根据图 3a 中 $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 关系, 对不同条件下所得到的数据进行线性拟合, 得到不同温度下线性直线的斜率值的倒数, 取其平均值后即为 n_1 的值。经计算, $n_1 = 8.875$ 。

同理, 根据图 3b 中和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系, 可以得到 $\beta = 0.079$, 根据 $\alpha = \beta/n_1$, 经计算 $\alpha = 0.0089$ 。

将式(4)中的任意应力水平 $F(\sigma)$ 公式代入式(2), 取自然对数并移项可以得到:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{n} \ln A + \frac{Q}{nRT} \quad (7)$$

根据图 3c 中 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系, 得到不同温度下线性直线的斜率值的倒数, 其平均值即为 n 的值, 经计算 $n = 6.68$; 根据直线与 y 轴截距可以计算一定变量下的 A 值, 经计算应变为 0.1 时, $A = 2.04 \times 10^{19}$ 。

在一定应变速率下对式(7)进行求导, 可以得到:

$$Q = 10000 \cdot nR \frac{\partial \{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\}}{\partial (10000/T)} \quad (8)$$

根据图 3d 中 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $10000/T$ 的拟合直线的

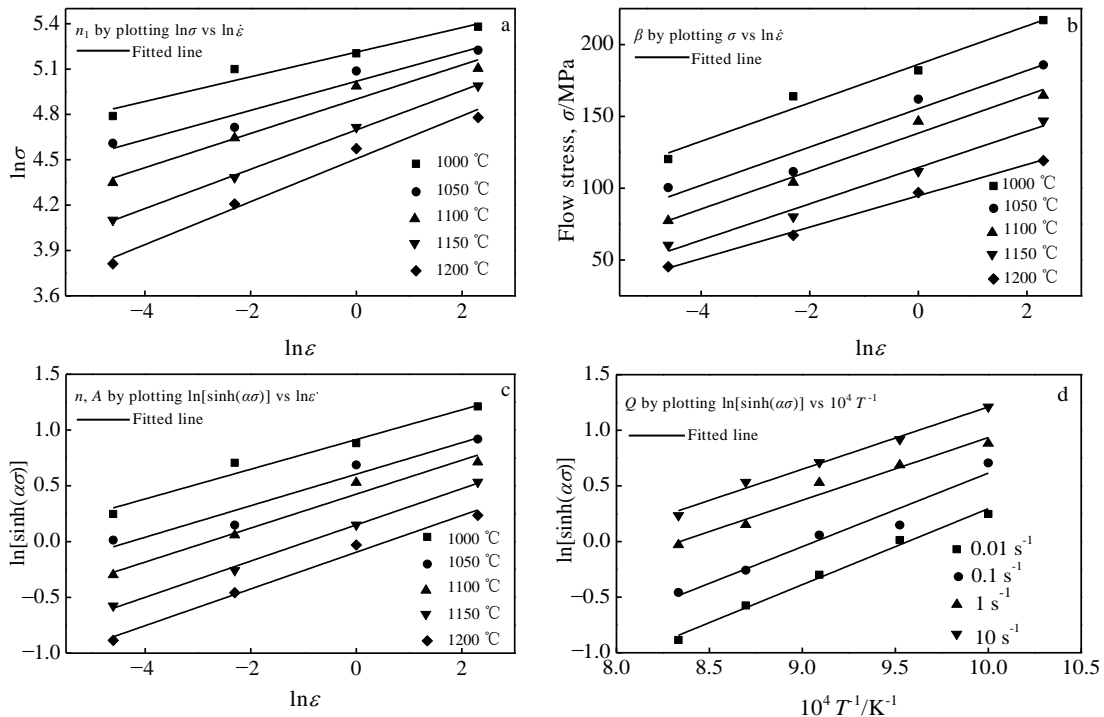


图 3 不同变量之间的线性拟合

Fig.3 Linear fitting between $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ (a), $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ (b), $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ (c), and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - T^{-1}$ (d)

斜率, 得到 316LN 在应变为 0.1 时热激活能 $Q=535.2$ kJ/mol。

将上面所求的各参数代入式(2)中, 即可得到 316LN 的峰值应力本构关系模型:

$$\dot{\epsilon} = \frac{2.04 \times 10^{19} [\sinh(0.0089\sigma)]^{6.68}}{\exp[5.352 \times 10^5 / (RT)]} \quad (9)$$

