

TA15 钛合金热变形应力应变曲线及本构模型

骆俊廷¹, 陈艺敏¹, 尹宗美¹, 张艳姝², 张春祥¹

(1. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)
(2. 机械科学研究总院, 北京 100083)

摘要: 在变形温度分别为 750, 800, 850, 900, 950, 1000 和 1050 °C, 应变速率分别为 0.001, 0.01, 0.1 和 1 s⁻¹ 的条件下, 对 TA15 钛合金进行了热压缩试验, 分析了变形温度和应变速率对流动应力的影响。根据试验结果, 计算了变形过程的温升, 表明变形热所导致的温升大小与应变速率和应变均成正比, 在 T=750 °C, $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$ 的低温高应变速率条件下所产生的温升最大, 可以达到 122.63 °C。基于 Sellars-Tegart 本构模型, 建立了 TA15 钛合金热变形时的本构模型。

关键词: TA15 钛合金; 热变形; 应力应变曲线; 本构模型

中图分类号: TG386.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)02-0399-07

TA15(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)是一种近 α 钛合金, 具有较高的比强度、耐热性、抗腐蚀性等性能, 主要用来生产压机机盘、叶片、机匣、蒙皮以及各种承力构件。由于其工作环境差, 对锻件的质量要求苛刻, 锻造工艺设计不合理经常导致锻件的废品率极高^[1]。因此, 实现 TA15 锻件热成形模拟仿真, 提高锻件质量可控化程度是非常必要的^[2-4]。

本构关系可以表明材料的流动应力随变形温度、应变速率以及应变等热力参数的变化规律, 是热成形模拟仿真的基础, 也是变形工艺设计和控制的重要依据之一, 因此对 TA15 热变形本构关系的研究是必要的^[2]。本研究基于对 TA15 钛合金进行热压缩试验的结果, 采用 Sellars 双曲正弦本构模型拟合得到 TA15 钛合金热变形的本构模型。

1 实验

实验采用的 TA15 钛合金为热轧棒材, 其主要化学成分如表 1 所示。图 1 是原始材料的金相组织图, 可以看出, 原始组织为 $\alpha+\beta$ 双相转变组织。首先用线切割将热轧棒材加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱试件; 而后再将加工好的试样在 Geeble-1500 热压缩试验机上进行等温热压缩试验, 变形温度分别为 750, 800, 850, 900, 950, 1000 和 1050 °C; 应变速率分别为 0.001, 0.01, 0.1, 和 1 s⁻¹。将试样在进行热压缩变形前以 2.5 °C/s 的加热速率加热到不同的温度, 保温 3 min 后, 进行压缩试验, 随后水冷至室温。

表 1 TA15 主要元素构成

Table 1 Chemical compositions of TA15

Elements	Al	V	Mo	Zr	Fe	Ti
$\omega/\%$	6.6	2.31	1.7	2.2	0.06	Bal.

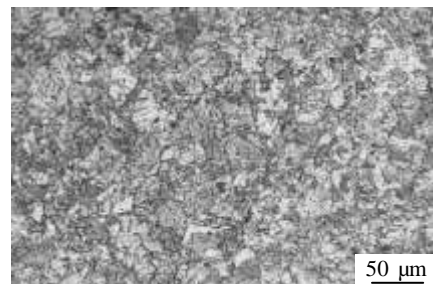


图 1 TA15 钛合金的初始组织

Fig.1 Initial microstructure of TA15

2 结果分析与讨论

2.1 变形温度与流动应力的关系

图 2 为 TA15 钛合金不同变形条件所对应的热压缩试验应力应变曲线。由图 2 可知: 温度在 750~900 °C 内, 在达到峰值应变之前, 随着应变的增加, 应力呈迅速增加趋势; 达到峰值应变后随应变的增加, 应力急剧下降, 最终趋于平缓。随着变形温度的升高, 流动应力呈明显下降趋势, 即在该温度范围内流动应力对温度影响较为敏感。温度在 950~1000 °C 内, 达到

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项 (2012ZX04012-011)

