

轧制态 254SMo 超级奥氏体不锈钢的热变形行为及本构方程

李娜娜¹, 刘江林¹, 张 威², 王 涛¹, 赵利平¹

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(2. 山西太钢不锈钢股份有限公司, 山西 太原 030003)

摘 要: 为优化后续轧制工艺, 利用 Gleeble-3800 热力模拟机, 对轧制态 254SMo 超级奥氏体不锈钢进行等温恒应变速率压缩试验, 研究了 254SMo 超级奥氏体不锈钢在变形温度为 900~1100 ℃, 应变速率为 0.005~5 s⁻¹ 的热变形行为及微观组织演变。结果表明, 随着变形温度升高及应变速率降低, 峰值应力减小, 且流变曲线的单峰特征变得明显, 说明高温低应变速率下 254SMo 容易发生动态再结晶; 3 种形式的 Arrhenius 本构方程预测精度对比显示, 指数形式的精度最高, 相关系数达 97.496%, 变形激活能为 546 kJ/mol。

关键词: 254SMo 超级奥氏体不锈钢; 热压缩; 本构方程

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)08-2712-06

254SMo 超级奥氏体不锈钢是一种超低 C、高 Ni、Cr、Mo 的具有单一奥氏体组织的不锈钢^[1], 比其他奥氏体不锈钢的硬度、机械强度、韧性、冲击强度等力学性能更好, 且其抗点蚀、抗裂隙腐蚀、抗应力腐蚀、抗晶间腐蚀性能好, 常用于腐蚀性较苛刻的环境^[2-7]。

热轧工艺优化需要了解材料的轧制变形抗力与温度、应变速率及应变之间的关系, 一般通过热模拟实验得出材料不同变形条件下的流变应力曲线, 进而根据应力应变数据建立数学模型, 计算应力与变形温度、应变速率和应变之间的定量关系。目前国内关于 254SMo 超级奥氏体不锈钢的研究中, 对 254SMo 的耐蚀性及高温析出相研究较多^[1,6-8], 而关于轧制态 254SMo 热变形行为及本构方程的研究较少。为制定合理的轧制规程, 优化轧制工艺, 本研究以轧制态 254SMo 超级奥氏体不锈钢为研究对象, 探讨其热压缩变形行为, 观察 254SMo 在不同工艺参数下的微观组织, 通过分析真应力-真应变曲线, 建立 3 种形式的本构方程并进行分析验证, 得到精度最高的本构方程, 为后续优化轧制规程提供参考依据。

1 实 验

试验材料为 254SMo 超级奥氏体不锈钢热轧板材 (16 mm 厚), 其化学成分如表 1 所示。试验材料的显

表 1 254SMo 超级奥氏体不锈钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 254SMo super austenitic stainless steel (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Cu
0.011	0.27	0.44	20.2	18.1	6.2	0.2	0.64

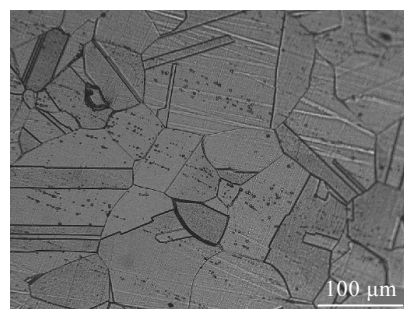


图 1 热压缩前 254SMo 的显微组织

Fig.1 Microstructure of 254SMo before compression

微组织为单一奥氏体组织 (见图 1)。

将材料加工为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱试样, 加工端面保证光滑、相互平行, 在 Gleeble-3800 热力模拟机上进行等温恒应变速率热压缩试验, 热压缩工艺示意图如图 2 示。为降低试样端面与试验机压头之间的摩擦, 尽可能保证试样处于单向压缩状态, 在试样两

收稿日期: 2019-08-10

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51804215); 山西省科技重大专项 (20181102015); 太原市科技重大专项 (170203)

作者简介: 李娜娜, 女, 1995 年生, 硕士生, 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: tyutlnn@163.com

