

考虑摩擦和温升效应的 Ti60 合金流变曲线修正

王天祥, 鲁世强, 王克鲁, 欧阳德来, 姚 泉

(南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

摘 要: 采用 Thermecmaster-Z 型热加工模拟试验机对 Ti60 合金进行等温恒应变速率压缩实验, 获得该合金在变形温度 700~950 °C, 应变速率 0.001~10 s⁻¹ 和真应变 0.51 条件下的流变曲线。通过考虑摩擦和温升效应对流动应力的影响, 对 Ti60 合金实测流变曲线进行修正。结果表明, 摩擦和温升效应对 Ti60 合金流动应力均具有较显著的影响, 且摩擦效应随着应变的增加而增加, 而温升效应随着变形温度的降低和应变速率的升高而增加。经摩擦和温升修正后的流变曲线接近于流动稳态型, 它能更准确地反映 Ti60 合金在等温恒应变速率条件下的流动应力对真应变的动态响应。

关键词: Ti60 合金; 流动应力; 摩擦效应; 温升效应

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)02-0537-07

航空航天技术的不断发展对航空发动机提出的性能要求越来越高, 而钛合金由于其具有耐高温、耐腐蚀、低密度、高比强度等诸多优异的综合性能, 成为航空发动机高温零部件的重要候选材料^[1-3]。Ti60 合金是中国自主研发设计的一种近 α 型钛合金, 它在室温性能、高温性能、蠕变性能、热稳定性、抗氧化性、疲劳性能以及断裂韧性等方面具有良好的匹配, 能够在 600 °C 环境下长期稳定服役, 可以用于制造压气机叶片、轮盘、鼓桶以及整体叶盘等关键零部件^[4-6]。

等温恒应变速率压缩实验所获得的流动应力与真应变的关系曲线(流变曲线)是反映材料在热变形过程中流动应力大小以及衡量材料加工性能的重要手段。作为材料研究中最基本的数据之一, 流变曲线的准确性将直接影响到对材料进一步研究结果的准确性。然而实际压缩时, 因试样端面不可避免地会存在摩擦效应, 使得压缩过程偏离单向应力变形条件, 这将导致实测流动应力偏离真实值。此外, 由于等温恒应变速率压缩过程中通常会因塑性功转变成热能而产生温升效应, 使得该压缩过程偏离等温变形条件, 这也将导致流动应力实测值偏离真实值。因此, 为准确获得等温恒应变速率条件下的流动应力对应变的动态响应, 有必要对实测流变曲线进行摩擦和温升修正, 以获得更准确的流动应力数据。

本研究以 Ti60 合金的热压或热等静压成形为应用背景, 在 Thermecmaster-Z 型热加工模拟试验机上对 Ti60 合金进行等温恒应变速率压缩实验。考虑到

Ti60 合金的相变点为 1050 °C, 所以选择在 700~950 °C, 0.001~10 s⁻¹ 条件下进行压缩实验, 以获得该合金实测流变曲线。通过考虑摩擦和温升效应对流动应力的影响, 对实测流变曲线进行摩擦和温升修正以获得该合金更准确的流动应力数据。经过摩擦和温升效应修正后的流变曲线可为 Ti60 合金的热压或热等静压工艺制定和设备吨位选择提供理论依据, 也可为 Ti60 复合材料构件热压或热等静压成形过程的有限元数值模拟提供更准确的流动应力基础数据。

1 实 验

实验材料为经锻造+两相区固溶+时效处理后的 Ti60 合金, 标准压缩试样为 $\Phi 8$ mm×12 mm 的圆柱体。Ti60 合金的原始微观组织如图 1 所示。由图 1 可知,

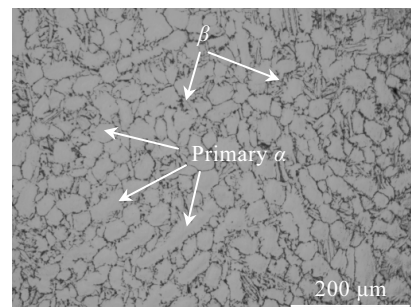


图 1 Ti60 合金原始微观组织

Fig.1 Original microstructure of Ti60 alloy

收稿日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51964034, 51761029); 江西省研究生创新基金(YC2018-S365)

作者简介: 王天祥, 男, 1993 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: 1196218949@qq.com