作者简介: 骆俊廷, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004, 电话: 0335-8052253, E-mail: luojunting@ysu.edu.cn

峰值应变后, 曲线几乎没有明显的下降趋势便进入平缓状态, 随温度的升高流动应力变化较小, 即流动应力对温度的敏感度降低。研究表明, TA15 钛合金 β 相比 α 相的变形抗力更小^[5], 在 750~900 °C 内, α 相含量较多, 且 α 相为密排六方晶格, 其性能对位向比较敏感, 所以流动应力值波动范围较大, 应力对温度影响较敏感; 温度在 950~1000 °C 内, 由于在相变点附近, 此时密排六方 α 相大部分转变为体心立方 β 相, 且体心立方 β 相滑移系多、层错能高, 微观组织随温度升高变化不大, 因而温度对流动应力影响变小。由于低温变形时的变形抗力要大于高温变形, 因此相同应变下, 低温变形产生的变形热要高于高温变形时所产生的, 这是低温变形时的软化程度要大于高温变形时的原因之一。

2.2 应变速率与流动应力的关系

图 3 为 TA15 钛合金在不同变形条件所对应的应力应变曲线。由图 3 可知, 在相同变形温度条件下, 流动应力的下降趋势随着应变速率的减小变得不明显, 引起这种现象的主要原因是变形速率的增大会使变形体累积的畸变能迅速增加, 而钛合金的导热率又差, 势必产生明显的热效应, 使流动应力降低。

2.3 变形热的计算

变形热效应是钛合金的热加工过程中不可忽视的因素之一^[6], 在用 Geeble-150(热模拟试验机进行压缩试验时, 测得的是真实的试样温度, 但真实的由于变形过程所造成的温升却很难得到, 为此本研究采用式 (1) 计算了变形过程的温升。

$$\Delta T = \frac{p}{C} \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中, ΔT 为变形所引起的温升(°C), p 为与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 有关的热转换系数, C 为材料的热容系数($N \cdot mm^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$), 一般钛合金的热容系数取($C=4$)。其中

$$\begin{cases} p = 0 & \dot{\epsilon} < 0.001 \text{ s}^{-1} \\ p = 1 + \dot{\epsilon}/3 & 0.001 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 1 \text{ s}^{-1} \\ p = 1 & \dot{\epsilon} > 1 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

根据热压缩实验所得的名义加热温度下应力应变曲线, 根据上式计算可以得到不同温度不同应变下所对应的温升值的大小。

图 4 为不同应变速率、温度和应变下所对应的温升曲线。由图 4 可以看出, 变形热的大小与应变速率应变均成正比, 在 $T=750 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$ 的低温高应变速率的条件下所产生的温升最大, 可以达到 122.63