3.3 应变量的耦合

式(9)所求的峰值应力本构模型中并未考虑到变形过程中应变量变化对于材料参数的影响, 因此导致上述模型值与实验流动应力数据之间存在一定的误差^[17-19]。根据图 2 所示, 考虑应变量对于流动应力的作用, 将不同应变量下 ($\epsilon=0.05\sim 0.6$, 间隔量为 0.05) 计算得到的 $\ln A$, n_1 , α , Q 值, 经分析计算得出材料参数与真实应变存在一定的函数关系。为较精确的研究材料参数与应变量之间的关系, 通过四次多项式回归拟合二者之间的函数关系, 材料参数随应变量之间的变化情况如图 4 所示。其四次多项式拟合参数与应变量的关系如下:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.012 - 0.045\epsilon + 0.177\epsilon^2 - 0.293\epsilon^3 + 0.177\epsilon^4 \\ n &= 9.7 - 42.6\epsilon + 176.3\epsilon^2 - 338.1\epsilon^3 + 233.2\epsilon^4 \\ Q &= 682.8 - 2162.3\epsilon + 9842.4\epsilon^2 - 19071\epsilon^3 + 13044\epsilon^4 \\ \ln A &= 56.9 - 181.3\epsilon + 824.7\epsilon^2 - 1601.1\epsilon^3 + 1097.6\epsilon^4 \end{aligned}$$

确定材料参数随着应变量的关系式之后, 再计算 Z 参数与 σ 的关系, 即可得到在不同应变量下的 σ 值。

由 α , n , Q , A 计算出 Z 值, 再结合式(2)、(3)、(4) 可得到不同应变、不同温度、不同应变速率下的流动应力值^[20], 如式(10)。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

3.4 本构关系的验证

考虑应变速率、变形温度、应变量对于流动应力影响的因素, 利用本研究得到的本构关系, 计算不同实验下的本构关系流动应力预测值, 将本构关系得到的预测值与等温压缩实验得到的流动应力值对比, 如图 5 所示。由图 5 可以看出, 利用四次多项式回归拟合材料参数得到的预测值与实验值吻合良好。

为精确的描述二者的匹配程度, 利用相关系数 R 和平均相对误差 (AARE) 来描述二者的关系^[16]。经计算, 二者相关系数 $R=0.992$, 平均相对误差 $AARE=4.43\%$, 图 6 为本构关系预测流动应力值与实验值的相关性对比。根据图 5 本构关系预测值和图 6 预测值与实验值的相关性可以得知, 利用四次多项式得到的材料参数模型足以满足对本模型精度的要求。

