

热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金 Johnson-Cook 本构模型的建立与精度分析

王伟^{1,2}, 杜帅帅¹, 闫华军^{1,2}, 马世博^{1,2}, 张双杰^{1,2}, 穆振凯^{1,2}

(1. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

(2. 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北 石家庄 050018)

摘要: 锆铝合金是一种潜在的航空间材料, 采用真空热压烧结制备了 Zr-6Al-0.1B 合金, 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金在变形温度 950~1150 °C、应变速率 0.01~1 s⁻¹ 条件下进行等温压缩试验。结果表明, 在变形初期, 应力随应变增加急速升高, 迅速达到峰值。而后, 随着应变的增加应力持续减小, 而不存在应力平衡阶段。随着变形温度的降低或应变速率的增加, 应力-应变曲线整体向高应力区域偏移, 表明热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金属于变形温度和应变速率敏感材料。构建了热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金的 Johnson-Cook 本构模型, 对温度敏感系数 D 和应变速率敏感系数 C 进行了修正。通过模型预测值与试验值的定性和定量对比分析表明, 单独修正系数 C 时, 模型具有较高的预测精度。本研究可为热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金后续热加工工艺参数的选择提供指导, 并为相应的数值模拟研究提供可靠的本构模型。

关键词: Zr-6Al-0.1B 合金; 等温压缩试验; Johnson-Cook 本构模型; 模型修正; 精度分析

中图分类号: TG146.4⁺14

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)06-2111-07

锆合金具有良好的耐腐蚀、耐蠕变和抗辐射性等特点, 在核工业、化工、航天等领域都有具有良好的应用潜力, 但是锆合金的制备成本高、加工难度大, 在一定程度上限制了其规模化应用^[1-3]。

相关研究表明, Al 能有效提高 Zr 的 α - β 转变温度, 是 α 相的稳定元素, 进而提高合金的强度^[4]。此外, Al 在 α -Zr 中的最大固溶度为 3.3%, 当 Zr 中 Al 的含量超过固溶度时, 会形成 Zr₃Al、Zr₂Al、Zr₅Al₃、Zr₃Al₂、Zr₄Al₃、Zr₅Al₄、ZrAl、Zr₂Al₃、ZrAl₂、ZrAl₃ 10 种金属间化合物^[5]。在这些化合物中, Zr₃Al 为面心立方结构, 滑移系较多, 更适合后续的塑性加工^[6], 使得富含 Zr₃Al 相的锆铝合金成为一种潜在的航空间材料。

此外, 在锆铝合金中添加少量的 B 元素, 能够细化晶粒, 进一步改善其力学性能。目前, 对 Zr-Al-B 合金的研究集中在 B 元素对锆铝合金组织及性能的影响。

刘闪等^[5]研究了 B 含量对 Zr-6Al-xB 和 Zr-8Al-xB 合金组织性能的影响, 结果表明对于退火态 Zr-6Al-xB 和 Zr-8Al-xB, 随着 B 含量的逐渐增加, Zr₃Al 相的晶粒尺寸呈现出先减小后增大的趋势, 当 B 含量为 0.1% (质量分数) 时, Zr₃Al 相的晶粒尺寸最小, 合金的抗

拉强度和塑性均达到最大。

Li 等^[7]的研究亦发现, 在 Zr-6Al 中添加 0.1%B 元素 (质量分数) 时, Zr₃Al 相的晶粒尺寸由 500 μm 减小到 30 μm , 晶粒显著细化^[7]。

胡宝成等^[8]的研究发现, 在锆铝二元合金中加入少量 B 元素, 无论铸态还是退火态的锆铝合金, 其晶粒尺寸可以减小 1 个数量级以上, 能够很好地改善合金的力学性能。