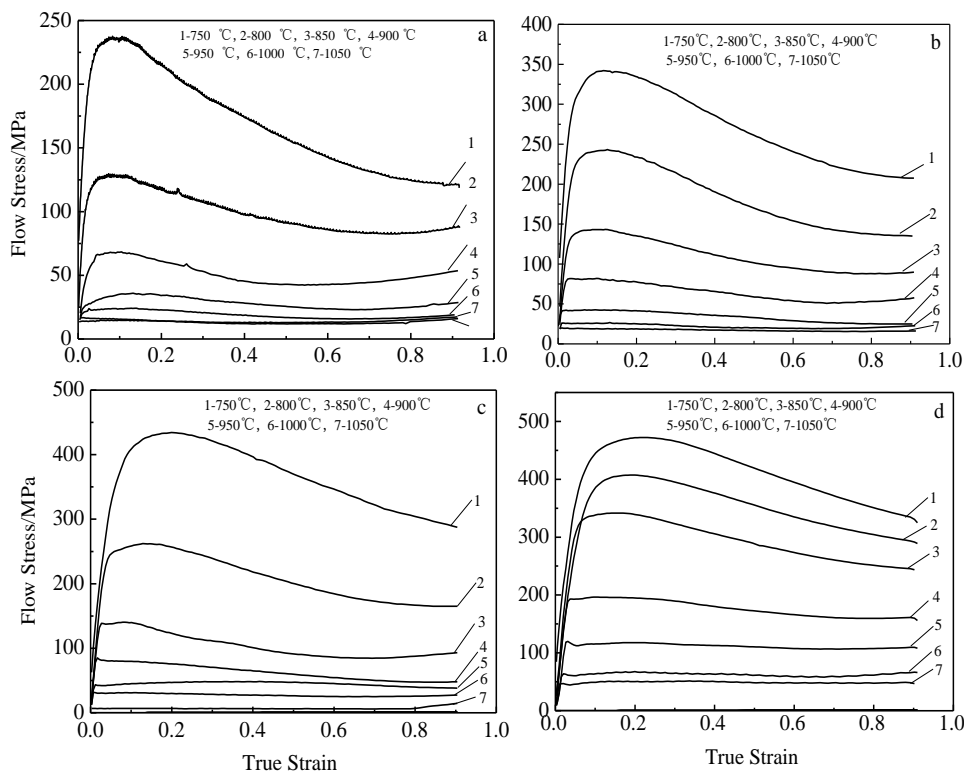


图 2 不同变形条件下所对应的应力应变曲线

Fig.2 Stress strain curves under different deformation conditions: (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$, and (d) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$