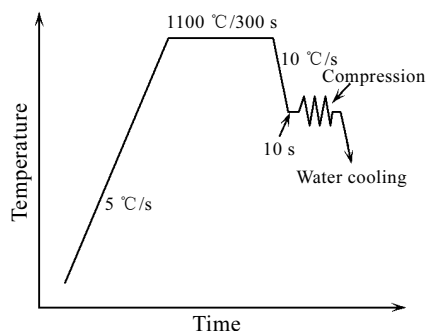


图 2 热压缩工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of hot compression process

端面添加厚度为 0.1 mm 的钼片, 变形温度分别为 900、950、1000、1050、1100 °C, 应变速率分别为 0.005、0.05、0.5、5 s⁻¹, 真应变为 0.916。

为了研究 254SMo 超级奥氏体不锈钢高温热变形时微观组织演变规律, 以及热变形中产生的动态软化行为。将压缩完成的试样从中心沿着压缩轴方向剖开, 取其一半进行粗磨、精磨和机械抛光, 做成金相试样, 用王水腐蚀, 用卧式光学显微镜观察 254SMo 的金相组织形貌。

2 结果与分析

2.1 应力应变曲线

由热压缩试验得到的真应力-真应变曲线如图 3 所示。可以看出, 不同工艺参数下的 254SMo 超级奥氏体不锈钢的应力应变曲线的变化趋势几乎一致。变形初始阶段, 随着应变的增加, 254SMo 塑性变形抗力迅速升高达到峰值应力, 表现出加工硬化现象; 随着应变的进一步增加, 流变应力逐渐降低, 表现出动态软化行为; 但是, 观察到变形温度为 1000 °C、应变速率为 0.5 s⁻¹ 时, 254SMo 的流变应力随着应变的增加而不断增加。根据 Prasad 和 Ravichandran 的研究^[9], 动态再结晶包括界面生成(成核)和界面迁移(长大)两个相互竞争的过程, 成核速率和长大速率的相对值决定了真应力-真应变曲线的形状, 当长大速率大于成核速率, 则产生流动软化效果, 否则流变应力值不断增大, 出现 1000 °C、0.5 s⁻¹ 时的曲线。

应变速率一定时, 随着变形温度的增加, 应力存在下降趋势, 峰值应力明显变小, 对应的应变也逐渐变小。这可能是因为变形温度的升高, 为动态再结晶提供了较大的驱动力, 加速了晶界迁移和位错运动, 从而导致 254SMo 的变形抗力降低; 同一变形温度下,

