

6013 铝合金平面热压缩流变应力曲线修正与本构方程

肖 罡^{1,2}, 李落星^{1,2}, 叶 拓^{1,2}

- (1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;
2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 采用 Gleeble-3500 热模拟机研究 6013 铝合金在 613~773 K、0.001~10 s⁻¹ 下的平面应变流变力学行为。基于热传导对材料变形热效应的影响, 优化材料变形温升的计算方程, 分析变形能及热传导对实测流变应力误差的影响。结果表明: 热传导对变形温升的影响不可忽略, 其影响随着真应变的增加和应变速率的降低而更加显著; 通过热传导对变形温升的修正, 变形温升随变形能的增大呈非线性变化趋势; 在较高应变速率和较低变形温度下, 变形能及热传导对材料变形温升及稳态流变应力的影响明显; 可用包含 Zener-Hollomon 参数(Z)的本构方程预测 6013 铝合金在不同变形条件下的流变应力峰值, 其热变形激活能为 364.48 kJ/mol; 修正的实测峰值应力与预测值的吻合程度有所提高, 平均相对误差为 5.54%。

关键词: 6013 铝合金; 平面热压缩; 流变应力; 热传导; 瞬时温升; 本构方程
中图分类号: TG146 **文献标志码:** A

Modification of flow stress curves and constitutive equations during hot plane compression deformation of 6013 aluminum alloy

XIAO Gang^{1,2}, LI Luo-xing^{1,2}, YE Tuo^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The hot plane compression deformation behavior of 6013 aluminum alloy was investigated on Gleeble-3500 thermal-mechanical simulating tester in the temperature range from 613 to 773 K and strain rate range from 0.001 to 10 s⁻¹. The mathematical expression of temperature rising is optimized based on the influence of the heat conduction during hot deformation. Meanwhile, the effects caused by deformation energy and heat conduction on the measured stress errors were analyzed. The results show that the influence of heat conduction cannot be neglected and becomes more obvious with increasing true strain and decreasing strain rate. The relationship between the change of temperature rising corrected by heat conduction and deformation heating is nonlinear. The temperature rising and the steady flow stress are seriously affected by deformation energy and heat conduction during higher strain rate and lower temperature. The peak flow stress can be represented by the Zener-Hollomon parameter (Z) in the hyperbolic sine equation with the hot deformation activation energy of 364.48 kJ/mol. The corrected measured value exhibits a better agreement with the flow stress predicted by the constitutive equation, and the average relative error is 5.54%.

Key words: 6013 aluminum alloy; hot plane compression deformation; flow stress; heat conduction; instantaneous temperature rising; constitutive equation

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAG03B02); 国家自然科学基金面上项目(51075132); 长沙市科技重大专项(K1204008-11-1); 车身先进设计与制造国家重点实验室基金资助项目(61075005)

收稿日期: 2013-10-28; **修订日期:** 2013-12-20

通信作者: 李落星, 教授, 博士; 电话: 0731-88821571; E-mail: luoxing_li@yahoo.com

在金属热变形过程中,流变应力是表征金属塑性变形性能的一个重要参数,是研究金属高温变形物理本质的重要途径,在研究金属塑性变形理论及制定热加工工艺方案等方面均具有重要意义^[1-3]。

采用热压缩实验研究金属流变行为时,变形能引起的实测误差不容忽视。GOELZ 等^[4]和 DEVADAS 等^[5]指出在应变速率大于 0.001 s^{-1} 时,变形能对流变应力的影响不可忽略;吴文祥等^[6]和 WANG 等^[7]分别在研究 2026 铝合金和 Al-15%Si 合金的热变形流变应力行为时,基于变形能修正了高应变速率下的稳态流变应力;ZHANG 等^[8]在研究 Fe-23Mn-2Al-0.2C 钢的热变形流变行为时发现,仅考虑变形能对流变应力的修正存在不合理性,因此,他们通过修正不同应变速率下的热效率(η)加以完善。通过对实验过程的进一步分析发现,热压缩实验虽处真空状态,但并非绝热过程,仅修正热效率仍不足以准确描述热传导产生热能损失的影响,因此,有必要进一步探究金属热压缩变形过程中的热传导对变形温升及流变应力的影响。