Ti60 合金接近于等轴组织，由近等轴状的初生 α 相和 β 转变组织组成。

本实验采用 Thermecmaster-Z 型热加工模拟实验机对 Ti60 合金试样进行等温恒变速率压缩实验。在试样两端垫云母片以降低模具与试样之间的摩擦，以减轻试样因摩擦而产生的鼓形。针对 Ti60 合金热压或热等静压成形的需要，以及考虑到其相变点（1050 °C），选择压缩变形温度为 700、750、800、850、900、920 和 950 °C；应变速率为 0.001、0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹。热模拟压缩实验加热升温速度为 10 °C/s，升温到变形温度后保温 5 min。保温结束后以实验设定的应变速率对试样进行压缩，压缩至真应变为 0.51 时结束。压缩结束后，以 50 °C/s 的冷却速度（氩气冷却）冷却到室温。压缩实验过程中，通过 Thermecmaster-Z 型热加工模拟试验机配置的专用数据采集软件，获得不同变形条件下的流动应力和真应变数据。

2 结果与分析

2.1 摩擦效应修正

在热压缩过程中，由于试样与模具之间存在无法完全消除的摩擦，使得压缩试样的应力状态由单向压应力状态转变为三向压应力状态，从而增大变形抗力；同时，摩擦的存在还会引起不均匀变形，产生附加应力。这些因素导致实测的流变曲线并不能真实地反映流动应力对真应变的动态响应。所以，需对实测流变曲线进行摩擦修正，以消除摩擦效应对流动应力的影响。

Ebrahimi 和 Najafizadeh^[7]等学者认为，摩擦修正系数 f_1 与试样外观尺寸之间存在定量关系，其表达式如式（1）所示：

$$\begin{cases} f_1 = \frac{(R/H)b}{(4/\sqrt{3}) - (2b/3\sqrt{3})} \\ R = R_0\sqrt{H_0/H} \\ b = 4 \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{H}{\Delta H} \end{cases} \quad (1)$$

式中， R 和 H 分别为热压缩后试样的平均半径和高度， R_0 和 H_0 分别为热压缩前试样的半径和高度， b 为圆柱度参数， ΔR 为热压缩后试样的最大半径（ R_M ）和顶部半径（ R_T ）之间的差值（ $\Delta R=R_M-R_T$ ）， ΔH 为热压缩前后试样的高度差。由于热压缩后试样的顶部半径（ R_T ）在实际中难以准确测量，所以将热压缩后试样高度方向的轮廓近似为圆弧形，则 R_T 可由式（2）来确定：

$$R_T = \sqrt{3 \frac{H_0}{H} R_0^2 - 2R_M^2} \quad (2)$$

材料在热压缩过程中，经摩擦修正后的流动应力

可用式（3）来计算^[8]：

$$\begin{cases} \sigma_f = f_2 \sigma_0 \\ f_2 = \frac{C^2}{2(e^C - C - 1)} \\ C = (2f_1 R_0) / H_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， σ_f 为摩擦修正后的流动应力， f_2 为等效摩擦修正系数， σ_0 为实测流动应力。

由于在整个热压缩过程中，只能测量到试样热压缩前（ $\epsilon=0$ ）以及热压缩后（ $\epsilon=0.51$ ）的尺寸，亦即通过式（1）~（3）只能求得应变分别为 0 和 0.51 时的等效摩擦修正系数 f_2 。为了求得其它应变下的等效摩擦修正系数 f_2 ，现对 700 °C，0.001 和 10 s⁻¹，以及 920 °C，0.001 和 10 s⁻¹ 条件下的 Ti60 合金试样分别补做高度压下量为 5%、10%、15%、20%、25%（对应的真应变分别为 0.05、0.11、0.16、0.22、0.29）的等温恒变速率压缩实验，通过对这些变形条件下热压缩后试样的尺寸测量，再通过式（1）~（3）可求得各应变条件下的等效摩擦修正系数 f_2 ，其结果如图 2 所示。由图 2 可知，不同温度和应变速率下的等效摩擦修正系数 f_2 与应变之间呈现较好的线性关系，这个结果与 Li^[9]和 Zhu^[10]等学者认为在低应变（ $\epsilon < 0.6$ ）条件下，等效摩擦修正系数 f_2 与应变近似成线性关系的结论吻合较好。因此，对其它温度和应变速率条件，只需求得应变为 0 和 0.51 时的等效摩擦修正系数 f_2 ，则按线性关系可求得其它热压缩过程中任一瞬时应变时的等效摩擦修正系数 f_2 值。

因此，计算出不同温度、不同应变速率和不同应变下的等效摩擦修正系数 f_2 后，可求得 Ti60 合金在整个热压缩过程中经摩擦修正后的流动应力。图 3 给出了不同变形条件下，Ti60 合金实测流变曲线与经摩擦