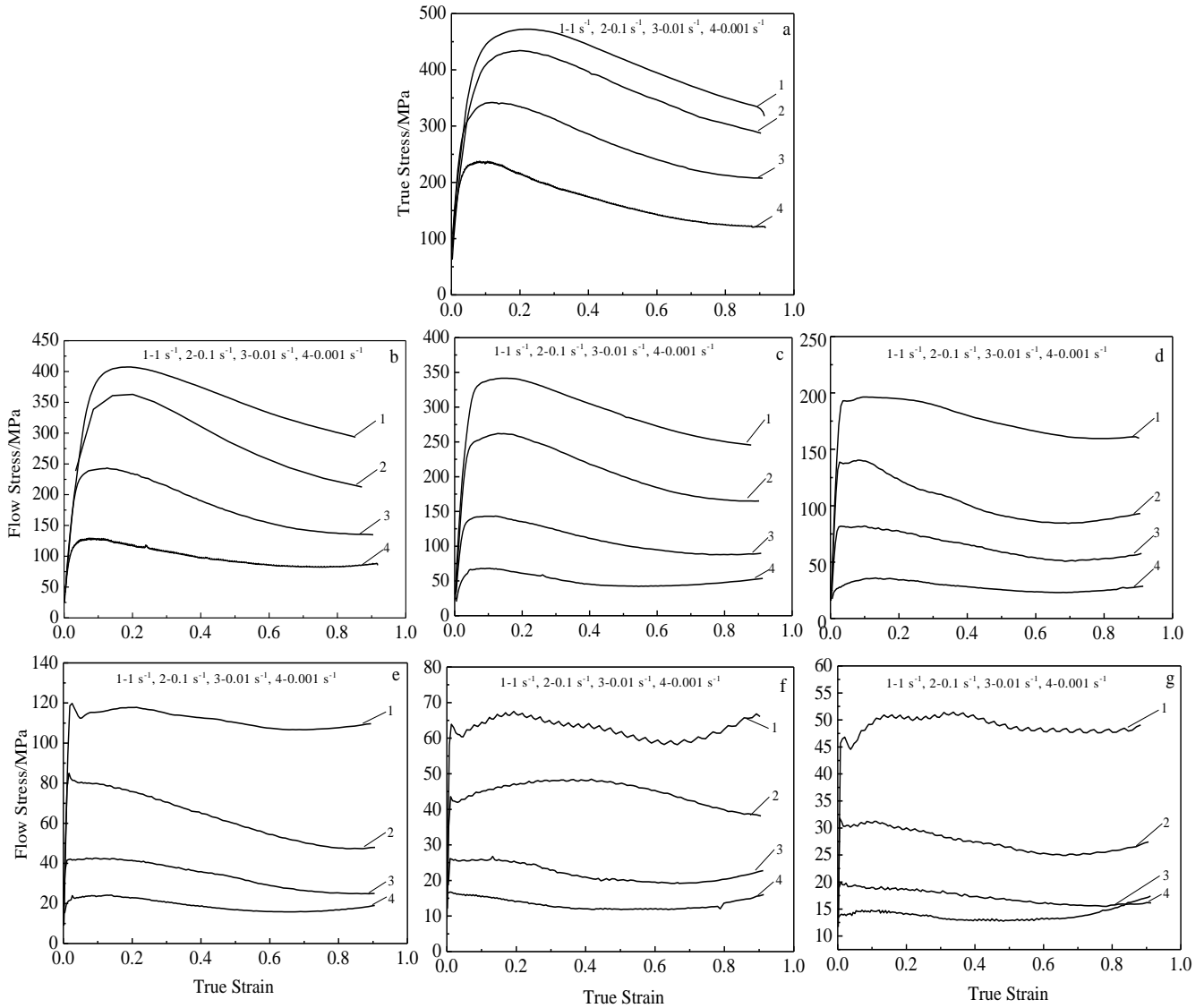


图 3 不同变形条件下所对应的应力应变曲线

Fig.3 Stress strain curves under different deformation conditions: (a) 750 °C, (b) 800 °C, (c) 850 °C, (d) 900 °C, (e) 950 °C, (f) 1000 °C, and (g) 1050 °C

℃, 证明变形热是一个不可忽略的参数, 图 2 中应力应变曲线在低温时的软化程度比高温时的要大, 就是变形热所造成的温升导致的。表 2 给出不同变形条件下的温升统计表。

3 本构模型的构建

3.1 本构模型

参照 Sellars 等提出的双曲正弦的本构模型, 建立 TA15 高温变形的本构方程:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

其中, A 、 α 、 β 、 n 均为材料常数, Q 为变形激活能 (J/mol), 气体常数 $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{g} \cdot \text{K})$, σ 为流动应力 (MPa), $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}), T 为绝对温度 (K)。其中的材料常数值 A 、 α 、 n 和激活能 Q 需要通过对压缩实验所得数据进行回归处理来确定。分别求出应变分别为 0.005, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 和 0.9 下的材料常数值 A 、 α 、 n 和激活能 Q , 进而可以拟合求出以上材料常数关于应变的数学表达式, 最终代入到 Arrhenius 双曲正弦型方程中, 即可建立适用于 TA15 钛合金热变形的本构模型。