4 316LN 热加工图的建立

4.1 热加工图模型

热加工图是用来描述材料热加工性能优劣的图形,

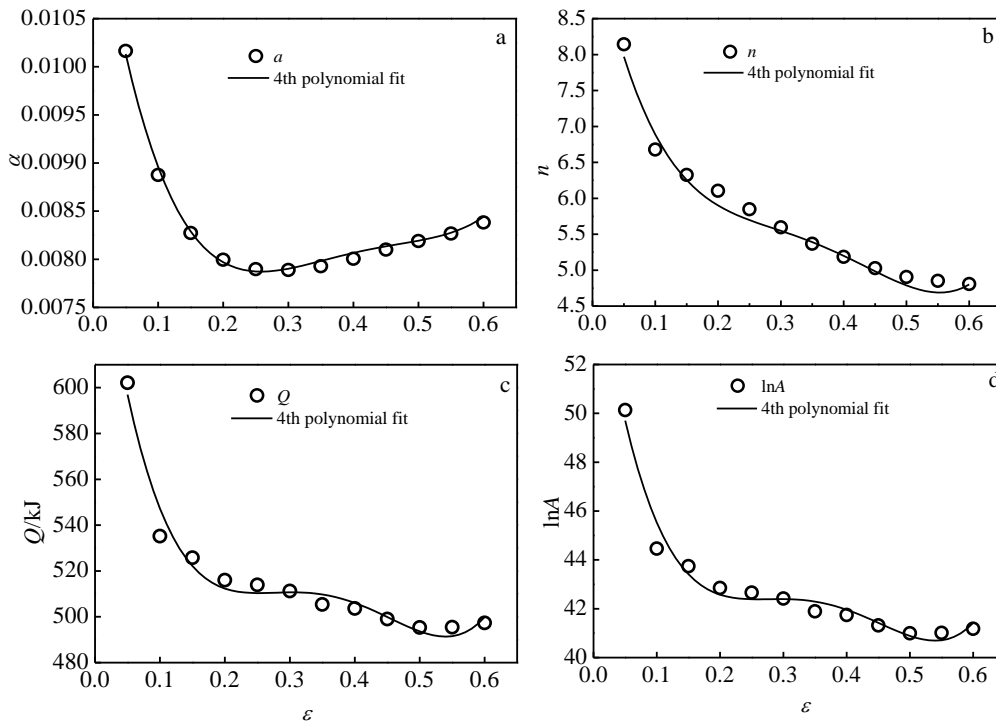


图 4 α , n , Q , $\ln A$ 与应变量的多项式关系

Fig.4 Relationships between strain with material parameters α (a), n (b), Q (c), and $\ln A$ (d)

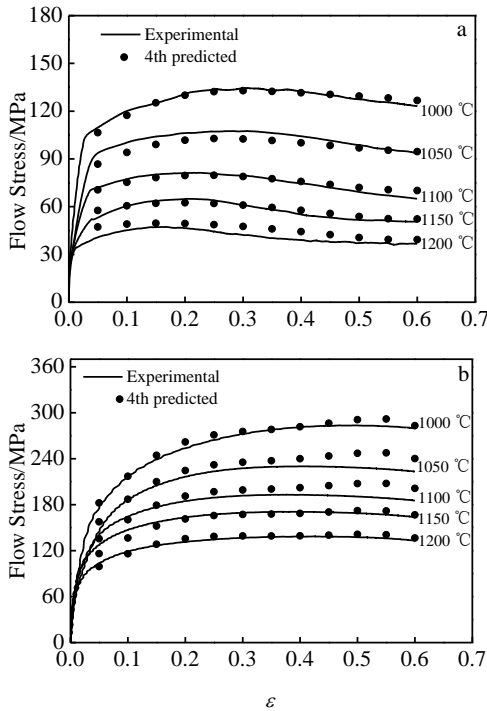


图 5 本构关系预测流动应力值与实验值对比

Fig.5 Comparisons between experimental and calculated flow stress from the constitutive equation at strain rates of 0.01 s⁻¹ (a) and 10 s⁻¹ (b)

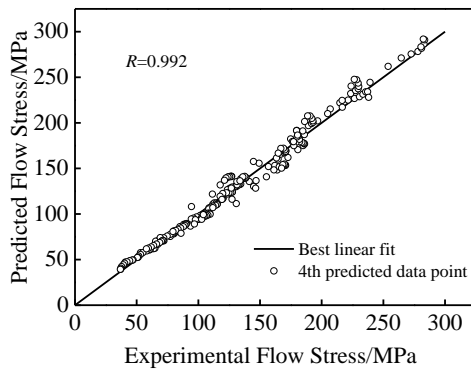


图 6 本构关系模型预测流动应力值与实验值的对比

Fig.6 Correlation between experimental flow stress and 4th polynomial fitting data

主要分为两类^[21]: 一是由 Raj 基于原子模型提出的热加工图; 二是由 Prasad 基于动态材料模型 (Dynamic material model, DMM) 提出的热加工图。基于 DMM 的热加工图在反映微观组织演化机制变形特征的同时还描述了热加工过程中的失稳区域。因此, 其实用性更广^[22], 该热加工图是在应变速率和温度空间中功率耗散图和失稳图的叠加^[18]。

根据动态材料模型^[23], 热加工过程中, 单位体积材料的瞬时吸收功率为流动应力与应变速率的乘积, 而材料能量耗散包括因塑性变形耗散的能量和微观组织演化耗散的能量两部分, 可表示为:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (11)$$

式中, P 表示单位体积材料的瞬时吸收功, J ; G 表示单位体积材料因塑性变形耗散的能量, J ; J 表示单位体积材料微观组织演化耗散的能量, J 。

而应变速率敏感性指数 m 可认为是两部分能量 J 与 G 的分配系数, 即:

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (12)$$

对于非线性耗散过程, 反映了材料由于微观组织变化而消耗的能量与热变形过程中消耗总能量的关系, 可表示为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (13)$$

在应变速率和温度构成的二维图上绘出的等高线图即为耗散图。

对于 Prasad 塑性失稳判据^[23], 其材料变形失稳的条件为:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln [m / (m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (14)$$

在应变速率和温度构成的二维图上绘出 $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$ 的区域即为失稳图。

4.2 热加工图的建立与加工性能分析

本研究以应变量为 0.4 和 0.6 为例计算热加工图。首先利用最小二乘法对 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 关系进行三次多项式拟合得到其关系式, 对所求关系式利用式(12)求出应变速率敏感系数 m , 继而根据式(13)求得能量耗散效率, 在应变速率和温度构成的二维图上绘制出的等高线图, 即: 能量耗散图。通过式(14)在应变速率和温度构成的二维图上绘出失稳图。将加工失稳图叠加在功率耗散图上即为 316LN 的热加工图, 如图 7 所示。

图 7 中所示热加工图等值线上的数字表示能量耗散率值 η , 热加工图安全区域的 η 值越大, 代表材料的热加工性越好^[22]。阴影部分表示加工失稳区域。从图 7 中可以看出, 随着变形温度的升高和应变速率的降低, 能量耗散率 η 逐渐增大; 失稳区变化不大, 处于高应变速率区域中。

随着应变的增加能量耗散率也缓慢的增加。对比图 7a 和图 7b 可以看出, 应变由 0.4 增加到 0.6 时, 最大耗散率值由 0.34 增大到 0.38, 并形成 2 个耗散率峰值区。

图 7a 和图 7b 的热加工图中共有 2 个能量耗散率峰

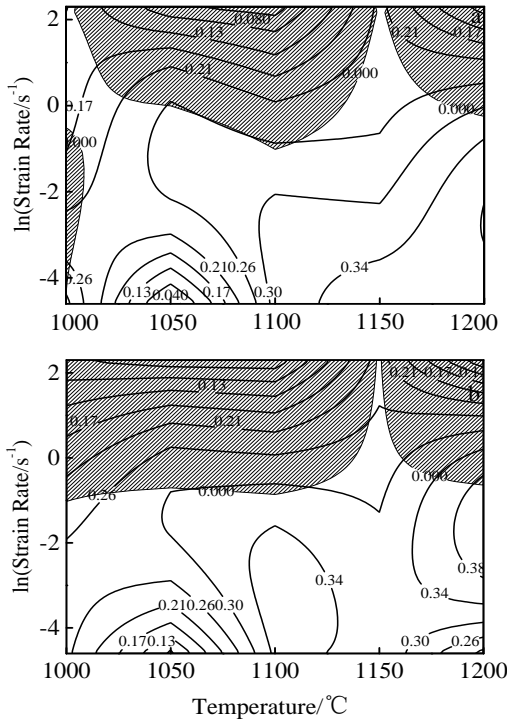


图 7 316LN 在应变为 0.4 和 0.6 时的热加工图

Fig.7 Hot processing maps at the strain of 0.4 (a) and 0.6 (b) for 316LN stainless steel

区: 第 1 个耗散率峰值区是温度范围为 1000~1127 °C, 应变速率为 0.01~0.36 s⁻¹ 之间的区域。对比图 8b 温度

1000 °C、应变速率 0.01 s⁻¹ 的金相组织图和图 8a 原始试样金相图, 可以看出该区域组织已发生部分动态再结晶 (图 8b 中 A 处所示), 是典型的动态再结晶组织; 对比流动应力曲线, 流动应力因动态再结晶下降一定程度后使得硬化与软化作用达到动态平衡而维持稳定, 是典型的动态再结晶型曲线。

第 2 个耗散率峰值区是温度为 1167~1200 °C, 应变速率为 0.36~0.05 s⁻¹ 之间的区域。且该峰值区有最大耗散率 0.38, 对比图 8c 温度 1200 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 的金相组织和图 8a、图 8b 发现, 该区域组织发生完全动态再结晶。其中图 8c 中晶粒尺寸较大, 是受高温下动态再结晶晶粒尺寸较大 (图 8c 中 B 处所示) 和温度较高导致部分晶粒长大 (图 8c 中 C 处所示) 2 个因素共同影响的结果。虽然图 7 加工图中此区域耗散率值较大, 但是该区域金相组织显示部分晶粒过分长大, 并不是最好的热加工区域。可见, 现有热加工图耗散率理论在解释动态再结晶和晶粒长大方面存在不足。