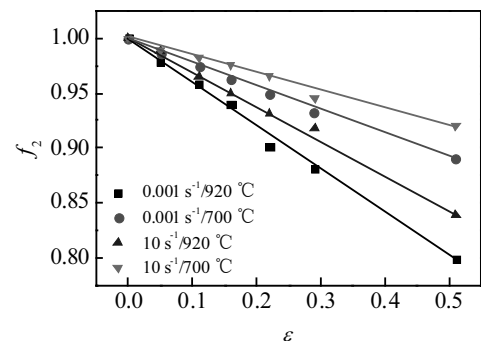


图 2 不同应变条件下的等效摩擦修正系数 f_2
Fig.2 Equivalent friction correction coefficient under different strain conditions

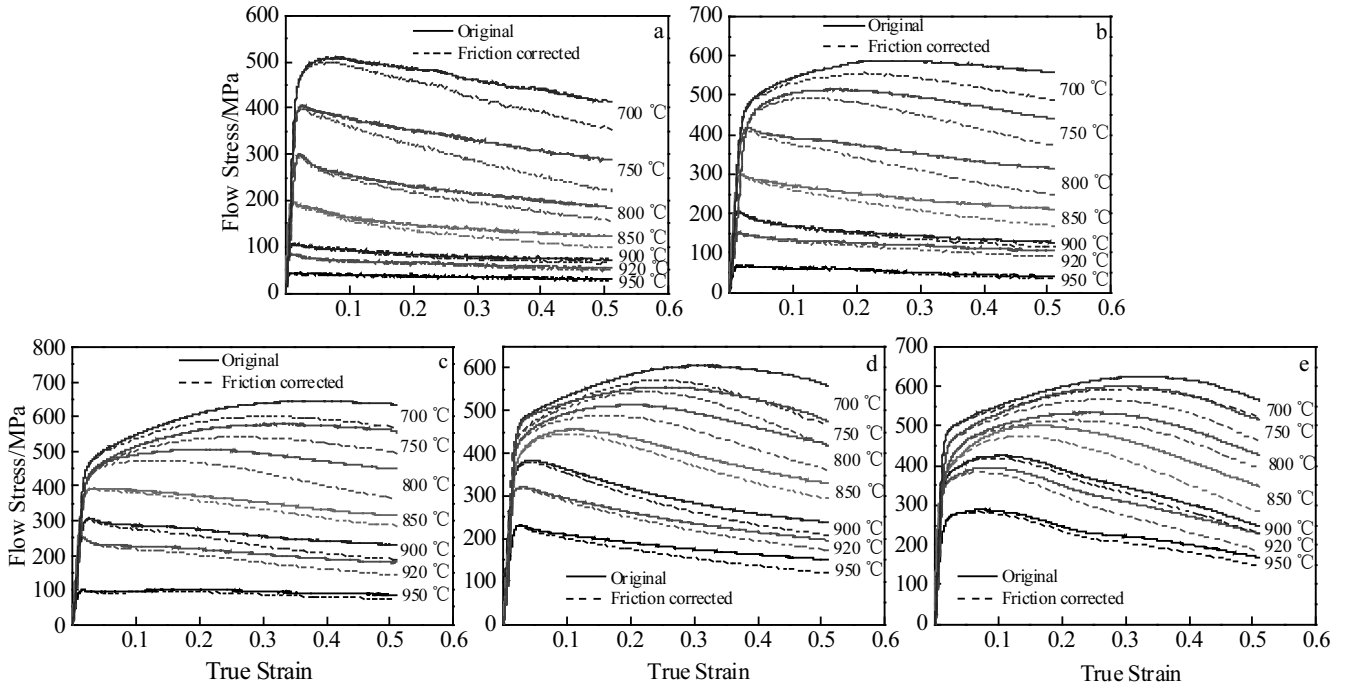


图 3 Ti60 合金实测流变曲线与摩擦修正流变曲线对比

Fig.3 Comparison between the measured and the friction-corrected flow curves of Ti60 alloy under different strain rates:

(a) 0.001 s^{-1} , (b) 0.01 s^{-1} , (c) 0.1 s^{-1} , (d) 1 s^{-1} , and (e) 10 s^{-1}

修正后流变曲线的对比。由图 3 可知，摩擦修正后的流动应力均低于实测流动应力。这是因为摩擦效应的存在使 Ti60 合金由单向压应力状态转变为三向压应力状态，发生了不均匀变形，从而导致流动应力实测值偏高。为了更直观地反映摩擦效应对流动应力的影响，图 4 分别给出了应变速率为 0.01 和 1 s^{-1} 条件下 Ti60 合金实测流动应力与摩擦修正后的流动应力差值曲线。由图 4 可知，经摩擦修正前后的流动应力差值随着应变的增加而增大，这很好地体现了摩擦效应对流动