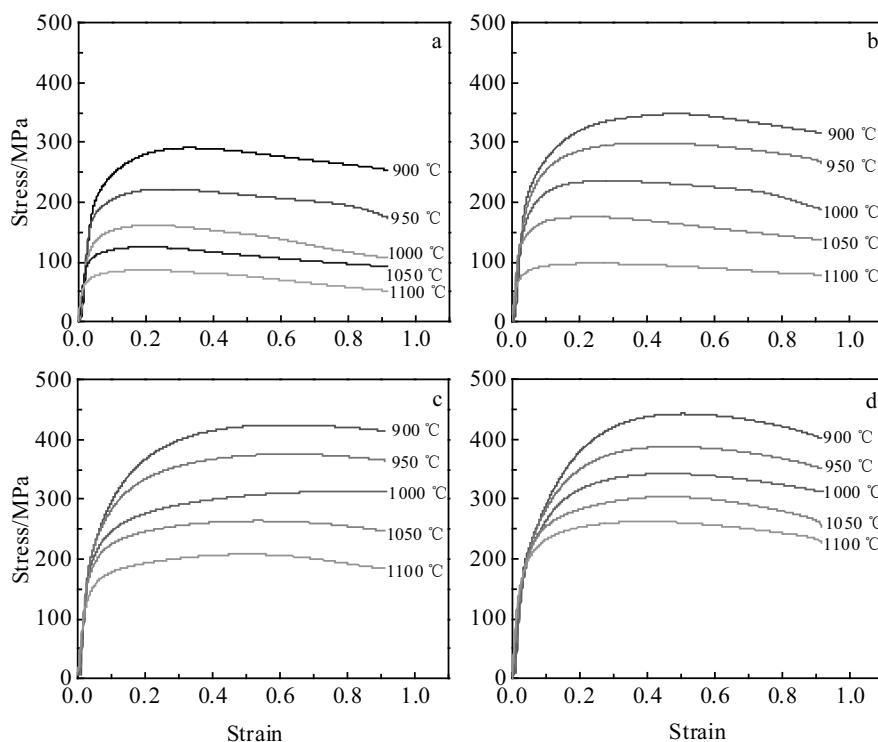


图 3 不同工艺参数下 254SMo 的真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-true strain curves of 254SMo under different process parameters: (a) $\dot{\epsilon}=0.005 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.05 \text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=0.5 \text{ s}^{-1}$, and (d) $\dot{\epsilon}=5 \text{ s}^{-1}$

随着应变速率的增加,流变应力、峰值应力及峰值应变均呈上升趋势。这可能是因为应变速率的增加使得位错缠结,降低了位错的运动,254SMo 的加工硬化率提高,流变应力增大。

图 3a 中,流变应力达到峰值后,随着应变的增加逐渐降低,属于动态再结晶类型;图 3c 中,流变应力达到峰值后逐渐趋于稳定,属于加工回复类型。254SMo 在低应变速率下的主要软化机制为动态再结晶,高应变速率下的主要软化机制为动态回复。

2.2 微观组织分析

热压缩后的 254SMo 金相组织如图 4、5 所示。由图 4 可以看出,变形温度为 900 °C 时,254SMo 不锈钢原始粗大的晶粒沿垂直于压缩方向伸长,这是因为原始奥氏体晶粒受到轴向压缩,晶粒伸长;变形温度为 1050 °C 时,原晶粒周围沿晶界产生了细小等轴晶粒,晶粒尺寸远小于初始晶粒尺寸,254SMo 不锈钢发生了动态再结晶,且呈现“项链”结构^[10]特征;变形温度为 1100 °C 时,原始晶粒逐渐被新产生的细小晶粒取代,新的晶粒形状呈不规则多边形,大小也不规则。说明变形温度对 254SMo 超级奥氏体不锈钢的显微组织变化具有较大影响,随着变形温度的增加,动态再结晶驱动力增大,再结晶晶粒的形核和长大速率增加,254SMo 不锈钢动态再结晶程度逐渐增大。应变速率相同时,变形温度越高,动态再结晶晶粒数目增多,晶粒尺寸增大。与 Han^[2]研究的铸态 254SMo 动态再结晶行为对比,本实验中 254SMo 高温大应变

速率下,动态再结晶平均晶粒尺寸不到 6 μm 。铸态 254SMo 高温大应变速率下,动态再结晶平均晶粒尺寸约为 13.6 μm 。相比之下,轧制态 254SMo 的动态再结晶程度比铸态 254SMo 的低。

由图 5 可以看出,变形温度为 1100 °C,应变速率为 5 s^{-1} 时,254SMo 原始晶粒沿垂直压缩方向被拉长,晶界上产生细小等轴晶粒,发生了动态再结晶,但再结晶晶粒尺寸较小,尺寸大小为 5.8 μm 左右;应变速率为 0.05 s^{-1} 时,原始晶界上产生的细小等轴晶粒尺寸增大,平均晶粒尺寸约为 13.4 μm ;应变速率为 0.005 s^{-1} 时,原始晶粒完全被动态再结晶晶粒取代,再结晶晶粒形状不规则,平均晶粒尺寸约为 18 μm 。可以看出,变形温度相同时,应变速率越小,动态再结晶程度越大。

综合分析,变形温度越高,应变速率越低,254SMo 越容易发生动态再结晶。

2.3 254SMo 热压缩本构方程

本构方程可用于预测不同加工参数下材料的流变应力,描述材料热加工过程中的流变行为^[11]。变形温度和应变速率对金属成型的综合影响可以用 Zener-Hollomon 参数来表示^[12],Zener-Hollomon 参数的表达式如下^[13]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

Sellars 和 Tegart 提出了一种包括变形激活能 Q 和温度 T 的本构方程,即 Arrhenius 方程^[14,15]:

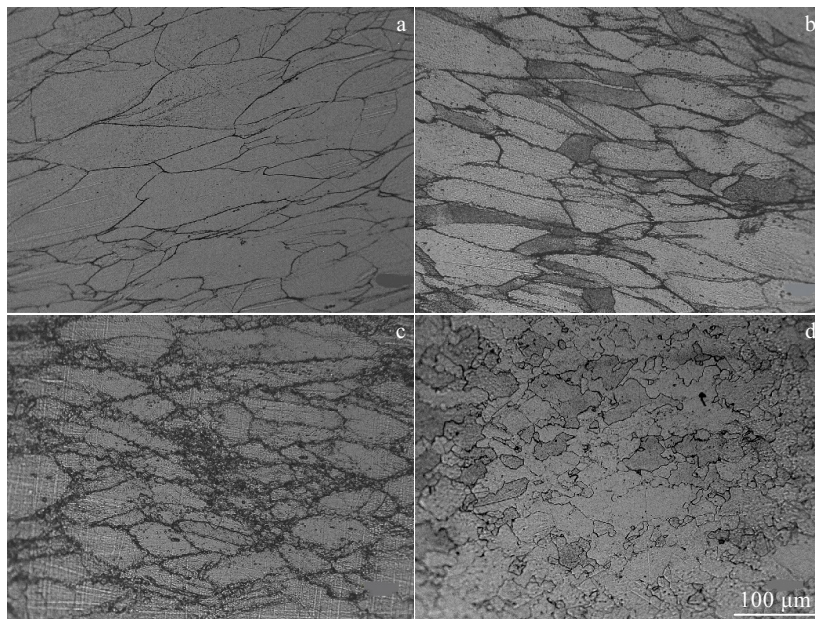
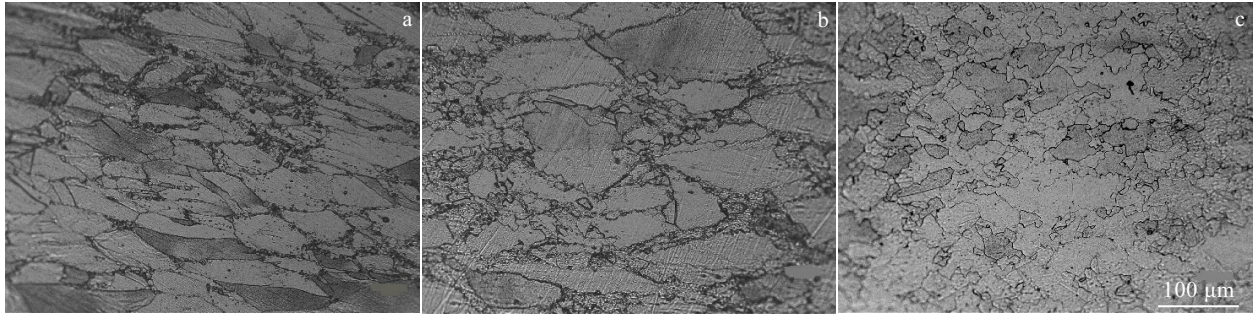


图 4 254SMo 不同温度下的微观组织($\dot{\epsilon}=0.005 \text{ s}^{-1}$)

Fig.4 Microstructures of 254SMo at different temperatures ($\dot{\epsilon}=0.005 \text{ s}^{-1}$): (a) 900 °C, (b) 950 °C, (c) 1050 °C, and (d) 1100 °C

图 5 254SMo 不同应变速率下的微观组织 ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$)Fig.5 Microstructures of 254SMo under different strain rates ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$): (a) 5 s^{-1} , (b) 0.05 s^{-1} , and (c) 0.005 s^{-1}

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(n_2 \sigma) \exp\left(\frac{-Q_2}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为流变应力, MPa; Q_1 、 Q_2 、 Q 为变形激活能, J/mol; R 为气体常数, $R=8.314\text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$; T 为变形温度, K; A_1 、 A_2 、 A 为材料常数; n_1 、 n_2 、 n 为加工硬化指数; α 为最优化因子, $\alpha = \frac{n_2}{n_1}$ 。