本文作者基于金属热压缩实验过程中热传导特性的研究,探讨热传导对材料变形热效应的影响,推导并优化金属因变形能而产生瞬时温升的计算方程,对 6013 铝合金实测流变应力曲线进行修正。

1 实验

1.1 实验方法

采用 10 kg 电阻式坩埚炉熔炼,在 1003 K 下,经 C_2Cl_6 除气后,浇注为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的方锭;合金成分为 Al-0.95Mg-0.75Si-0.9Cu-0.35Mn-0.3Fe (质量分数, %);试样经 813 K、15 h 均匀化处理后,加工成 $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的长方体平面热压缩试样,试样高度为铸锭厚度方向。

在 Gleeble-3500 热模拟机上进行等温热压缩实验(压缩方式见图 1)。为减小摩擦的影响,试样两侧涂抹润滑剂并覆盖减磨石墨片,润滑剂为 75%石墨+20%机油+5%硝酸三甲苯脂(质量分数)。实验的初始温度分别设定为 613、653、693、733 和 773 K,以 10 K/s 的速度加热后保温 60 s;应变速率分别为 0.001、0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} ,总应变量为 0.8(真应变)。

1.2 实验结果

6013 铝合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线如图 2 所示。由图 2 可知,流变应力随着变形温度降低和应变速率升高显著增大;变形初期,流变应

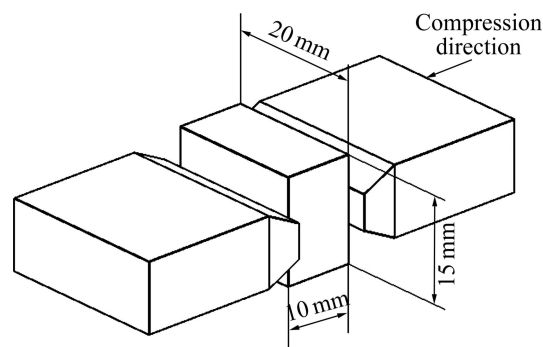


图 1 平面应变热压缩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hot plane compression

力随真应变的增加迅速增大,达到峰值后逐渐减小,表现出流变软化的特征,直到趋于水平时基本保持恒定,加工硬化与流变软化达到平衡。

2 分析与讨论

金属塑性变形时会消耗大量能量,除小部分以储能的形式保留在金属中外,绝大部分转化为热能^[6-7]。在低应变速率下($\dot{\epsilon} < 1 \text{ s}^{-1}$ 时),变形时间较长,经热能耗散及设备补热,可近似认为是等温变形过程;而在高应变速率下($\dot{\epsilon} \geq 1 \text{ s}^{-1}$ 时),变形时间较短,受热电偶灵敏度的限制,会出现数据滞后现象,同时,因变形能产生的热能来不及散失,将促使试样温度瞬时急剧上升,导致实测数据失真。由平面热压缩变形过程(见图 3)可知,变形过程中压头与试样紧密接触,试样变形区域的体积相对未变形区域和压头体积较小;另外,热压缩实验为非绝热过程,接触热传导将弱化因变形能引起的试样变形瞬时温升程度。综上所述,热模拟实验获得的金属在高应变速率下热变形流变应力需要通过变形能及热传导进行修正。

2.1 变形能和热传导对变形温度的影响

研究表明^[4],变形能造成的材料变形瞬时温升为

$$\Delta T = \frac{\eta_0 Q_{\text{def}}}{\rho c V_{\text{def}}} \quad (1)$$

根据能量守恒定律及热传导影响,将式(1)修正为

$$\Delta T = \frac{\eta_0 Q_{\text{def}} - \Delta Q}{\rho c V_{\text{def}}} = \frac{\eta_0 Q_{\text{def}} - \eta_1 \Delta Q_1 - \eta_2 \Delta Q_2}{\rho c V_{\text{def}}} \quad (2)$$