应力的影响随着应变增加而逐渐增大的特征^[11-13]，其他应变速率条件下的流动应力差值曲线也具有同样的特征，这说明摩擦修正后的流变曲线有效地消除了摩擦效应的影响。

2.2 温升效应修正

在热压缩过程中，变形试样吸收设备所输入的功率主要通过微观组织演变（动态回复、动态再结晶、相变等）和塑性变形产生的热能（温升效应）这 2 种途径来进行耗散。流动软化是材料流变曲线的一种常

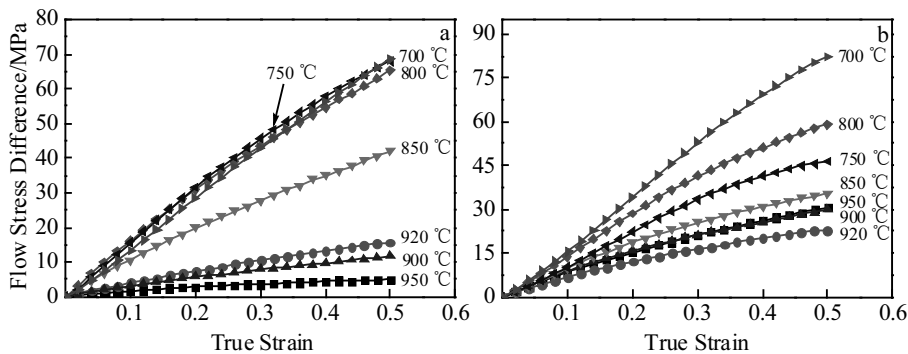


图 4 应变速率为 0.01 和 1 s^{-1} 条件下 Ti60 合金实测流动应力与摩擦修正后流动应力的差值曲线

Fig.4 Flow stress difference curves of the measured and the friction-corrected flow curves of Ti60 alloy under strain rate of

0.01 s^{-1} (a) and 1 s^{-1} (b)

见特征，它可以由微观组织演变或温升效应或两者综合作用所致。因此，为了消除温升效应对等温恒变速率压缩流动应力的影响，有必要对实测流变曲线进行温升修正，以反映真实的等温变形条件下的流动应力行为。

在热压缩过程中，由温升效应导致材料升高的温度 ΔT 可用式 (4) 来计算^[14]：

$$\Delta T = \frac{0.95\eta \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon}{\rho C_p} \quad (4)$$

式中，0.95 为塑性功转化为热能的效率， $\int_0^\epsilon \sigma d\epsilon$ 为塑性功， ρ 和 C_p 分别为材料密度和比热容， η 为绝热修正系数，其值变化范围为 0 (等温条件) 到 1 (绝热条件)，且可由式 (5) 来计算^[15]：

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{h}{x_w \rho C_p} \frac{\Delta \epsilon}{\dot{\epsilon}}} \quad (5)$$

式中， h 为整体传热系数，其与试样热导率，模具热导率，试样与模具界面的热传导系数之间的关系可用式 (6) 来表示； x_w 为热压缩后试样高度的一半，其与应变变化量 $\Delta \epsilon$ 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间的关系可用式 (7) 来表示：

$$h = \left[\frac{x_w}{K_w} + \frac{1}{HTC} + \frac{x_D}{K_D} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_w = x_0 e^{(-\dot{\epsilon}t)} \\ t = \Delta \epsilon / \dot{\epsilon} \end{cases} \quad (7)$$

式中， K_w 为试样热导率，HTC 为变形试样与模具材料之间界面的热传导系数， x_D 为模具表面处与模具内部温度均匀处之间的距离， K_D 为模具热导率， x_0 为热压缩前试样高度的一半， t 为变形时间。

查阅相关文献^[16,17]可得，Ti60 合金 $\rho=4440 \text{ kg/m}^3$ ， $K_D=26 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ， $HTC=10 \text{ kW/(m}^2\cdot\text{K)}$ ， $x_D=0.0015 \text{ m}$ ，其中不同变形温度条件下的 C_p 和 K_w 如表 1 所示。

通过式 (5) ~ (7) 可求得不同变形条件下 Ti60 合金的绝热修正系数 η 值。图 5 分别给出了变形温度 700 和 950 °C 条件下的绝热修正系数 η 值。由图 5 可知， η 值随着应变的增加和应变速率的降低而减小，且当应变速率高于 1 s^{-1} 时，绝热修正系数接近于 1。经检验发现，其他变形温度条件下的绝热修正系数 η 值也呈现同样的特征。由图 5 还可知，随着变形温度的变化， η 值基本不变。由此可以说明，绝热修正系数 η 只与应变速率和变形量有关，而不受变形温度的影响。