鉴于上述研究表明 Zr-6Al-0.1B 合金具有较优异的力学性能和良好的塑性, 本研究以 Zr-6Al-0.1B 合金为研究对象。但是需要指出的是, 相较于上述研究中采用的熔炼法存在成本高、工艺复杂、生产效率低等缺点, 热压烧结是一种更为灵活的制备方法。目前, Ti-Zr^[9]、TiAl^[10]、Al-Ti-Zr^[11]、Ti₃₅Zr₂₈Nb^[12]、CoCrFeNi^[13] 等合金均采用热压烧结方法被成功制备, 且具有良好的力学性能, 满足了后续塑性加工的要求。

在前期研究中采用真空热压烧结成功制备了富含 Zr₃Al 相的 Zr-6Al-0.1B 合金, 并对其微观组织和热变形行为进行了研究^[14]。本研究基于等温压缩试验结果, 建立了热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金的 Johnson-Cook

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 国家自然科学基金 (52205353); 河北省自然科学基金 (E2021208025, E2020208044)

作者简介: 王伟, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018, 电话: 0311-81668702, E-mail: wangweicaijia@hebust.edu.cn

本构模型，并对模型参数进行了修正，获得了具有良好精度的本构模型。研究结果可为热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金后续热加工工艺参数的选择提供指导，并为相关的数值模拟研究提供可靠的模型选择。

1 实验

试验材料为热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金，采用真空热压烧结法制备，粉体原料为：93.9%工业级纯锆粉（粒度≤74 μm）+6%纯铝粉（粒度≤74 μm）+0.1%铝硼合金（质量分数，%），热压烧结前采用低能球磨进行混粉，球磨比为 1:1，转速为 100 r/min，混粉时间为 30 min。热压烧结采用石墨模具，模具表面均匀涂覆一层氮化硼，以防止金属粉末与模具发生粘连。采用双向压力模式，先对模具施加 15 MPa 的预压力，抽真空至真空度达 6×10⁻² Pa 后，对模具进行加热，先以 10 °C/s 的速率升温至 500 °C，保温 3 min，消除温度梯度，同时均匀加压。温度升至 950 °C 时，压力相应地升至 40 MPa，保温保压 5 min，当温度降至 500 °C 时，卸载压力，采用炉外循环水路冷却炉体及模具^[14]。

热压烧结的制件尺寸为 Φ30 mm×20 mm，采用线切割沿平行轴线的方向，从制件切取 Φ6 mm×9 mm 的等温压缩试样，等温压缩设备为 Gleeble-3500 热模拟机。变形温度为 950、1050 和 1150 °C；应变速率为 0.01、0.1 和 1 s⁻¹，共 9 组压缩试验。

等温压缩前，在试样 2 个端面覆盖石墨片，以减小摩擦的影响。在真空状态下，以 10 °C/s 的升温速率升至变形温度，保温 30 s 使试样的温度均匀化，而后以设定的应变速率压缩试样，轴向压缩量为 50%，即真应变达到 0.69。图 1 为等温压缩试验得到的真应力-应变曲线。结果表明，在变形初期，应力随应变在增加急速升高，迅速达到峰值。而后，随着应变的增加应力持续减小，而不存在应力平衡阶段。从整体上看，随着变形温度的降低或应变速率的增加，应力-应变曲

线整体向高应力区域偏移，表明热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金属于变形温度和应变速率敏感材料。

2 Johnson-Cook 本构方程

Johnson-Cook 本构模型表达式如式(1)所示^[15-16]：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - DT^{*m}) \quad (1)$$

式中，σ 为等效应力，MPa；ε 为等效塑性应变；ε* 为无量纲应变速率（ε* = ε/ε₀，ε 为应变速率，ε₀ 为参考应变速率）；T* 为无量纲温度 T* = (T - T₀) / (T_m - T₀)，T 为变形温度，T₀ 为参考变形温度，T_m 为材料的熔点；A 为参考变形温度和参考应变速率条件下的屈服应力，MPa；B 为应变硬化常数；n 为应变硬化指数；C 为应变速率敏感系数；D 为变形温度敏感系数；m 为温度效应指数。

Johnson-Cook 本构模型由三项因子式构成，A + Bεⁿ 反映流动应力和应变的关系；1 + Clnε* 反映流动应力和应变速率之间的关系，当应变速率等于参考应变速率时该项为 1；1 - DT*^m 反映流动应力和温度之间的关系，当变形温度等于参考温度时该项为 1。