式中: Q_{def} 为变形能; ΔQ 为因热传导散失的热能; ΔQ_1 和 ΔQ_2 分别为试样变形区域向压头和未变形区域传导

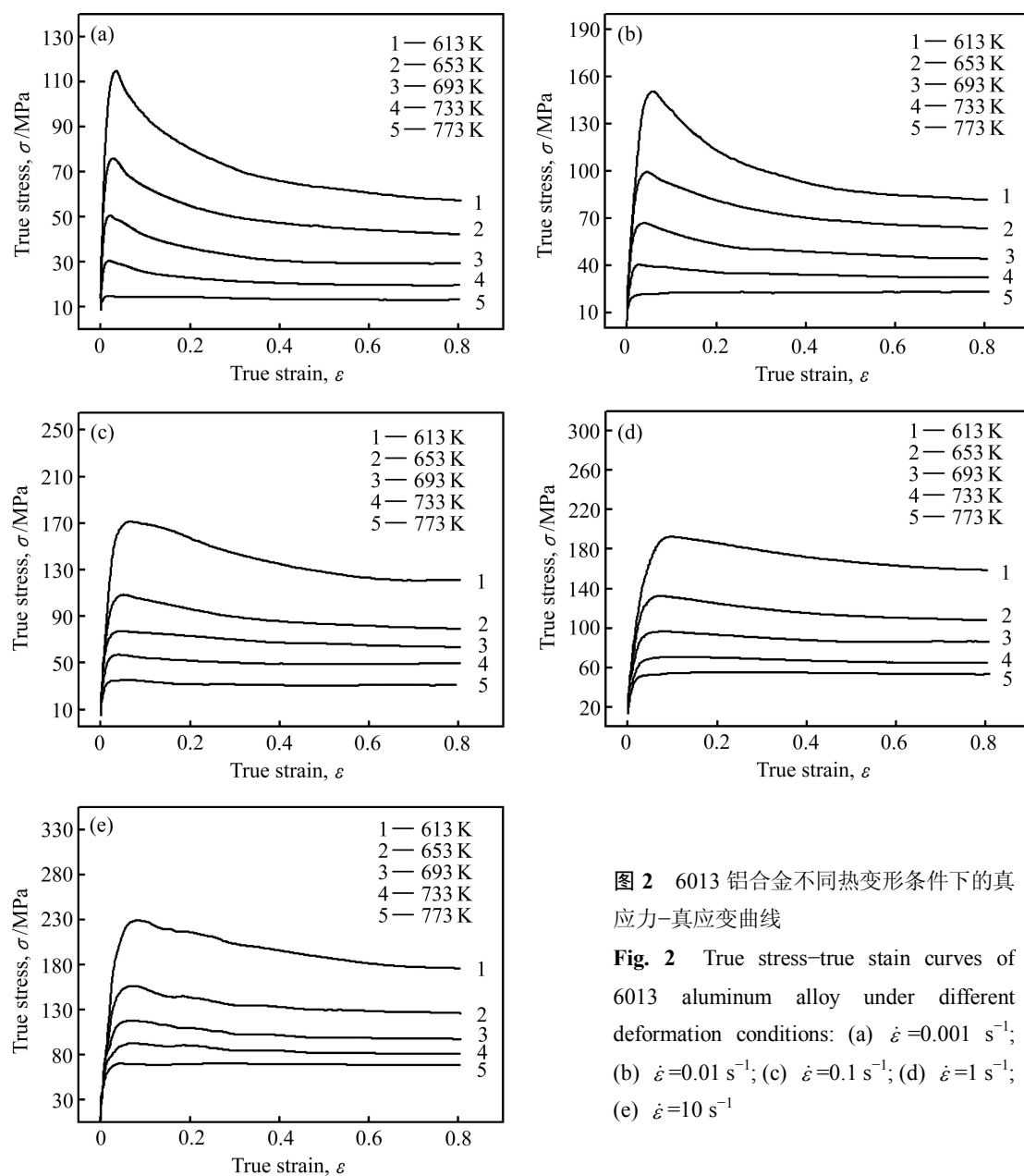


图2 6013 铝合金不同热变形条件下的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of 6013 aluminum alloy under different deformation conditions: (a) $\dot{\varepsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\varepsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\varepsilon}=1 \text{ s}^{-1}$; (e) $\dot{\varepsilon}=10 \text{ s}^{-1}$