表 1 Ti60 合金的比热容 C_p 和材料热导率 K_w
Table 1 Specific heat capacity and material thermal conductivity of Ti60 alloy

Deformation temperature/°C	Specific heat capacity, $C_p/\times 10^8 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Thermal conductivity, $K_w/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
700	7.27	13.8
750	7.30	14.0
800	7.39	14.8
850	7.45	15.3
900	7.51	15.8
920	7.55	16.0
950	7.57	16.3

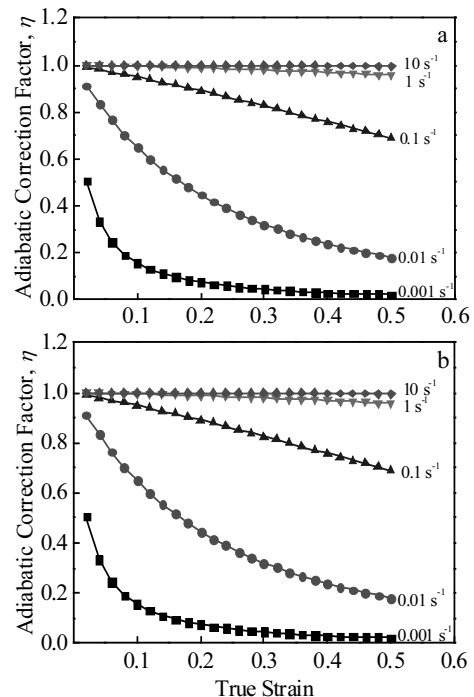


图 5 700 和 950 °C 条件下 Ti60 合金的绝热修正系数 η 值
Fig.5 Adiabatic correction coefficients of Ti60 alloy under deformation temperature of 700 °C (a) and 950 °C (b)

通过式 (4) ~ (7) 可求得 Ti60 合金在不同变形条件下的温升情况，其结果如图 6 所示。由图 6 可知，温升效应随着变形温度降低和应变速率升高而明显增加。在低应变速率范围 ($0.001\sim 0.01 \text{ s}^{-1}$) 变形时，温升不明显，最高温升不超过 14 °C (见图 6a~6b)；而在高应变速率范围 ($0.1\sim 10 \text{ s}^{-1}$) 变形时，温升明显，最高温升接近 85 °C (见图 6c~6e)。由图 6 还可知，随着应变的增加，温升在低应变速率范围 ($0.001\sim 0.01 \text{ s}^{-1}$) 先增大后减小；而在高应变速率范围 ($0.1\sim 10 \text{ s}^{-1}$) 持续增大。这主要是因为，在低应变速率范围 ($0.001\sim 0.1 \text{ s}^{-1}$) 变形时，由于变形时间长，塑性功产生的温升在变形阶段后期有较充分的时间发生热交换散热，导致