分别对式 (2)、(3)、(4) 两边取对数, 得到:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q_1}{RT} \quad (5)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + n_2 \sigma - \frac{Q_2}{RT} \quad (6)$$

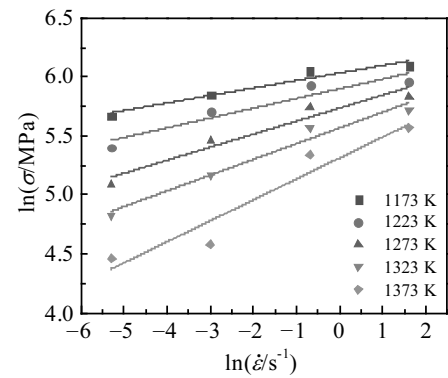
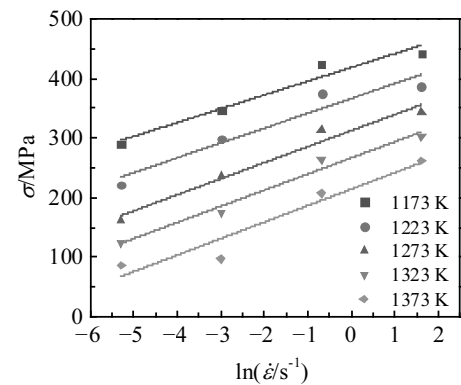
$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{Q}{RT} \quad (7)$$

当变形温度 T 恒定、应力为峰值应力时, 对 $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\sigma - \ln \dot{\varepsilon}$ 做图 (图 6、7), 线性拟合得到 $n_1=8.82$ 、 $n_2=0.039$, 由此可得 $\alpha = \frac{n_2}{n_1} = 0.0044$ 。对 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$ 做图 (图 8), 线性拟合得到 $n=6.55$ 。

当应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 恒定、应力为峰值应力时, 对 $\ln \sigma - \frac{1}{n_1 RT}$ 、 $\sigma - \frac{1}{n_2 RT}$ 、 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{1}{n RT}$ 做图 (图 9、10、11), 线性拟合得到 $Q_1=536\,070\text{ J/mol}$ 、 $Q_2=546\,010\text{ J/mol}$ 、 $Q=541\,922\text{ J/mol}$ 。

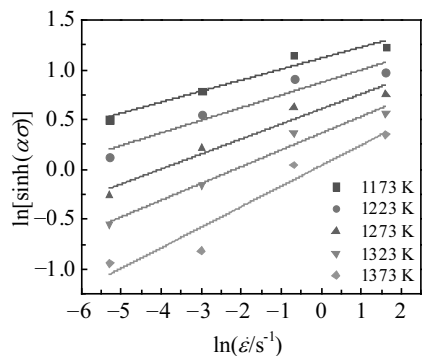
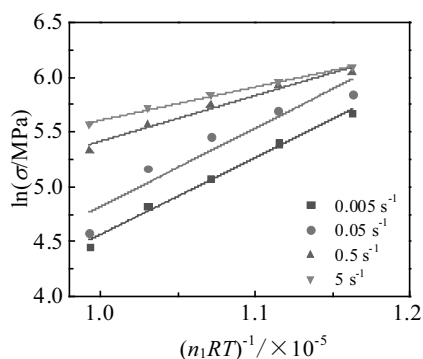
因此, 254SMo 超级奥氏体不锈钢在热变形过程中的 Zener-Hollomon 参数可以表述为:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{546010}{8.314T}\right) \quad (8)$$

图 6 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的线性分析图Fig.6 Linear analysis diagram of $\ln \sigma$ and $\ln \dot{\varepsilon}$ 图 7 σ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的线性分析图Fig.7 Linear analysis diagram of σ and $\ln \dot{\varepsilon}$

将上述求出的 n_1 、 n_2 、 n 、 Q_1 、 Q_2 、 Q 分别代入式 (2) ~ (4), 求出 $A_1=4.31$ 、 $A_2=1.9 \times 10^{17}$ 、 $A=6.77 \times 10^{20}$ 。

因此, 利用幂函数、指数函数、双曲正弦函数求解出来的本构方程分别为:

图 8 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的线性分析图Fig.8 Linear analysis diagram of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $\ln \dot{\epsilon}$ 图 9 $\ln \sigma$ 与 $1/n_1RT$ 的线性分析图Fig.9 Linear analysis diagram of $\ln \sigma$ and $1/n_1RT$

$$\dot{\epsilon} = 4.31\sigma^{8.82} \exp\left(\frac{-536070}{8.314T}\right) \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon} = 1.9 \times 10^{17} \exp\left(0.039\sigma - \frac{546010}{8.314T}\right) \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon} = 6.77 \times 10^{20} [\sinh(0.0044\sigma)]^{6.55} \exp\left(\frac{-541922}{8.314T}\right) \quad (11)$$

利用建立的本构方程, 将实验工艺参数 (变形温度

及应变速率) 代入方程, 得到相应的应力值。将计算所得应力值与实际实验所得应力值生成散点图, 并进行线性拟合, 得到如下结果 (见图 12)。结果显示 3 种形式的本构方程精度分别为 90.27%、97.496%、67.2%, 指数函数形式的本构方程精度最高, 因此选用式(10)作为 254SMo 的热压缩本构方程, 并求出流动应力表达式为:

$$\sigma = \frac{1}{0.039} \left(\ln \dot{\epsilon} - \ln(1.9 \times 10^{17}) + \frac{546010}{8.314T} \right) \quad (12)$$

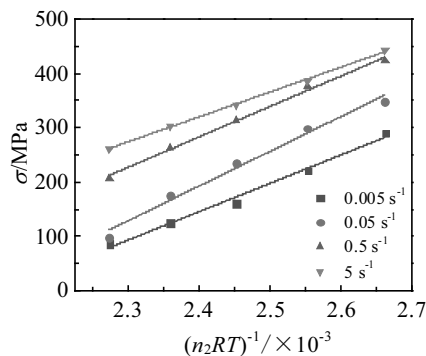
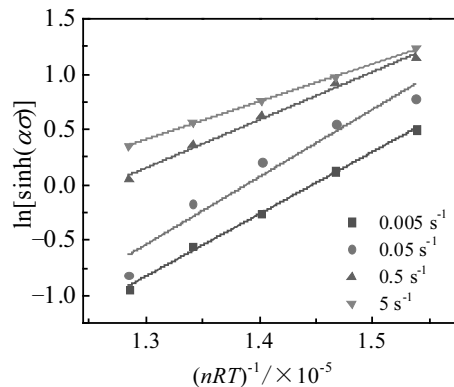
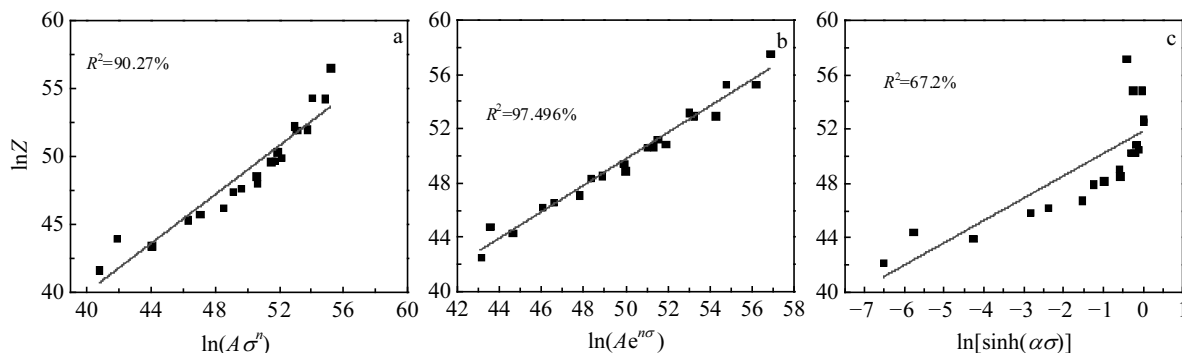
图 10 σ 与 $1/n_2RT$ 的线性分析图Fig.10 Linear analysis diagram of σ and $1/n_2RT$ 图 11 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/nRT$ 的线性分析图Fig.11 Linear analysis diagram of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1/nRT$ 