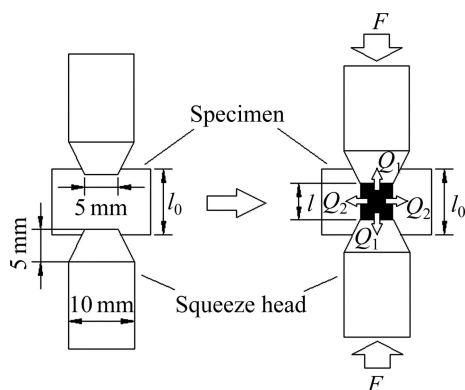


图3 平面热压缩过程中试样的变形过程

Fig. 3 Deformation process of specimen during hot plane compression

的热能; η_0 为热效率, 取 0.85~0.95^[9]; η_1 和 η_2 分别为热传导修正系数; ρ 为合金密度; c 为合金比热容; V_{def} 为试样变形区域体积。其中, 变形能可表示为

$$Q_{\text{def}} = \bar{\sigma} \Delta \varepsilon V_{\text{def}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为应变间隔; $\bar{\sigma}$ 为平均应力, 可表示为

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\Delta \varepsilon} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \Delta \varepsilon} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

由于试样变形区域与压头的材料不同, 需要分别根据接触换热热流密度 q_1 及传热热流密度 q_2 ^[10-11]

$$q_1 = h \Delta T_1 \quad (5)$$

$$q_2 = \frac{\lambda \Delta T_2}{d} \quad (6)$$

求得

$$\Delta Q_1 = 2q_1 S_1 t = 2S_1 h t \Delta T_1 \quad (7)$$

$$\Delta Q_2 = 2q_2 S_2 t = \frac{2S_2 \lambda t}{d} \Delta T_2 \quad (8)$$

式中: S_1 和 S_2 为接触面积; h 为铝钢接触换热系数, h 值取 $1500 \sim 2500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{[10-12]}$; λ 为铝合金传热系数, λ 值取 $150 \sim 250 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{[10]}$; t 为热传导时间; d 为垂直接触面的试样厚度; ΔT_1 和 ΔT_2 分别为试样变形区域与压头和非变形区域的温度差。

平面热压缩过程中, 压头的体积远大于试样变形区域的体积, 因此, 可近似认为压头的温度是恒定不变的, 即 $\Delta T_1 \approx \Delta T$; 试样任意一侧未变形区域的体积均为变形区域的两倍以上, 可认为热传导对未变形区域温度影响很小, 由此近似认为 $\Delta T_2 \approx \Delta T$; 通过 η_1 和 η_2 的修正, 在一定程度上减少近似计算产生的误差, η_1 取值为 $0.9 \sim 0.95^{[10-12]}$ 、 η_2 取值为 $0.8 \sim 0.9^{[10]}$ 。将式(3)、(4)、(7)和(8)代入式(2)中, 可得热传导修正的金属热变形瞬时温升计算方程

$$\Delta T = \frac{\eta_0 V_{\text{def}} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \Delta \varepsilon} \sigma d\varepsilon}{2\eta_1 S_1 h t + 2\eta_2 \frac{S_2 \lambda t}{d} + \rho c V_{\text{def}}} \quad (9)$$

根据式(1)和(9)可分别计算出应变速率为 10 s^{-1} 和 1 s^{-1} 时, 不同预设变形温度下, 6013 铝合金热传导修正前后变形瞬时温升 ΔT (见图 4)。据文献[9-12], 本文作者取以下参数值进行近似计算: 铝合金与钢压头的接触换热系数 $h=2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 6013 铝合金传热系数 $\lambda=180 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 变形能转化率 $\eta_0=0.9$; 热传导修正系数 $\eta_1=0.95$ 和 $\eta_2=0.85$ 。

图 4 显示, 热传导修正后的变形温升随着预设温度的降低和应变速率的增大而升高, 在应变速率为 1 和 10 s^{-1} 下, 最大温升分别由预设 773 K 时的 2.1 和 12.1 K 增至 613 K 时的 6.5 和 33.8 K 。对比修正前后的温升曲线可知, 热传导对材料变形温升影响明显, 随着真应变的增加和应变速率的降低而更加显著, 且改变了修正前的近似线性关系, 呈现出先快后慢的温升趋势。图 5 所示为修正后 $\dot{\varepsilon}=1 \text{ s}^{-1}$ 时预设 613 K 的变形温升及温升速率变化曲线图。由图 5 分析可知, 热传导修正将温升速率变化趋势改变为迅速增大至峰值后逐渐下降至较低水平 (甚至降至负值), 进一步说明热传导对变形温升趋势的影响显著, 且呈非线性关系, 仅通过修正不同应变速率下的热效率无法准确描述。