2.1 本构方程参数确定

2.1.1 参数 A 的确定

将等温压缩试验中的最低变形温度 950 °C 设为参考变形温度，最低应变速率 0.01 s⁻¹ 设为参考应变速率，通过图 1 中 950 °C/0.01 s⁻¹ 的真应力-真应变曲线，确定屈服应力 σ_s = 200 MPa，即参数 A = 200 MPa。

2.1.2 参数 B、n、C 的确定

在参考变形温度和参考应变速率条件下，本构方程简化为：

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2)$$

对上式取对数，整理可得：

$$\ln(\sigma - A) = \ln(B) + n \ln \varepsilon \quad (3)$$

将 950 °C/0.01 s⁻¹ 的应力-应变数据代入式(3)，通过线性回归分析，即得 B = 5.6631，n = -1.62535。

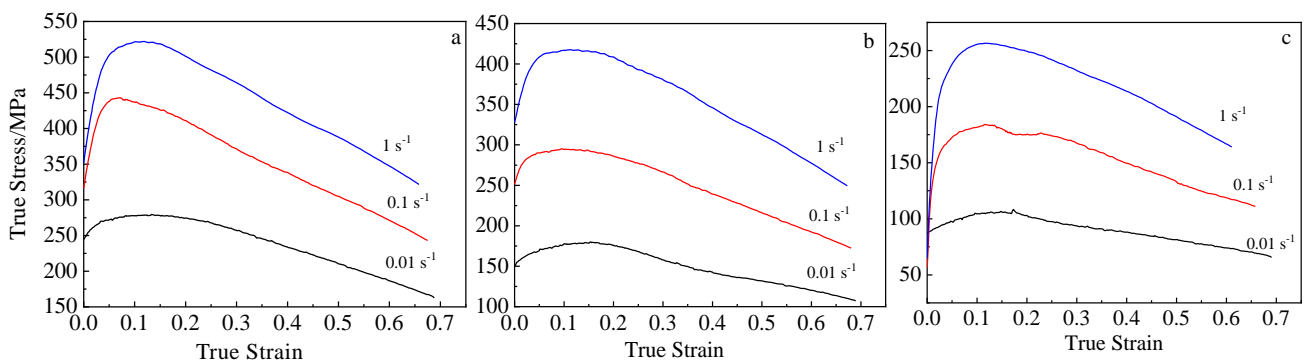


图 1 等温压缩试验的真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curves of isothermal compression tests at 950 °C (a), 1050 °C (b), and 1150 °C (c)

当变形温度为参考变形温度 ($T=T_0=950\text{ }^\circ\text{C}$) 时, 式 (1) 简化为:

$$\sigma / (A + B\varepsilon^n) = C \ln \dot{\varepsilon}^* + 1 \quad (4)$$

采用变形温度为 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 不同应变速率的真实应力-应变数据, 通过线性回归, 求得 $C=0.18712$ 。

2.1.3 参数 m 、 D 的确定

当应变速率为参考应变速率 ($\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = 0.01\text{ s}^{-1}$) 时, 式 (1) 简化为:

$$\sigma / (A + B\varepsilon^n) = 1 - DT^{*m} \quad (5)$$

对式 (5) 两边取对数, 整理后可得:

$$\ln[1 - \sigma / (A + B\varepsilon^n)] = m \ln T^* + \ln D \quad (6)$$

采用应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 不同变形温度的真应力-真应变数据, 通过线性回归, 求得 $m=0.70949$, $D=1.41588$ 。

将求得的各参数代入式 (1), 得到热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金的 Johnson-Cook 本构模型为:

$$\sigma = (200 + 5.6631\varepsilon^{-1.62535})(1 + 0.18712 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - 1.41588T^{*0.70949}) \quad (7)$$