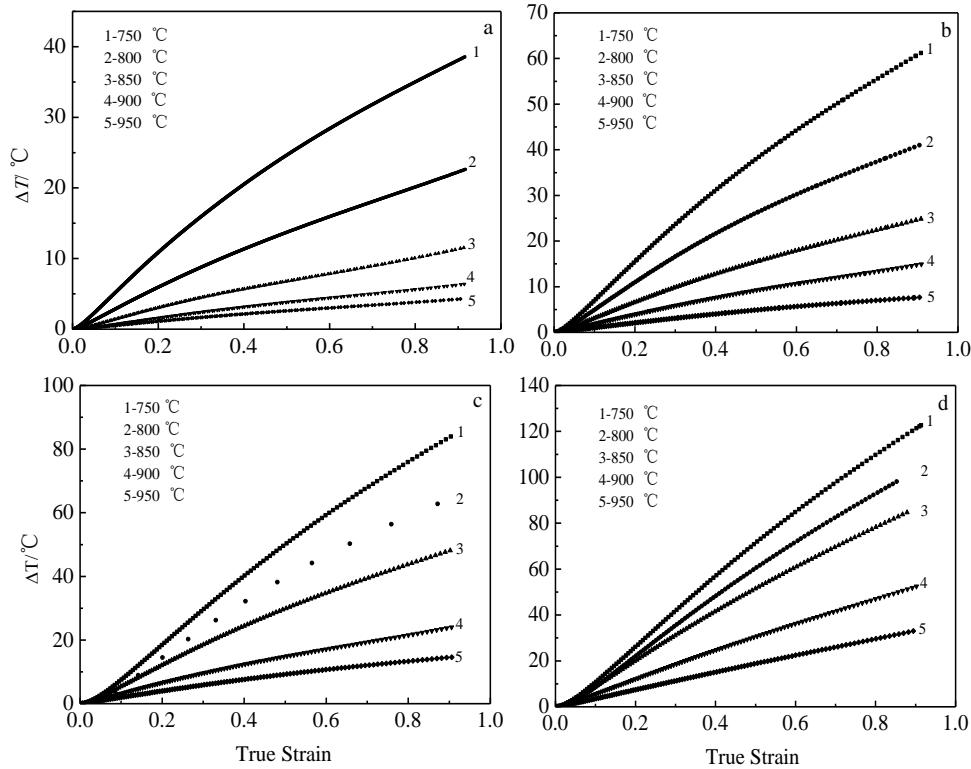


图 4 不同变形条件下所对应的温升曲线

Fig.4 Temperature rise curves under different deformation conditions: (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$, (d) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$

表 2 不同变形条件下的温升

Table 2 Temperature rising at different deformation conditions

Heating temperature/°C	Strain rate/s ⁻¹	True strain	Temperature rise/°C
750	0.001	0.92	38.55
750	0.01	0.92	61.2
750	0.1	0.92	83.94
750	1	0.92	122.63
800	0.001	0.92	22.6
800	0.01	0.92	40.98
800	0.1	0.92	62.79
800	1	0.92	98.08
850	0.001	0.92	11.54
850	0.01	0.92	24.83
850	0.1	0.92	48.13
850	1	0.92	84.66
900	0.001	0.92	6.39
900	0.01	0.92	14.94
900	0.1	0.92	24.03
900	1	0.92	52.48
950	0.001	0.92	4.29
950	0.01	0.92	7.66
950	0.1	0.92	14.63
950	1	0.92	32.98

以应变为 0.05 的求解过程为例进行求解, 不同应变速率下(1000/T)和 $\ln \sinh(\alpha\sigma)$ 关系曲线图如图 5 所示, 得到 TA15 钛合金在真应变为 0.05 时流动应力与应变速率的关系如下

$$\sigma = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \cdot \exp(-Q/RT) = 1.393 \times 10^{22} [\sinh(0.00896\sigma)]^{3.82498} \cdot \exp(-532257.5/RT) \quad (4)$$

同样可以依次求出应变分别为 0.005, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9 所对应的 Q、A、 α 、n 等的参数值, 用多元线性回归可以确定这些参数数值, 如表 3 所示。

根据表 3 的数据可以得到参数 Q、A、 α 、n 与应变的拟合曲线如图 6 所示, 进而求出参数 Q、A、 α 、n 分别关于应变的数学表达式:

$$\begin{cases} Q = 1 \times 10^{18} \epsilon^6 - 4 \times 10^8 \epsilon^5 + 4 \times 10^8 \epsilon^4 - 2 \times 10^8 \epsilon^3 + 6 \times 10^7 \epsilon^2 - 9 \times 10^6 \epsilon + 929653 (R^2 = 0.9865) \\ A = 4 \times 10^{17} \epsilon^{-4.205} (R^2 = 0.9199) \\ n = 544.14 \epsilon^6 - 1420 \epsilon^5 + 1416.5 \epsilon^4 - 668.08 \epsilon^3 + 149.66 \epsilon^2 - 14.943 \epsilon + 4.2461 (R^2 = 0.9665) \\ \alpha = 0.132 \epsilon^6 - 0.6082 \epsilon^5 + 1.0532 \epsilon^4 - 0.896 \epsilon^3 + 0.395 \epsilon^2 - 0.0815 \epsilon + 0.0114 (R^2 = 0.9995) \end{cases} \quad (5)$$

最后得到本构方程

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left[\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)/A \right]^{\frac{1}{n}} + \left\{ \left[\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)/A \right]^{\frac{2}{n}} + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