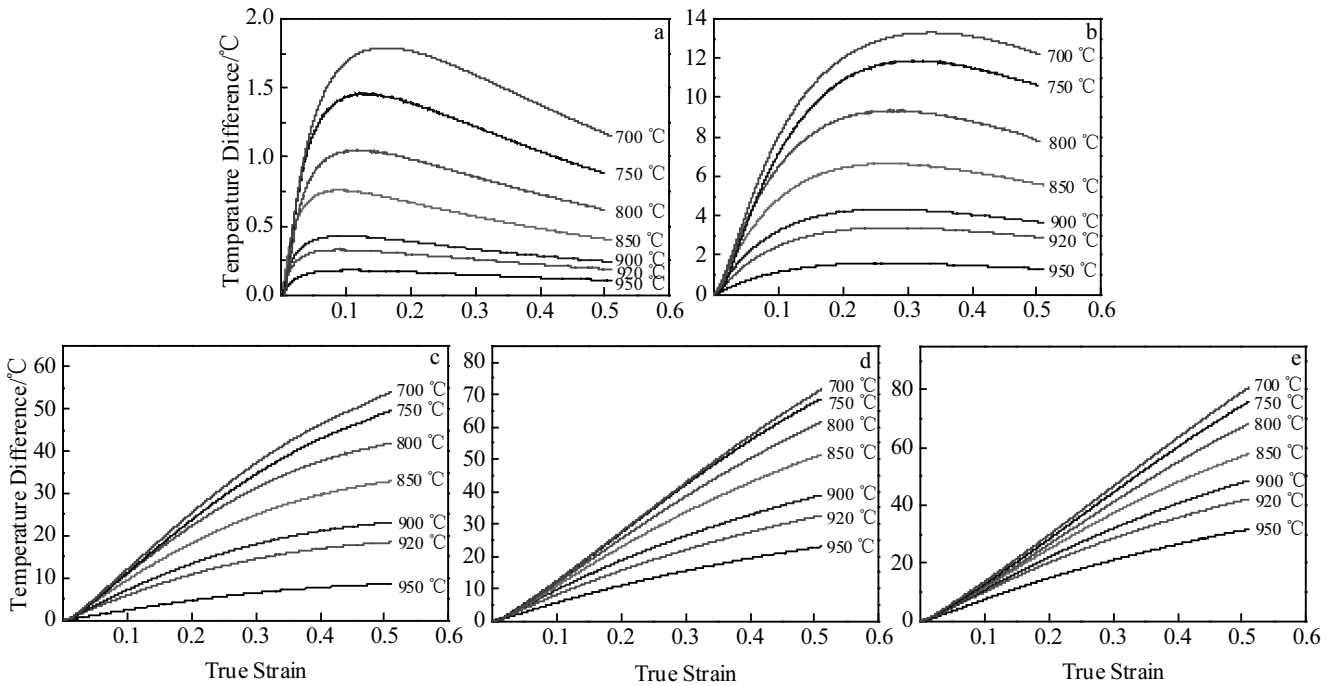


图 6 Ti60 合金不同变形条件下的温升情况

Fig.6 Temperature difference of Ti60 alloy under different deformation conditions: (a) 0.001 s⁻¹, (b) 0.01 s⁻¹, (c) 0.1 s⁻¹, (d) 1 s⁻¹, and (e) 10 s⁻¹

温升随着应变的增加呈现先增大后减小的特征；而在高应变速率范围（0.1~10 s⁻¹）变形时，由于变形时间较短，塑性功产生的温升来不及发生热交换散热，导致温升随着应变的增加呈现持续增大的特征。

温升修正后的流动应力可由式（8）来计算^[11]：

$$\sigma = \sigma_f - \left. \frac{\partial \sigma}{\partial (T_{\text{test}} + \Delta T)} \right|_{\epsilon, \dot{\epsilon}} \Delta T \quad (8)$$

式中， σ 为经摩擦和温升修正后的流动应力， $\left. \frac{\partial \sigma}{\partial (T_{\text{test}} + \Delta T)} \right|_{\epsilon, \dot{\epsilon}}$ 为流动应力的温度敏感性， T_{test} 为实测变形温度。

在摩擦修正的基础上，通过式（4）~（8）可求得不同变形条件下 Ti60 合金经温升修正后的流动应力值。图 7 给出了 Ti60 合金摩擦修正流变曲线以及摩擦和温升修正流变曲线的对比。由图 7 可知，在低应变速率（0.001~0.01 s⁻¹）范围变形时，由于温升效应不明显，对流动应力的影响不大，所以 2 种流变曲线几乎重叠（见图 7a~7b）；而在高应变速率（0.1~10 s⁻¹）范围变形时，由于温升效应较明显，对流动应力的影响较大，所以 2 种流变曲线偏离较大（见图 7c~7e），且随着变形温度的降低和应变速率的升高，偏离程度越大，亦即随着变形温度降低和应变速率升高，温升效应越显著。

图 8 所示为 Ti60 合金在不同热变形条件下的微观组织金相照片。其中图 8a 和 8b 为实测流动稳态型曲线所对应的变形微观组织，图 8c 和 8d 为实测流动软化型曲线所对应的变形微观组织。由图 8 可知，流动稳态型曲线和流动软化型曲线所对应的变形微观组织基本一致，即 Ti60 合金中的原始等轴状的初生 α 相（见图 1）均沿垂直于压缩轴方向被压扁成短条状，呈现出典型的动态回复组织特征，组织中未发现动态再结晶现象，在晶界上也未发现动态再结晶小晶粒的存在。这说明 Ti60 合金在 700~950 °C，0.001~10 s⁻¹ 条件下的软化机制是以动态回复为主。

通常，当合金的流动软化机制以动态回复为主时，其流变曲线往往呈现流动稳态型^[18,19]，而 Ti60 合金的实测流变曲线（见图 3）在不同的变形条件下，除了呈现流动稳态型特征，还呈现流动软化型特征，这说明实测流动曲线受摩擦和温升效应的影响，并不能反映 Ti60 合金真实的流动应力行为。

考虑摩擦和温升效应对流动应力的影响，对流变曲线进行修正。修正后的流变曲线（见图 7）接近于流动稳态型，这证明了本研究对 Ti60 合金实测流变曲线所进行的摩擦和温升修正结果是正确的。