2.2 本构模型精度分析

为了验证构建的 Johnson-Cook 本构模型的精度, 将真实应力-应变的试验值与式 (7) 的计算值进行对比分析, 图 2 为预测值与试验值的对比。可以看出当变形温度为 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 或应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 计算值与试验值较为吻合, 如图 2a 和图 2d 所示, 但其它变形条件时偏差较大。因此, 需对本构模型予以修正,

以提高模型的预测精度。

3 本构方程参数修正

3.1 温度敏感系数 D 的修正

式 (7) 所示的 Johnson-Cook 本构模型中, 求解温度敏感系数 D 时, 使用的是参考应变速率对应的不同变形温度的真应力-真应变数据。而在实际中, 参数 D 的数值会受应变速率的影响^[17]。因此, 分别采用试验的各应变速率对应的不同变形温度的真应力-真应变数据, 求解各应变速率 0.01 、 0.1 、 1 s^{-1} 时对应的参数 D 分别为 1.41588 、 1.15352 、 1.02997 。可知, 温度敏感系数 D 与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 之间呈非线性。为了便于描述参数 D 与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 之间的函数关系, 将参数 D 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 无量纲化处理, 并将 D/D_0 设为因变量, 将 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 设为自变量, 进行两阶多项式函数拟合, 拟合曲线如图 3 所示, 得到参数 D/D_0 与应变速率 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 之间的函数关系如式 (8) 所示。

$$D/D_0 = 0.000198(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^2 - 0.02277(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + 1.02257 \quad (8)$$

式中, D 为温度敏感系数, D_0 为参考应变速率对应的温度敏感系数, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率。

将式 (7) 中的温度敏感系数设为变量并与式 (8) 联立, 获得修正温度敏感系数的 Johnson-Cook 模型, 模型的预测值与试验值的对比结果如图 4 所示。可以看