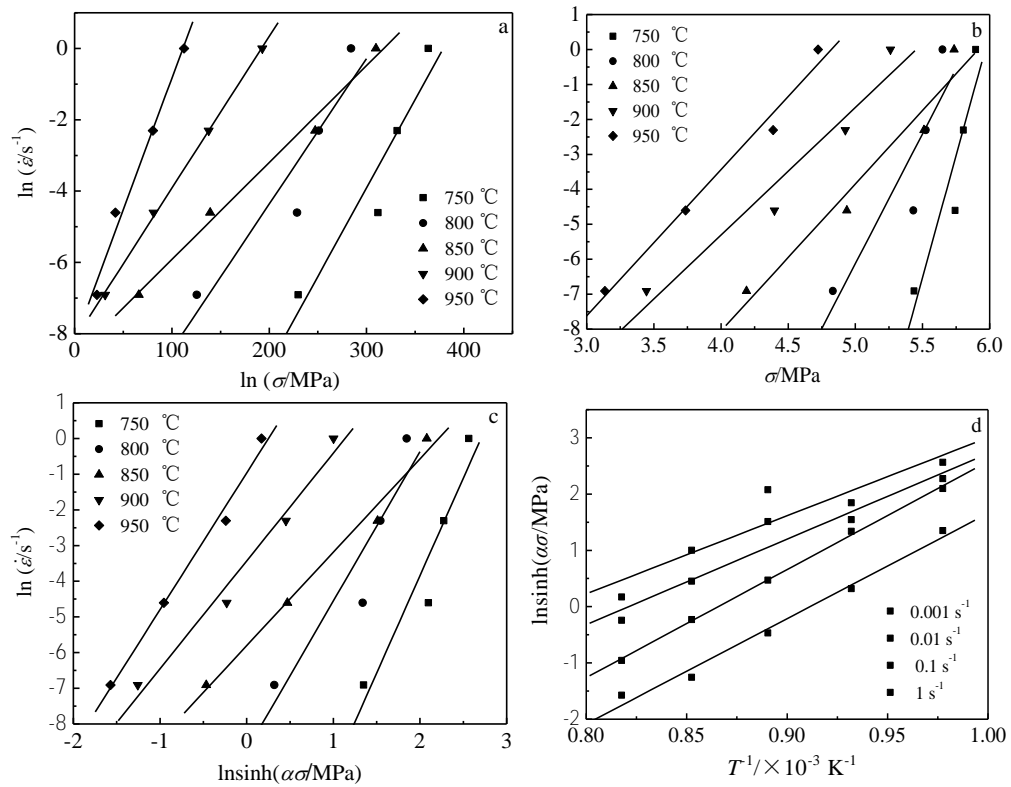


图 5 应变为 0.05 时的拟合关系曲线

Fig.5 Fitting relation curves at strain of 0.05: (a) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$, (b) $\ln \dot{\epsilon}$ - σ , (c) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sinh(\alpha\sigma)$, and (d) $\ln \sinh(\alpha\sigma)$ - $(1000/T)$