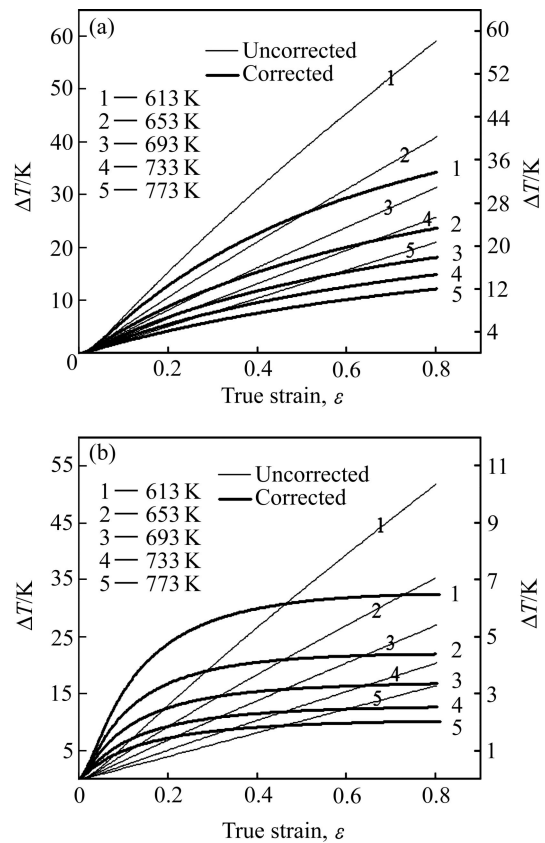


图 4 6013 铝合金在不同预设变形温度和应变速率下的瞬时温度变化

Fig. 4 Variation of instantaneous temperatures of 6013 aluminum alloy during hot compression tests at different pre-set deformation temperatures and different strain rates: (a) $\dot{\varepsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon}=1 \text{ s}^{-1}$

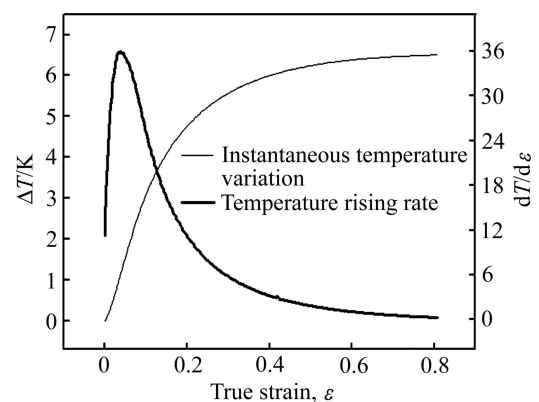


图 5 6013 铝合金在 613 K 和 1 s^{-1} 变形条件下的瞬时温度变化及温度变化速率

Fig. 5 Variation and rising rate of instantaneous temperature with true strain during hot compression tests at 613 K and 1 s^{-1}

热传导修正导致变形温升及温升速率的特殊变化趋势, 可能有如下因素影响: 1) 随着应变速率和变形温度的降低, 变形抗力减小, 变形能相应降低; 2) 根据

流变应力曲线演化规律, 应力随着应变的增加, 先达到峰值后下降至平稳状态, 同时, 变形能的增量与应力呈正比关系, 所以材料在变形过程中, 变形能增加的速度随着变形量的增大先迅速增大后逐渐减慢; 3) 在应变速率一定的情况下, 变形时间与变形量呈正比关系, 随着变形量的不断增大, 热散失的时间也相应不断增长; 4) 变形区域的热能散失速度与 ΔT 呈正比关系, 随着变形量的逐渐增大, 热损失速度会随着 ΔT 的增大而不断加快。

2.2 变形温升对流变应力的影响

DEVADAS 等^[5]的研究结果表明, 温度变化对合金流变应力的影响可表示为

$$\Delta\sigma = \frac{Q}{n\alpha R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T + \Delta T} \right) \quad (10)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为瞬时温升对应力的影响; n 为应力指数; α 为应力水平参数; R 为摩尔气体常数; T 为预设变形温度; Q 为材料热变形激活能。

1) n 、 α 和 Q 的求解

可采用以下函数描述金属高温塑性变形^[13-15]

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (13)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (14)$$

