

## 410 不锈钢的热变形行为及热加工图

刘娟<sup>1</sup> 崔明亮<sup>1</sup> 高蕾<sup>1</sup> 杨希<sup>1</sup> 陈雷<sup>2</sup> 金淼<sup>2</sup>

(1. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 618000; 2. 燕山大学, 河北 066004)

**摘要:** 通过对 410 不锈钢进行热压缩试验, 分析了不同变形温度及变形速率对应力应变曲线的影响, 并以此为基础构建了本构方程及热加工图。发现相同应变速率的真应力应变曲线, 温度越大, 真应力越小。不同应变速率的流变曲线, 低应变速率下, 应力达到峰值后, 将出现下降趋势; 而高应变速率下, 应力将一直升高, 直到达到最大应变时达到最高。分析热加工图发现在较高的变形温度及较大的应变速率下, 材料可加工性能较好。

**关键词:** 410 钢; 本构方程; 热加工图

**中图分类号:** TG316 **文献标志码:** B

### Thermal Deformation Behavior and Hot Working Drawing of 410 Stainless Steel

Liu Juan, Cui Mingliang, Gao Lei, Yang Xi, Chen Lei, Jin Miao

**Abstract:** Based on the thermal compression test of 410 stainless steel, the influence of different deformation temperature and deformation rate on the stress-strain curve has been analyzed, and the constitutive equation and hot working diagram have been constructed. For the true stress-strain curve with the same strain rate, the larger the temperature, the smaller the true stress. For the rheological curve of different strain rates, at low strain rate, when the stress reaches the peak value, there will be a downward trend, while at high strain rate, the stress will continue to rise until the maximum strain is reached. It has been found that the machinability of the material is better at higher deformation temperature and higher strain rate.

**Key words:** 410 steel; constitutive equation; hot working diagram

现今不锈钢的应用十分广泛, 有的侧重于应用其力学性能, 如桥梁、高速公路、隧道等, 有的侧重于应用其耐腐蚀性能, 如石油、给水、排水处理装置及船底材料等<sup>[1]</sup>。其中, 在石油行业中, 410 不锈钢在重要零件阀体中得到了大量应用, 而管道连接所采用的阀体通常使用锻造成形。锻件成形效果与锻件质量密切相关, 因此, 选择合适的热加工工艺有助于得到比较均匀的组织 and 优异的材料性能<sup>[2-4]</sup>, 获得合理的热加工工艺前提是明晰材料的热变形规律, 不仅能够提高生产效率, 增加产品合格率, 减少成本, 还可为以后研究该材料提供理论支撑。

材料在热变形时, 流变应力主要与变形温度、变形速率及变形量(或应变)这三个因素有关, 而 Arrhenius 型本构方程用于描述高温变形时流变应力与变形温度、应变速率这三者之间的关系, 应变速率和变形温度对热变形的影响可以用参数  $Z$  表征,  $Z$  参数表示了考虑温度补偿的应变速率因子。对于不同应力值, Arrhenius 型本构方程如下<sup>[5-6]</sup>:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{RT} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \quad (\text{所有应力水平}) \quad (1)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{RT} = A \sigma^{n_1} \quad (\text{低应力水平 } \alpha \sigma < 0.8) \quad (2)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{RT} = A \exp(\beta \sigma) \quad (\text{高应力水平 } \alpha \sigma > 1.2) \quad (3)$$

式中  $\dot{\epsilon}$  为应变速率 ( $s^{-1}$ );  $R$  表示气体常数, 为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $Q$  表示金属材料在高温产生变形的难易程度 ( $\text{J}$ );  $T$  表示热力学温度 ( $\text{K}$ );  $\sigma$  表示真应力 ( $\text{MPa}$ );  $A$  表示本材料的结构因子;  $\alpha$  表示应力水平参数;  $\beta$  及  $n_1$  都表示材料常数, 并且  $\alpha$  为  $\beta$  与  $n_1$  的比值;  $n$  属于材料应变硬化指数。