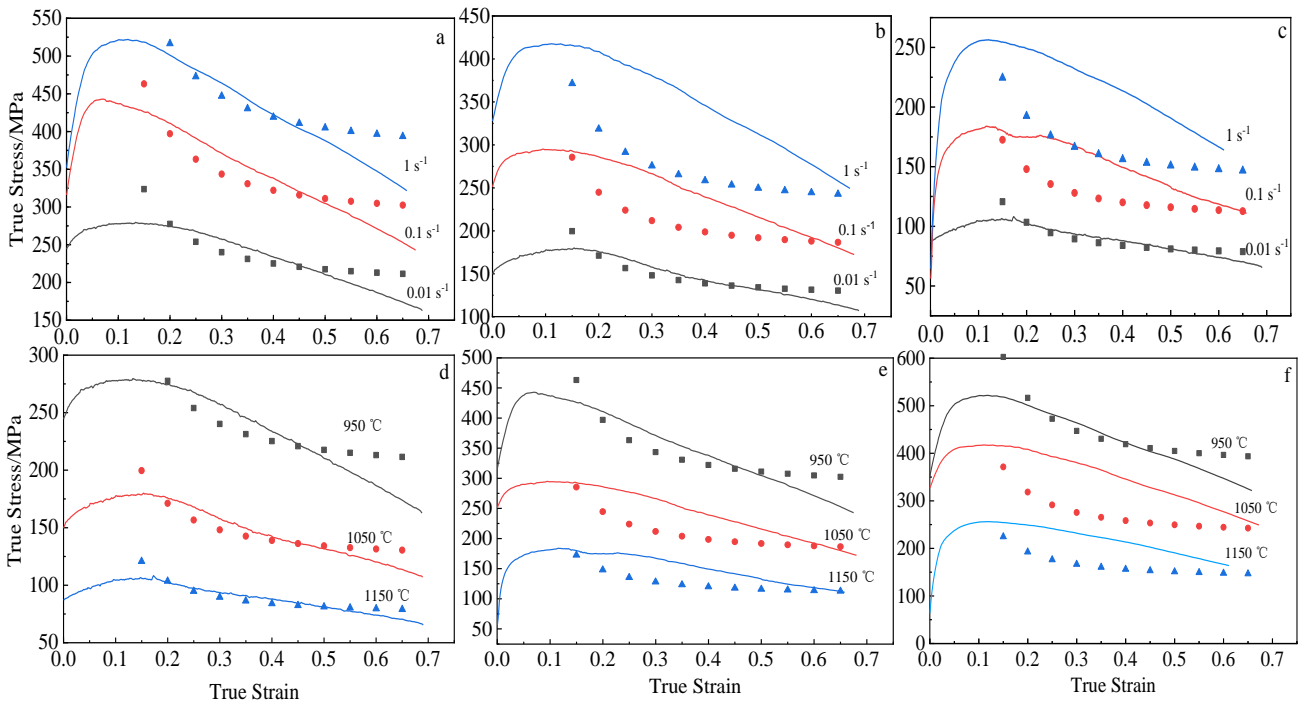


图 2 模型预测值与试验值的对比

Fig.2 Comparison between predicted value and tested value of the model under different conditions: (a) $950\text{ }^\circ\text{C}$, (b) $1050\text{ }^\circ\text{C}$, and (c) $1150\text{ }^\circ\text{C}$; (d) 0.01 s^{-1} , (e) 0.1 s^{-1} , and (f) 1 s^{-1}

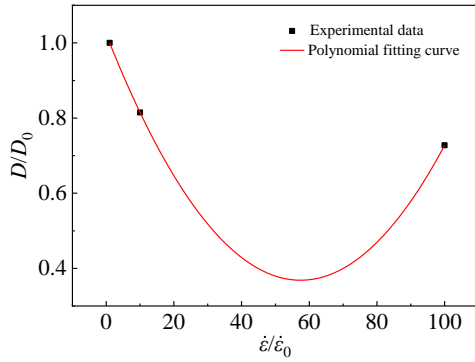


图 3 D/D_0 和 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 的关系曲线

Fig.3 Relationship between D/D_0 and $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$

出,修正温度敏感系数 D 后,尤其在高温(1050、1150 °C)变形条件时,模型的预测精度大幅提高,但在应变速率 1 s^{-1} 时,模型的预测值与试验值存在一定的误差。

3.2 应变速率敏感系数 C 的修正

同样,式(7)所示的 Johnson-Cook 本构模型中,求解应变速率敏感系数 C 时,使用的是参考变形温度对应的不同应变速率的真实应力-应变数据,即参数 C 被看作常量。而在实际中,参数 C 是随着变形温度的改变而变化的^[18]。

将公式(7)中的参数 C 可看作为待定因子,分别采用试验的各变形温度对应的不同应变速率的真实应力-应变数据,求解各变形温度 950、1050、1150 °C 对应的