图 7a 和图 7b 的热加工图中共有 2 个失稳区, 都存在于高应变速率区域中。对于高应变速率、高加热温度区域的加工失稳区, 发现其功率耗散效率较低, 说明材料的大部分能量用于塑性变形, 并且主要转化为热能, 导致局部温度升高造成晶界的剪切变形以及组织晶粒的不均匀, 容易造成变形失稳。观测图 8d 中变形温度为 1200 °C、应变速率为 10 s⁻¹ 的金相组织, 从金相组织可以看出, 应变量为 0.6 时的晶粒呈细化状态, 晶粒

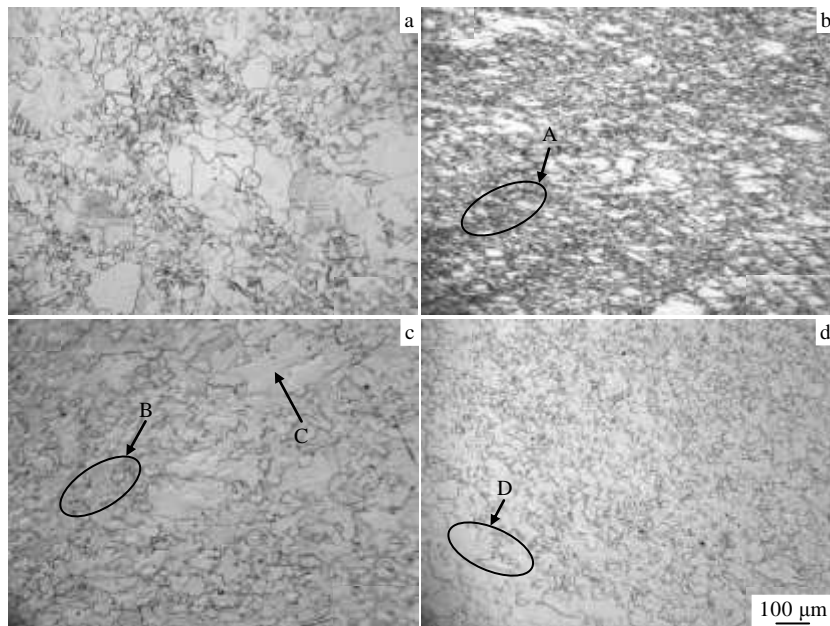


图 8 316LN 的典型热变形条件试样的组织形貌

Fig.8 Microstructures of 316LN stainless steel: (a) initial; (b) 1000 °C, strain rate of 0.01 s⁻¹; (c) 1200 °C, strain rate of 0.1 s⁻¹; (d) 1200 °C, strain rate of 10 s⁻¹

形状不规则,大小也不均匀,部分晶粒边缘呈现剪切状态(图 8d 中 D 处所示),如果应变继续增加则会形成剪切带^[12],热加工时应避开此区域。

5 结 论

1) 基于 316LN 的近等温压缩实验,考虑实验过程塑性变形和摩擦引起的温度升高,修正了高应变速率下的流动应力值;考虑应变对于材料参数的影响,采用修正后的流动应力应变关系建立了基于双曲正弦模型的流动应力预测模型。实验范围内模型预测值与实验值的相关性 $R=0.992$, 平均相对误差为 4.43%。

2) 基于修正后的流动应力应变关系,建立了 316LN 的热加工图,通过金相组织验证了热加工图。热加工图中有 2 个耗散率峰值区,最大耗散率为 0.38;加工失稳区域存在于高应变速率区域,且其范围随应变的增加而增加。

3) 316LN 较优的工艺参数范围温度为 1000~1137 °C、应变速率为 0.1 s^{-1} 之下的区域,在高应变速率下材料会形成绝热剪切带而导致失稳。