图 12 峰值应力与 Z-Hollomon 参数的关系

Fig.12 Relationship between peak stress and Z-Hollomon parameters: (a) power function, (b) exponential function, and (c) hyperbolic sine function

3 结 论

1) 254SMo 超级奥氏体不锈钢在低应变速率下的主要软化机制为动态再结晶, 高应变速率下的主要软化机制为动态回复。

2) 降低变形速率, 提高变形温度, 可以降低 254SMo 超级奥氏体不锈钢的峰值应变及峰值应力, 促进动态再结晶的发生。

3) 在本试验中, 轧制态 254SMo 超级奥氏体不锈钢的变形激活能为 546 kJ/mol, 本构方程为:

$$\dot{\varepsilon}=1.9 \times 10^{17} \exp \left(0.039 \sigma-\frac{546010}{8.314 T}\right)$$

参考文献 References

- [1] Zhang Wei(张 威), Zhu Lili(朱丽丽), Guo Honggang(郭宏刚). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2018, 39(5): 1079
- [2] Han Ying, Wu Hua, Zhang Wei *et al. Materials & Design*[J], 2015, 69: 230
- [3] Pu Enxiang, Zheng Wenjie, Xiang Jinzhong *et al. Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*[J], 2014, 27(2): 313
- [4] Song Zhigang(宋志刚), Xu Changzheng(徐长征), Pu Enxiang(浦恩祥) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(3): 895
- [5] Ren Jianbin(任建斌), Song Zhigang(宋志刚), Zheng Wenjie(郑文杰) *et al. Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2012, 24(5): 41
- [6] Liu Wei(刘 巍), Xu Ronghua(许荣华), Guo Chaoqun(郭潮群). *Welding and Joining*(焊接)[J], 2002(7): 21
- [7] Yang Sen(杨 森), Liu Jie(刘 洁), Fan Guangwei(范光伟) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2016, 41(4): 79
- [8] Abd El Meguid E A, Abd El Latif A A. *Corrosion Science*[J], 2007, 49(2): 263
- [9] Prasad Y V R K, Ravichandran N. *Bulletin of Materials Science*[J], 1991, 14(5): 1241
- [10] Ebrahimi G R, Keshmiri H, Momeni A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2011, 528(25-26): 7488
- [11] Han Ying, Liu Guiwu, Zou Dening *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 565(10): 342
- [12] Lin Yongcheng, Chen Xiaomin, Wen Dongxu *et al. Computational Materials Science*[J], 2014, 83(2): 282
- [13] Zener C, Hollomon J H. *Journal of Applied Physics*[J], 1944, 15(1): 22
- [14] Mandal S, Rakesh V, Sivaprasad P V *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 500(1-2): 114
- [15] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136

Hot Deformation Behavior and Constitutive Equation Analysis of Rolled 254SMo Super Austenitic Stainless Steel

Li Nana¹, Liu Jianglin¹, Zhang Wei², Wang Tao¹, Zhao Liping¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Taigang Stainless Steel Co. Ltd, Taiyuan 030003, China)

Abstract: In order to optimize the subsequent rolling process, the Gleeble-3800 thermal simulator was used to test the isothermal constant strain rate compression of the as-rolled 254SMo super austenitic stainless steel. The thermal deformation behavior and microstructure evolution of 254SMo in the temperature range of 900~1100 °C under the strain rates of 0.005~5 s⁻¹ were studied. The results show that the peak stress decreases with the deformation temperature increasing and the strain rate decreasing, and the single peak characteristic of flow curves become obvious, which indicates that 254SMo is prone to dynamic recrystallization under high temperature and low strain rate. The prediction accuracy comparison of the three forms of Arrhenius constitutive equations shows that the exponential form has the highest accuracy, the correlation coefficient is 97.496%, and the deformation activation energy is 546 kJ/mol.

Key words: 254SMo super austenitic stainless steel; isothermal compression; constitutive equation

Corresponding author: Wang Tao, Ph. D., Associate Professor, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: tyutwt@163.com