且 α 、 β 和 n 三者之间满足关系式

$$\alpha = \frac{\beta}{n} \quad (15)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 α 和 β 均为常数, A_1 、 A_2 和 A 为结构因子; n_1 为应力指数; σ 为真应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。在热变形过程中, 式(11)适用于低应力水平 ($\alpha\sigma < 0.8$); 式(12)适用于高应力水平 ($\alpha\sigma > 1.2$); 式(13)适用于所有应力状态。

由式(11)~(13)取自然对数后得

$$n_1 = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right)_T \quad (16)$$

$$\beta = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \right)_T \quad (17)$$

$$n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T \quad (18)$$

根据图 2 数据及式(15)~(18)可求得: $\alpha = 0.01566$,

$\beta = 0.1033$, $n = 5.879$ 。通过反复计算, 可得到更加精确的 α 、 β 和 n 值。

由式(13)取自然对数后求偏导可得

$$Q = R \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T \left[\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (19)$$

令式(19)中 $K = \partial [\ln \sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T)$, 则 $Q = RnK$ 。根据图 2 数据可求得 $K = 7.457$; 则有 $Q = 364.48$ kJ/mol。

对式(14)取自然对数可知, $\ln A$ 为直线 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 的截距。求出 Z 值并绘制 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 图(见图 6), 用最小二乘法线性回归得 $\ln A = 57.8468$ 。由图 6 可知, 在不同变形条件下的应力与 Z 参数均呈良好的线性关系, 表明 6013 铝合金的热变形流变应力行为符合包含 Z 参数的双曲正弦函数关系。

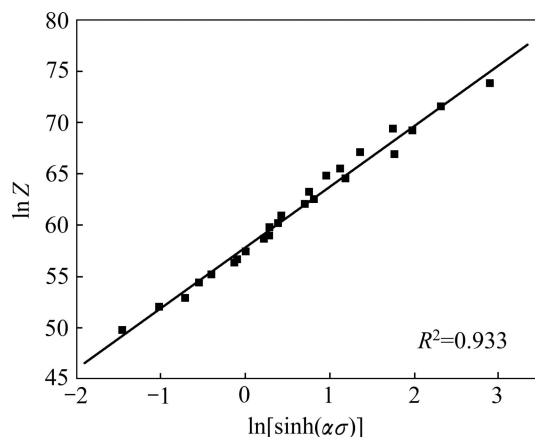


图 6 6013 铝合金的流变应力与 Z 参数的关系 ($\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$)

Fig. 6 Relationship between flow stress and Zener-Hollomon parameter (Z) of 6013 aluminum alloy ($\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$)

2) $\Delta\sigma$ 的求解与分析

将求得的各项材料参数代入式(10)中, 可分别计算得到在 $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ 时, 不同变形温度下产生的应力变化。图 7 所示为 6013 铝合金在不同变形条件下真应力-真应变曲线修正前后的对比情况。

由图 7 可知, 变形温升对高应变速率下流变应力的影响显著, 与变形能及热传导对温升程度的影响趋势一致, 热传导使 $\Delta\sigma$ 随应变增加的速度减慢; 变形温升的修正对流变应力峰值影响不大, 稳态流变应力软化趋势在修正后被不同程度减弱, 但仍表现出流变软化特征; 在应变速率较低水平 ($\dot{\epsilon} < 1 \text{ s}^{-1}$) 时, 变形温升对热压缩实验的实测流变应力影响可忽略。由图 7