经摩擦和温升修正后的流变曲线有效地消除了热压

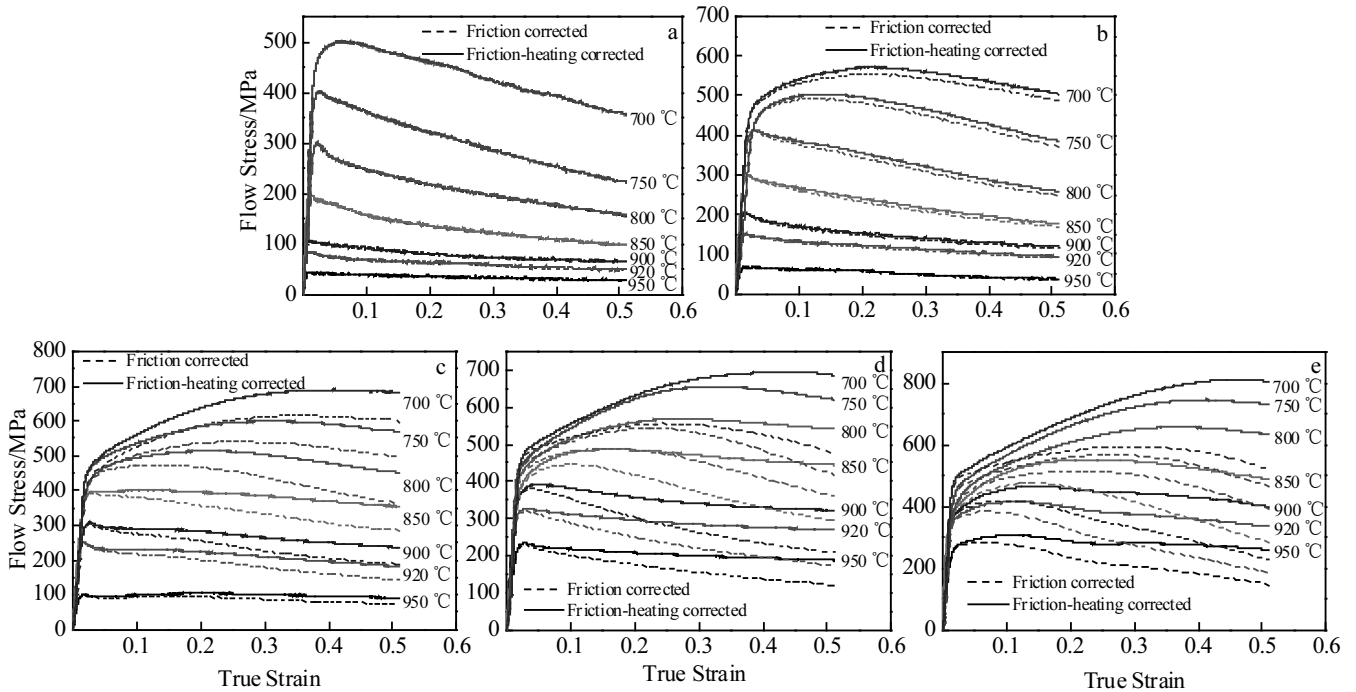


图 7 Ti60 合金摩擦修正流变曲线与摩擦和温升修正流变曲线对比

Fig.7 Comparison between friction corrected and friction-heating corrected flow curves of Ti60 alloy under different strain rates: (a) 0.001 s^{-1} , (b) 0.01 s^{-1} , (c) 0.1 s^{-1} , (d) 1 s^{-1} , and (e) 10 s^{-1}

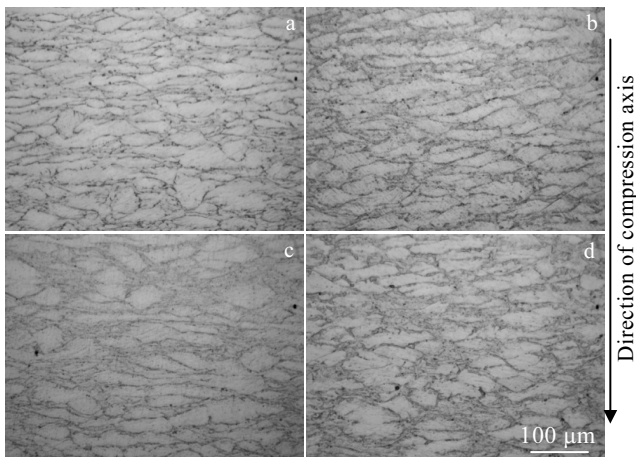


图 8 Ti60 合金在不同变形条件下微观组织的金相照片

Fig.8 Metallographic images of the microstructure of Ti60 alloy under different deformation conditions: (a) $0.01\text{ s}^{-1}/850\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $0.1\text{ s}^{-1}/950\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $1\text{ s}^{-1}/920\text{ }^{\circ}\text{C}$, and (d) $10\text{ s}^{-1}/900\text{ }^{\circ}\text{C}$