参考文献 References

- [1] Song Shukang(宋树康), Liu Zhiying(刘志颖), Zheng Jianneng(郑建能) *et al. Heavy Castings and Forgings*(大型铸锻件)[J], 2011(1): 1
- [2] Zang Mingchang(臧明昌). *Nuclear Science and Engineering* (核科学与工程)[J], 2005, 25 (2): 106
- [3] Hei Zhigang(黑志刚), Duan Xingwang(段兴旺), Liu Jian-sheng(刘建生). *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*(太原科技大学学报)[J], 2012, 33(4): 290
- [4] Pan Pinli(潘品李), Zhong Yuexian(钟约先), Ma Qingxian(马庆贤) *et al. China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2012, 23(11): 1354
- [5] Bai Yongqing(柏永青), Chen Mingming(陈明明), Chen Hui-qin(陈慧琴). *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*(太原科技大学学报)[J], 2009, 30(5): 424.
- [6] Zhang Peipei(张佩佩), Sui Dashan(隋大山), Qi Ke(齐珂) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2014, 21(1): 44
- [7] Zhang Wenhui, Sun Shuhua, Zhao Deli *et al. Materials & Design*[J], 2011, 32(8-9): 4173
- [8] Guo Hongzhen(郭鸿镇), Zhang Wei(张维), Zhao Zhanglong(赵张龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(12): 1935
- [9] Sun Chaoyang(孙朝阳), Luan Jingdong(栾京东), Liu Geng(刘赓). *Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 2010, 48(7): 853
- [10] Wu Lihong(吴立鸿), Ma Quancang(马全仓), Zhang Chun-xiang(张春香) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(1): 54
- [11] Arrhenius S. *Philos Mag J Sci*[J], 1896, 41: 237
- [12] Sun Chaoyang, Liu Geng, Zhang Qingdong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 595: 92
- [13] Guo Qingmiao. *Journal of Mechanical Engineering*[J], 2011, 47(6): 51
- [14] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136
- [15] Zener C, Hollomon H. *J Appl Phys*[J], 1944, 15: 22
- [16] Luan J, Sun C, Li X *et al. Materials Science and Technology* [J], 2014, 30(2): 211
- [17] Xiong Aiming(熊爱明), Chen Shenghui(陈胜晖), Huang Weichao(黄维超) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 447
- [18] Li Miaoquan(李淼泉), Li Xiaoli(李晓丽), Long Li(龙丽) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(9): 1354
- [19] Sun Chaoyang, Liu Jinrong, Li Rui. *Rare Metals*[J], 2011, 30(1): 81
- [20] Yang Zhinan, Zhang Fucheng, Zheng Chunlei *et al. Materials & Design*[J], 2015, 66: 25
- [21] Zeng Weidong(曾卫东), Zhou Yigang(周义刚), Zhou Jun(周军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 673
- [22] Robi P S, Dixit U S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 142(1): 289
- [23] Prasad Y V R K. *J of Materi Eng and Perform*[J], 2003, 12(6): 638

Hot Deformation Behavior and Hot Processing Maps of 316LN Stainless Steel

Sun Chaoyang, Li Yamin, Xiang Yu, Yang Jing

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Isothermal compression tests of 316LN stainless steel at temperatures ranging from 1000 to 1200 °C and strain rates from 0.01 to 10 s⁻¹ were performed on Gleeble thermo-simulation machine. Based on hyperbolic sine function, the constitutive equations of 316LN stainless steel and hot processing maps during the hot deformation process were established. The flow stresses were corrected via considering the temperature rise induced by plastic deformation and friction during the test process. In addition, by taking the influence of strain on flow stress into account, a unified constitutive model for predicting flow stress was proposed. The flow stress predicted by the constitutive equations shows good agreement with the corrected stress when R is 0.992 and $ARRE$ is 4.43%. According to the dynamic material model presented by Prasad, hot processing maps for hot working condition were established based on the effect of power dissipation and instability coefficient associated with various kinds of temperatures and strain rates. Subsequently, efficiency of power dissipation and instability coefficient were interpreted based on hot processing maps under a series of strains, temperatures and strain rates. The results show that efficiency of power dissipation increases gradually with the increasing temperature and the decreasing strain rate, and it is noted that the maximum of efficiency of power dissipation is 0.38. An optimum zone for 316LN stainless steel is obtained and verified effectively by the analysis of microstructure.

Key words: 316LN stainless steel; constitutive model; hot processing maps; hot deformation behavior

Corresponding author: Sun Chaoyang, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62334197, E-mail: suncy@ustb.edu.cn