热加工图按照 Prasad 等提出的动态材料模型进行构建, 具体分为能量耗散图与失稳图<sup>[7-9]</sup>。并且  $G$  代表塑性变形而导致的能量消耗,  $J$  代表热变形过程中材料内部微观组织演化, 称为耗散协量。

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = G + J \quad (4)$$

能量耗散效率因子 ( $\eta$ ) 与失稳判据 ( $\xi$ ) 定义为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{1+m} \quad (5)$$

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln [m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m \leq 0 \quad (6)$$

式中  $m$  为应变速率敏感性指数, 表达式为:

$$m = \left( \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_T \quad (7)$$

收稿日期: 2020-08-28

通过对所构建本构方程与热加工图的分析,以及对 410 不锈钢热变形行为的探究,最后确定了该钢优良的热加工窗口,支持了 410 不锈钢的后续应用。

## 1 试验方法

试验材料为 410 不锈钢,试样尺寸为  $\varnothing 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,在 Gleeble-3800 热/力模拟试验上进行高温压缩试验。图 1 为热压缩过程示意图,试样以  $10^\circ\text{C/s}$  的加热速度升到  $1200^\circ\text{C}$  后保温 3 min,再以  $10^\circ\text{C/s}$  的冷却速度降到指定温度  $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$  后保温 10 s 变形,变形的应变速率分别为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \text{ s}^{-1}$ 、 $5 \text{ s}^{-1}$  及  $10 \text{ s}^{-1}$ 。样品变形的真应变为 0.9,变形完成后淬火。

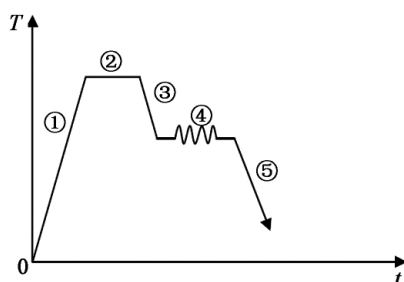


图 1 热压缩过程示意图  
Figure 1 Schematic diagram of thermal compression process

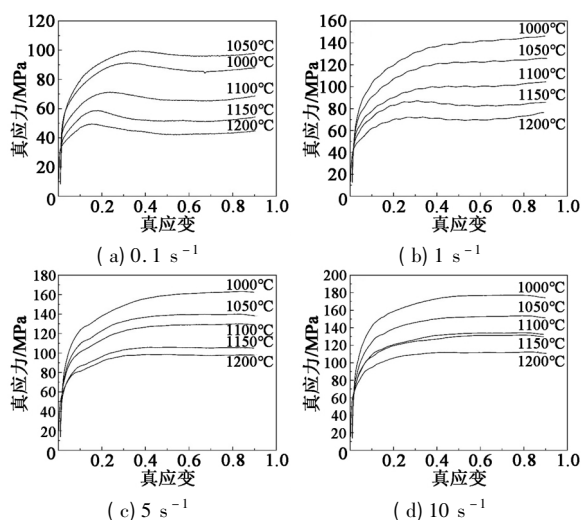


图 2 410 钢不同应变速率、不同变形温度下的真应力-真应变曲线

Figure 2 True stress-true strain curves of steel 410 at different strain rates and deformation temperatures

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 力学性能曲线

图 2 为相同应变速率不同温度的力学性能曲线。开始变形时,加工硬化明显,位错密度急剧升

高,应力急剧增大。之后,动态回复与动态再结晶迅速发展,应力增长越来越缓慢,直到达到某一应变时,应力达到最大,并开始下降,此时,动态软化起主导作用<sup>[10]</sup>。其中图 2(a)符合这一表述。图 2(b)~(d)由于应变速率较大,变形时间较短,没有足够时间使其充分软化,故直到达到最大应变,应力才随之达到最大,说明加工硬化仍起主导作用。另外,四张图有相同的规律,即假如应变速率保持不变,不同变形温度下的曲线,应力各有不同,其规律为变形温度越大,应力越小。