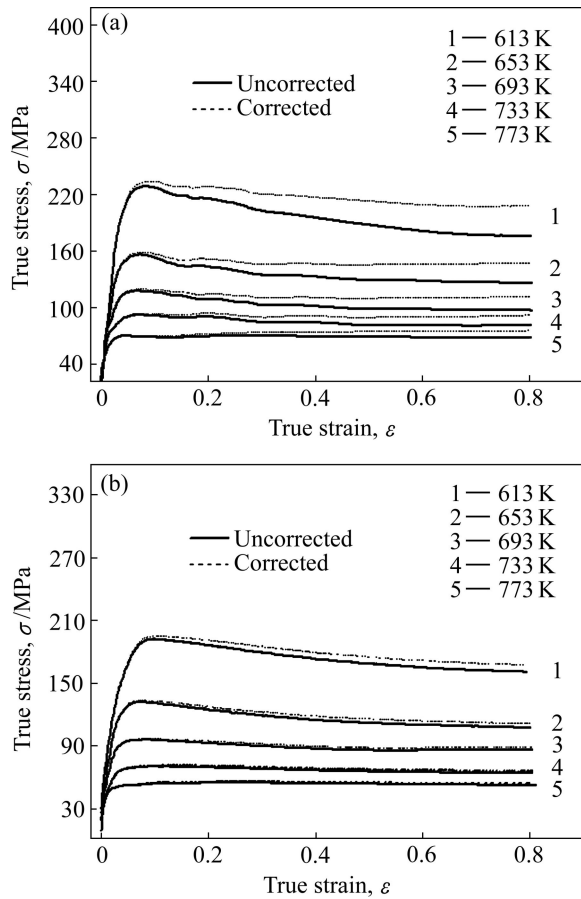


图7 6013 铝合金在不同变形条件下真应力-真应变曲线修正前后的对比

Fig. 7 Comparison between corrected and uncorrected true stress-true strain curves of 6013 aluminum alloy under different deformation conditions: (a) $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

计算结果可知,在预设变形温度为 613 K,当 $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ 时,温升造成的流变应力软化 $\Delta\sigma_{\max} = 40.6 \text{ MPa}$,较实测值高出近 20%;而在 773 K 下,当 $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ 时,应力软化 $\Delta\sigma_{\max} = 1.62 \text{ MPa}$,较实测值仅高出 2.97%。

2.3 峰值应力本构方程的验证

将求得的各项材料参数代入转换形式的式(14)中,得出 6013 铝合金流变应力峰值本构方程

$$\sigma = \frac{1}{0.01566} \ln \left\{ \left[\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{364480}{8.314T}\right)}{1.326 \times 10^{25}} \right]^{\frac{1}{5.879}} + \left[\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{364480}{8.314T}\right)}{1.326 \times 10^{25}} \right]^{\frac{2}{5.879}} + 1 \right\} \quad (20)$$

图8所示为修正后的 6013 铝合金流变应力峰值与本构方程计算值的对比。

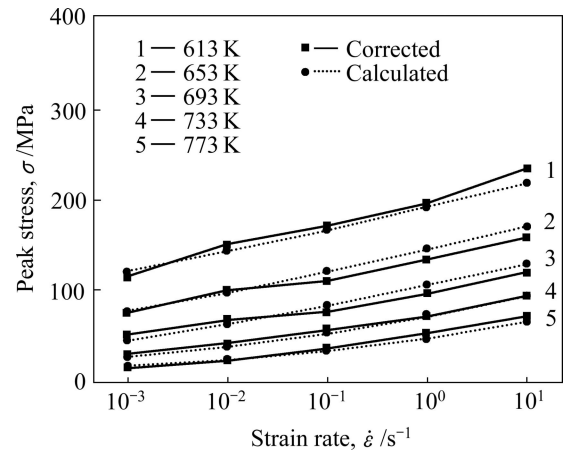


图8 6013 铝合金在不同变形条件下的修正峰值应力与计算值的对比

Fig. 8 Comparison between corrected and calculated peak stress of 6013 aluminum alloy under different deformation conditions

由图8可知,修正的实测应力峰值与计算值吻合较好。为了更好地分析实测与计算值间的误差情况,引入以下误差分析表达式

$$R_{\text{err}} = \frac{\sigma_E - \sigma_C}{\sigma_E} \times 100\% \quad (21)$$

$$R_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{Ei} - \sigma_{Ci}}{\sigma_{Ei}} \right| \times 100\% \quad (22)$$

式中: σ_E 为流变应力实测值; σ_C 为流变应力计算值; R_{err} 为相对误差; R_{ave} 为平均相对误差。

根据式(21)和(22)的计算,可得出本构方程的预测值与实测应力峰值的误差,在应变速率较低时,相对误差较小;温升修正后的各峰值误差均不超过 10%;整体平均相对误差较修正前的 5.72% 降至 5.54%,其中,应变速率为 10 s^{-1} 和 1 s^{-1} 时,平均相对误差分别由 6.31% 和 6.27% 降至 5.98% 和 5.72%。

3 结论

1) 基于平面应变热模拟实验中热传导的研究,优化了平面热压缩变形的温升计算方程;热传导改变了修正前温升及温升速率的变化趋势,影响程度随真应变的增加和应变速率的降低而增大;通过热传导对变形温升的修正,变形温升随变形能的增大呈非线性变