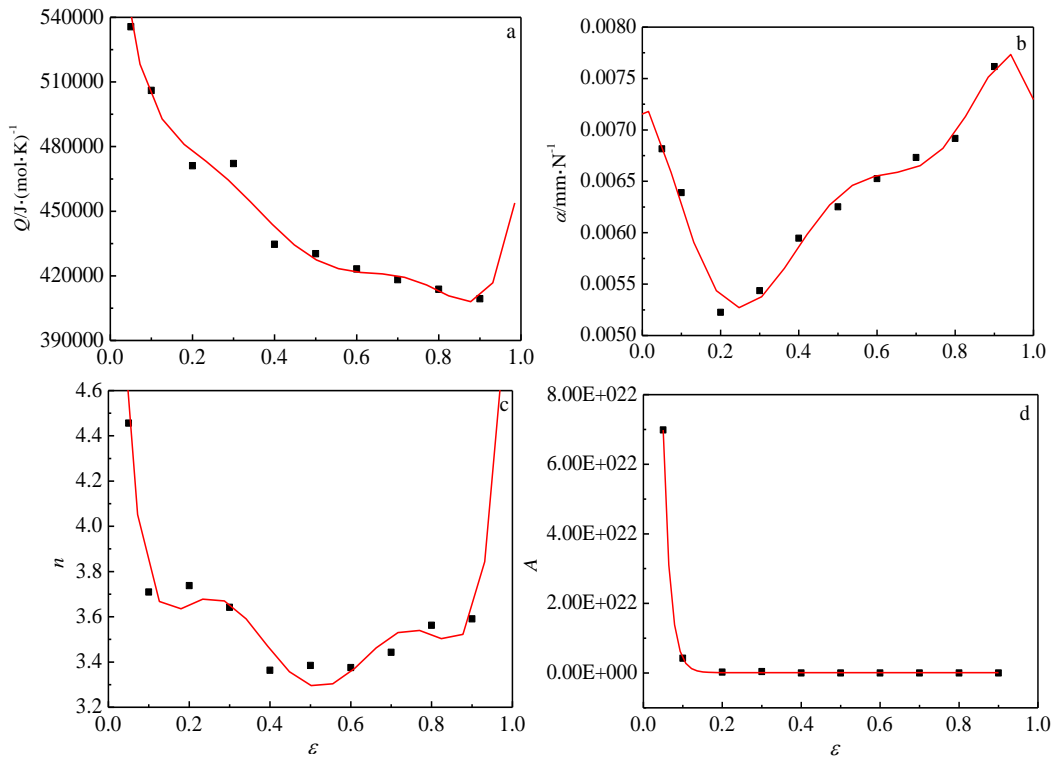


图 6 参数与应变的拟合曲线

Fig.6 Fitting relation curves for parameters and strain: (a) Q - ϵ , (b) α - ϵ , (c) n - ϵ , and (d) A - ϵ

表 3 不同应变所对应的参数值

Table 3 Parameters corresponding to different strain values

ε	$Q/J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$	$\alpha / \text{mm} \cdot \text{N}^{-1}$	n	A
0.05	532257.5	0.00896	3.82498	1.39E+22
0.1	512416.7	0.008287	3.23782	2.78E+21
0.2	482702.5	0.008323	3.00992	1.67E+20
0.3	484923.4	0.008742	2.91906	2.3E+20
0.4	454308.4	0.009251	2.79018	5.42E+17
0.5	439156.1	0.009696	2.7663	2.49E+18
0.6	428454.1	0.010028	2.77012	8.99E+17
0.7	419654.7	0.010142	2.84876	3.89E+17
0.8	392927.7	0.010085	2.84876	2.23E+16
0.9	407761.8	0.00982	3.17654	1.16E+17