### 2.2 本构方程构建

采用 0.9 真应变处各应力值构建本构方程,对式(1)~(3)取自然对数,可以得到:

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \quad (8)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - \frac{Q}{RT} \quad (9)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{Q}{RT} + \ln A \quad (10)$$

$$\ln [\sinh(\alpha \sigma)] = \frac{Q}{nRT} + \frac{\ln \dot{\epsilon}}{n} - \frac{\ln A}{n} \quad (11)$$

图 3 中分别给出了  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 、 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  与  $1/T$  之间的关系。依据式(8)~(10)及图 3 中线性拟合后的斜率可得 1273 K 条件下的值,  $n_1 = 7.76012$ ,  $\beta = 0.06026$ ,由此可得  $\alpha = \beta/n_1 = 0.007765$ 。依次求得其他温度的  $\alpha$  值,取平均得  $\alpha$  为 0.010501。则依次求得  $n = 4.9$ ,  $Q = 221.780 \text{ kJ}$ ,进而得到  $A = 1546230$ 。得到了基于应变 0.9 下的应力本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1546230 [\sinh(0.010501 \sigma)]^{4.9} \exp \left( -\frac{221780}{RT} \right)$$

$$\sigma = 95 \ln \left\{ \left( \frac{Z}{1546230} \right)^{\frac{1}{4.9}} + \left[ \left( \frac{Z}{1546230} \right)^{\frac{2}{4.9}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left( \frac{221780}{RT} \right) = 1546230 [\sinh(0.0105 \sigma)]^{4.9}$$

### 2.3 热加工图

按照相应的方法进行处理,得到的 0.1、0.5、0.9 应变下的热加工图如图 4 所示。通过分析热加工图,发现应变为 0.1 时,失稳区有三块;应变为 0.5 时,失稳区有三块,其中右上角存在很小的一块区域;应变为 0.9 时,失稳区有两块。在不同的应变量下功率耗散效率及加工失稳区均在细节上不断变化,大致呈现出随变形量增加失稳区逐渐增大的趋势。并且失稳区主要分布在低应变速率区域,说明  $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、 $0.1 \sim 1.3 \text{ s}^{-1}$  条件下不适合进行加工。在三张热加工图中,非失稳区主要分布在左上角虚线框与右上角虚线框区域内。两者相比较,右上角虚线框区域内能量耗散