缩过程中的摩擦效应和温升效应，可以更准确地反映 Ti60 合金在等温恒应变速率条件下流动应力对真应变的动态响应。

3 结 论

1) Ti60 合金实测流变曲线经摩擦修正后，其修正流动应力低于实测流动应力，且摩擦修正前后的流动应力差值随应变的增加而增大，这说明摩擦修正后的流变曲线有效地消除了摩擦效应的影响。

2) 摩擦修正后的 Ti60 合金流变曲线经温升修正后的结果表明，温升效应随着变形温度降低和应变速率升高而增加。

3) Ti60 合金在低应变速率范围 ($0.001\sim 0.01\text{ s}^{-1}$) 变形时，温升不明显，最高温升不超过 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且温升随着应变增加，呈现先增大后减小的特征；在高应变速率范围 ($0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$) 变形时，温升明显，最高温升接近 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且温升随着应变增加呈现持续增大的特征。

4) Ti60 合金实测流变曲线接近于流动软化型，但经摩擦和温升修正后的流变曲线接近于流动稳态型，这说明实测曲线中的流动软化行为主要是因为温升所引起的。

5) 经摩擦和温升修正后的流变曲线有效地消除了热压缩过程中的摩擦效应和温升效应，可以更准确地反映 Ti60 合金在等温恒应变速率条件下的流动应力对真应变的动态响应。

参考文献 References

- [1] Boyer R R. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 213(1-2): 103
- [2] Wang Z, Wang X, Zhu Z. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 692: 149
- [3] Wei Shouyong(魏寿庸), Shi Weiming(石卫民), Wang Dingchun(王鼎春) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 801
- [4] Zhao Z L, Li H, Fu M W et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 617: 525
- [5] Banerjee D, Williams J C. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(3): 844
- [6] Luo Wenzhong(罗文忠), Sun Feng(孙峰), Zhao Xiaohua(赵小花) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3967
- [7] Ebrahimi R, Najafizadeh A. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 152(2): 136
- [8] Zhang J Q, Di H S, Wang X Y et al. *Materials and Design*[J], 2013, 44: 354
- [9] Li Y P, Onodera E, Matsumoto H et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2009, 40(5): 982
- [10] Zhu R H, Liu Q, Li J F et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(3): 404
- [11] Gao Wenli(高文理), Guan Yufei(关宇飞). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2018, 28(9): 1737
- [12] Duan Yuanpei(段园培), Huang Zhongjia(黄仲佳), Yu Xiaolu(余小鲁) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2014, 38(2): 202
- [13] Li Hongbin(李红斌), Lin Xiaolin(李小林), Xu Shucheng(徐树成) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2016, 233(3): 152
- [14] Liang X P, Liu Y, Li H Z et al. *Materials and Design*[J], 2012, 37: 40
- [15] Mostafaei M A, Kazeminezhad M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 535: 216
- [16] Rebelo N, Kobayashi S. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1980, 22(11): 699
- [17] Goetz R, Semiatin S. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2001, 10(6): 710
- [18] Mcqueen H J, Ryan N D. *Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 322(1): 43
- [19] Nie X A, Hu Z, Liu H Q et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 613(8): 306

Correction of Flow Curve of Ti60 Alloy Considering Effects of Friction and Heating

Wang Tianxiang, Lu Shiqiang, Wang Kelu, Ouyang Delai, Yao Quan

(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Thermecmaster-Z thermal processing simulation machine was used to conduct isothermal compression tests on Ti60 alloy, and the flow curves of the alloy were obtained under the conditions of deformation temperature 700~950 °C, strain rate 0.001~10 s⁻¹ and true strain 0.51. The flow curves of Ti60 alloy were corrected by considering the effect of friction and heating on flow stress. The results show that the effect of friction and heating has significant influence on the flow stress of Ti60 alloy. The influence of friction expands with the increase of strain, while the influence of heating expands with the decrease of deformation temperature and the increase of strain rate. The flow curve presents flow steady type after correcting by the effect of friction and heating, which can more accurately reflect the dynamic response of the flow stress of Ti60 alloy to the true strain.

Key words: Ti60 alloy; flow stress; friction effect; heating effect

Corresponding author: Lu Shiqiang, Ph. D., Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: niatlusq@126.com