化趋势。

2) 变形温升对高应变速率下 6013 铝合金流变应力的影响显著, 与变形能及热传导对温升程度的影响趋势一致, 热传导削弱了 $\Delta\sigma$ 随真应变增加的速度; 稳态流变应力软化趋势在修正后不同程度地减弱, 但仍表现出流变软化特征。

3) 6013 铝合金的热变形激活能为 364.48 kJ/mol, 其高温流变应力峰值 σ 与 ε 和 T 之间满足包含 Z 参数的双曲正弦函数关系, 本构方程的预测值与修正的实测值非常吻合, 平均相对误差仅为 5.54%。

REFERENCES

- [1] HUANG Chang-qing, DIAO Jin-peng, DENG Hua, LI Bing-ji, HU Xing-hua. Microstructure evolution of 6016 aluminum alloy during compression at elevated temperatures by hot rolling emulation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1576–1582.
- [2] LUO J, LI M Q, WU B. The correlation between flow behavior and microstructural evolution of 7050 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 530: 559–564.
- [3] 何振波, 李慧中, 梁霄鹏, 尹志民. Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金的热变形行为及加工图[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1220–1228.
- HE Zhen-bo, LI Hui-zhong, LIANG Xiao-peng, YIN Zhi-min. Hot deformation behavior and processing map of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1220–1228.
- [4] GOELZ R L, SEMIATIN S L. The adiabatic correction factor for deformation heating during the uniaxial compression test[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001, 10(6): 710–717.
- [5] DEVADAS C, BARAGAR D, RUDDLE G, SAMARASEKERA I V. Thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling. Part II: Factors influencing rolling loads[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(2): 321–333.
- [6] 吴文祥, 韩逸, 钟皓, 乐永康, 张辉. 2026 铝合金热压缩变形流变应力行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1403–1408.
- WU Wen-xiang, HAN Yi, ZHONG Hao, YUE Yong-kang, ZHANG Hui. Flow stress behavior of 2026 aluminium alloy under hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1403–1408.
- [7] WANG Chun-xia, YU Fu-xiao, ZHAO Da-zhi, ZHAO Xiang, ZUO Liang. Hot deformation and processing maps of DC cast Al-15%Si alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 577: 73–80.
- [8] ZHANG Jing-qi, DI Hong-shuang, WANG Xiao-yu, CAO Yu, ZHANG Jie-cen, MA Tian-jun. Constitutive analysis of the hot deformation behavior of Fe-23Mn-2Al-0.2C twinning induced plasticity steel in consideration of strain[J]. Materials & Design, 2013, 44(2): 354–364.
- [9] MATAYA M C, SACKSCHEWSKY V E. Effect of internal heating during hot compression on the stress-strain behavior of alloy 304L[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25(12): 2737–2752.
- [10] 王保国, 刘淑艳, 王新泉, 朱俊强. 传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 3–6, 278–289.
- WANG Bao-guo, LIU Shu-yan, WANG Xin-quan, ZHU Jun-qiang. Heat transfer[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 3–6, 278–289.
- [11] 朱德才, 张立文, 裴继斌, 张国梁, 韦荣选. 固态塑性成形过程中界面接触换热的实验研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 92–96.
- ZHU De-cai, ZHANG Li-wen, PEI Ji-bin, ZHANG Guo-liang, WEI Rong-xuan. Experiment research on the thermal contact conductance during the solid plastic forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(1): 92–96.
- [12] XU Rui-ping, FENG Hai-dong, ZHAO Lan-ping, XU Lie. Experimental investigation of thermal contact conductance at low temperature based on fractal description[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33(7): 811–818.
- [13] MCQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive analysis in hot working[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 322: 43–63.
- [14] SAMANTARAY D, MANDAL S, BHADURI A K. Constitutive analysis to predict high-temperature flow stress in modified 9Cr-1Mo(P91) steel[J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 981–984.
- [15] 张毅, 刘平, 田保红, 陈小红, 刘勇. Cu-Ni-Si-P-Cr 合金高温热变形行为及动态再结晶[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 970–976.
- ZHANG Yi, LIU Ping, TIAN Bao-hong, CHEN Xiao-hong, LIU Yong. Hot deformation behaviors and dynamic recrystallization of Cu-Ni-Si-P-Cr alloy at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 970–976.

(编辑 陈卫萍)