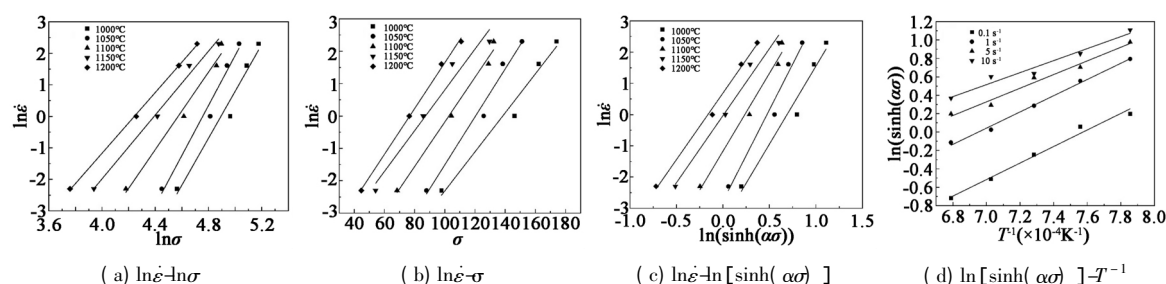


图3 不同参数之间的关系

Figure 3 Relationships between different parameters

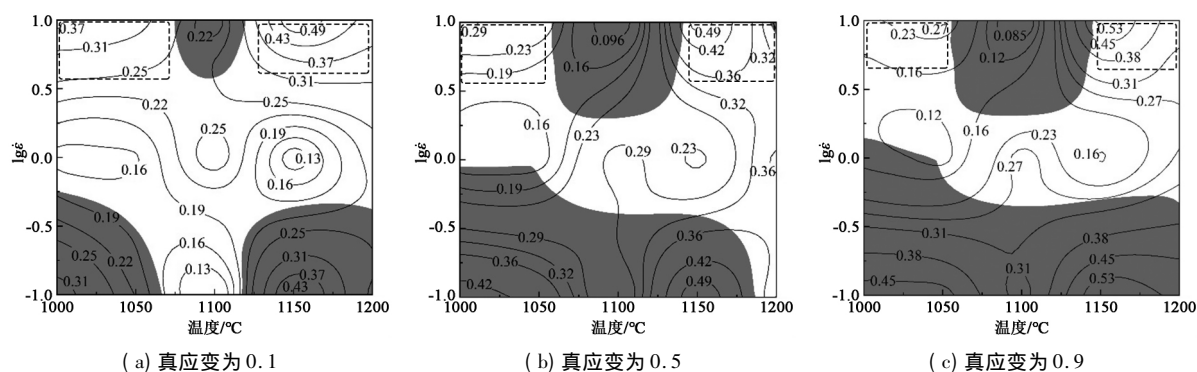


图4 410 钢热加工图

Figure 4 Hot working drawing of steel 410

效率因子  $\eta$  值较高,最大峰值为 53%,故选择其所在区域试验条件 1150 ~ 1200℃、2.0 ~ 10 s<sup>-1</sup> 进行试验,热加工性能较好。

### 3 结论

(1) 本文使用热压缩试验得到了流变曲线,并对其进行了分析。发现应变速率不变,温度越高,应力越小。并且对于不同应变速率的流变曲线,低应变速率下,应力达到峰值后,将出现下降趋势;而高应变速率下,应力将一直升高,直到达到最大应变时达到最高。

(2) 构建了 0.9 应变条件下的本构方程:

$$\dot{\varepsilon} = 1546230 [\sinh(0.010501\sigma)]^{4.9} \exp \left( \frac{-221780}{RT} \right)$$

$$\sigma = 95 \ln \left\{ \left( \frac{Z}{1546230} \right)^{\frac{1}{4.9}} + \left[ \left( \frac{Z}{1546230} \right)^{\frac{2}{4.9}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp \left( \frac{221780}{RT} \right) = 1546230 [\sinh(0.0105\sigma)]^{4.9}$$

(3) 通过建立热加工图,确定了适合 410 钢的热加工范围,在 1150 ~ 1200℃、2.0 ~ 10 s<sup>-1</sup> 试验条件下进行试验,热加工性能较好。

### 参考文献

- [1] 王平怀,王伯健,宋景娜,等. 淬火温度对 2Cr13 不锈钢组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (4): 71-73.
- [2] Dingqian Dong, Fei Chen, Zhenshan Cui. Investigation on metadynamic recrystallization behavior in

- SA508-III steel during hot deformation [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017 (29): 18-28.
- [3] Tsao L C, Chen C H, Wu R W, et al. Plastic flow behavior, microstructure, and corrosion behavior of AZ61 Mg alloy during hot compression deformation [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015 (18).
- [4] Xiao Gangfeng, Zhu Ningyuan, Long Jinchuan, et al. Research on precise control of microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy cylindrical parts during hot backward flow spinning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018 (34).
- [5] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied physics, 1944, 15 (1): 22-32.
- [6] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14 (9): 1136-1138.
- [7] Prasad Y, Gegel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15 (10): 1883-1892.
- [8] Prasad Y, Seshacharyulu T. Processing maps for hot working of titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243 (1-2): 82-88.
- [9] Prasad Y, Seshacharyulu T. Modelling of hot deformation for microstructural control [J]. International Materials Reviews, 1998, 43 (6): 243-258.
- [10] 胡家齐,王长军,杨哲,等. AM355 不锈钢的热变形行为 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (3): 50-59.