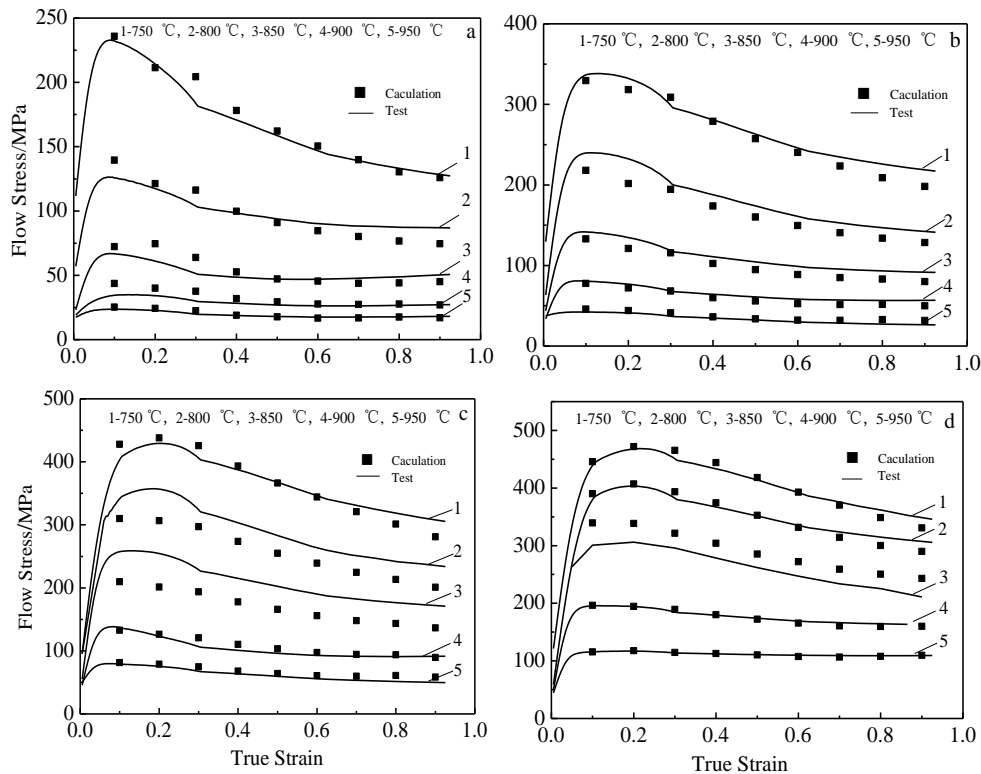


图 7 不同实验条件下的实验值与计算值对比图

Fig.7 Comparison of experimental values and the calculated under different experimental conditions: (a) 0.001 s^{-1} , (b) 0.01 s^{-1} , (c) 0.1 s^{-1} , and (d) 1 s^{-1}

将已知的 Q 、 A 、 α 、 n 代入式(6), 即可得到不同温度
和不同应变下的流动应力计算值。

3.2 计算值与实验值对比

图 7 为不同实验条件下的实验值与计算值对比,
可见, 流动应力的实验值和计算值基本吻合, 平均误
差在 10%之内。

4 结 论

1) TA15 钛合金热变形时, 温度在 750~900 °C 内,

流动应力波动较大, 对温度影响较为敏感, 温度在
950~1000 °C 内, 流动应力变化较小, 且对温度的敏
感度较小; 变形热效应导致流动应力对应变速率的敏
感性较低。

2) 变形热所导致的温升大小与应变速率和应变
均成正比, 在 $T=750 \text{ °C}$, $\dot{\varepsilon}=1 \text{ s}^{-1}$ 的低温高应变速率条
件下所产生的温升最大。基于 Sellars-Tegart 本构模型,
建立了 TA15 钛合金热变形时的本构模型。

参考文献 References

- [1] Hao Yang(郜 阳), Sun Zhichao(孙志超), Yang He(杨 合). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 951
- [2] 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
- [3] Fan X G, Yang H, Gao P F. *Materials and Design*[J], 2013, 51: 34
- [4] Sun Zhichao, Yang He, Tang Ze. *Computational Materials Science*[J], 2010, 50(2): 308
- [5] Sun Z C, Yang H, Han G J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527 (15): 3464
- [6] Zeng Zhipeng, Jonsson Stefan, Roven Hans Jogen. *Materials and Design*[J], 2009, 30(6): 1939

Stress Strain Curve and Constitutive Model of TA15 Titanium Alloy in Hot Deformation

Luo Junting¹, Chen Yimin¹, Yin Zongmei¹, Zhang Yanshu², Zhang Chunxiang¹

(1. Education Ministry Key Laboratory of Advanced Forging and Stamping Science and Technology, State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2. China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The hot compression tests for TA15 titanium alloy were conducted at $0.001\text{ s}^{-1}\sim 1\text{ s}^{-1}$ strain rates and $750\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatures. The effect of deformation temperature and strain rate on the flow stress was analyzed. According to the test results, the temperature rise in the deformation process was calculated. Results show that the temperature rise caused by deformation heat is proportional to strain rate and strain. The maximum temperature rise $122.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ is produced at the low temperature $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ and high strain rate 1 s^{-1} . Finally, the constitutive model was established for the microstructure evolution of TA15 titanium alloy during hot deformation based on Sellars-Tegart constitutive model.

Key words: TA15 titanium alloy; hot deformation; stress strain curve; constitutive model

Corresponding author: Luo Junting, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P. R. China, Tel: 0086-335-8052253, E-mail: luojunting@ysu.edu.cn