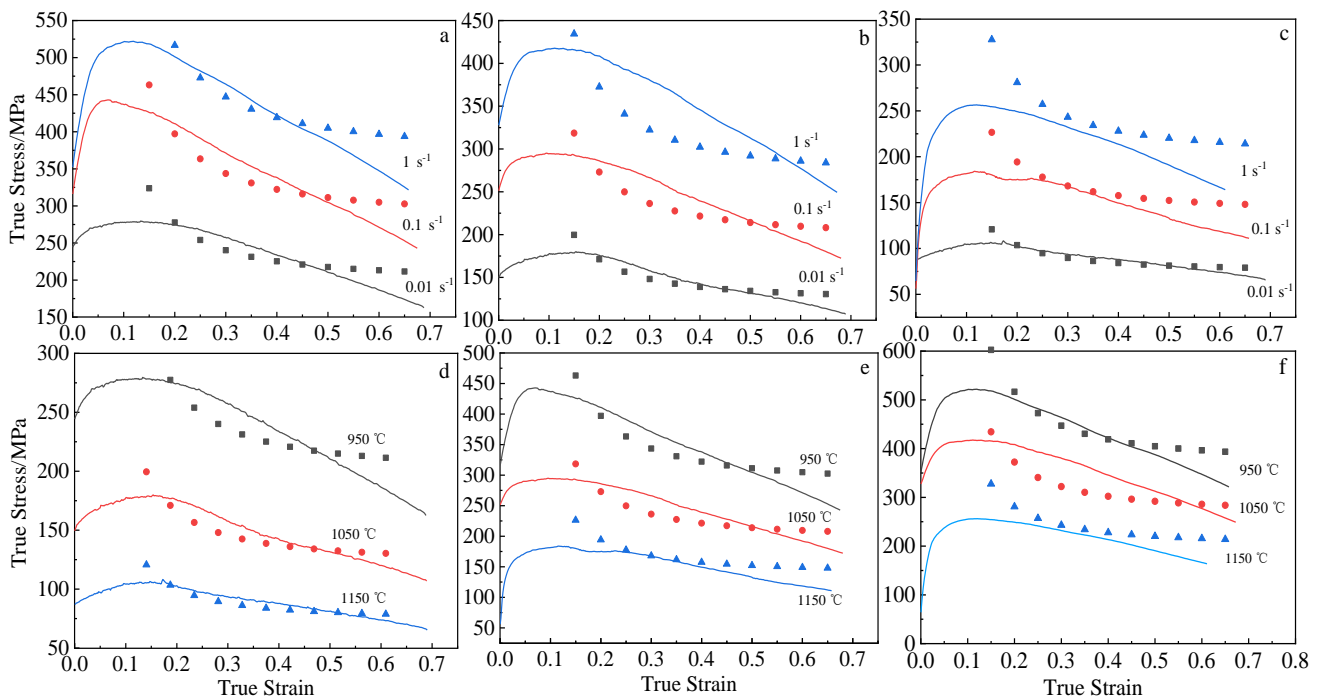


图 4 修正 D 后预测值与试验值的对比

Fig.4 Comparisons between predicted value and tested value of the model under different conditions after modification of D : (a) 950 °C, (b) 1050 °C, and (c) 1150 °C; (d) 0.01 s^{-1} , (e) 0.1 s^{-1} , and (f) 1 s^{-1}

参数 C 分别为 0.18172、0.28869、0.3035。将参数 C 和变形温度 T 无量纲化处理,并将 C/C_0 设为因变量,将 T/T_m 设为自变量,进行两阶多项式函数拟合,拟合曲线如图 5 所示,得到参数 C 与变形温度 T 之间的函数关系如式(9)所示。

$$C/C_0 = -57.877(T/T_m)^2 + 81.8394(T/T_m) - 27.283 \quad (9)$$

式中, C 为应变速率敏感系数; C_0 为参考温度对应的应变速率敏感系数; T 为变形温度; T_m 为材料的熔点。

将式(7)中的应变速率敏感系数设为变量并与式(9)联立,获得修正应变速率敏感系数的 Johnson-Cook 模型,模型的预测值与试验值的对比结果如图 6 所示。可

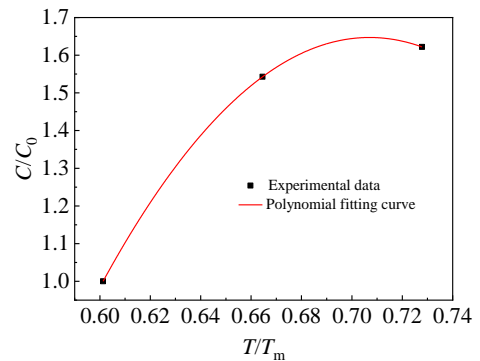


图 5 C/C_0 和 T/T_m 的关系

Fig.5 Relationship between C/C_0 and T/T_m

以看出，修正变形速率敏感系数 C 后，模型的预测精度亦大幅提高，尤其是高应变速率 (1 s^{-1}) 时，相比修正温度敏感系数 D ，预测精度得以提升。

3.3 系数 C 和 D 同时修正

为了进一步验证参数 C 和 D 同时修正时模型的精度

情况，将式 (7) 中的温度敏感系数和应变速率敏感系数均设为变量，并与式 (8) 和式 (9) 联立，获得同时修正系数 C 和 D 的 Johnson-Cook 本构模型，模型的预测值与试验值的对比结果如图 7 所示，结果表明系数 C 和 D 同时修正，模型的整体预测精度反而降低。

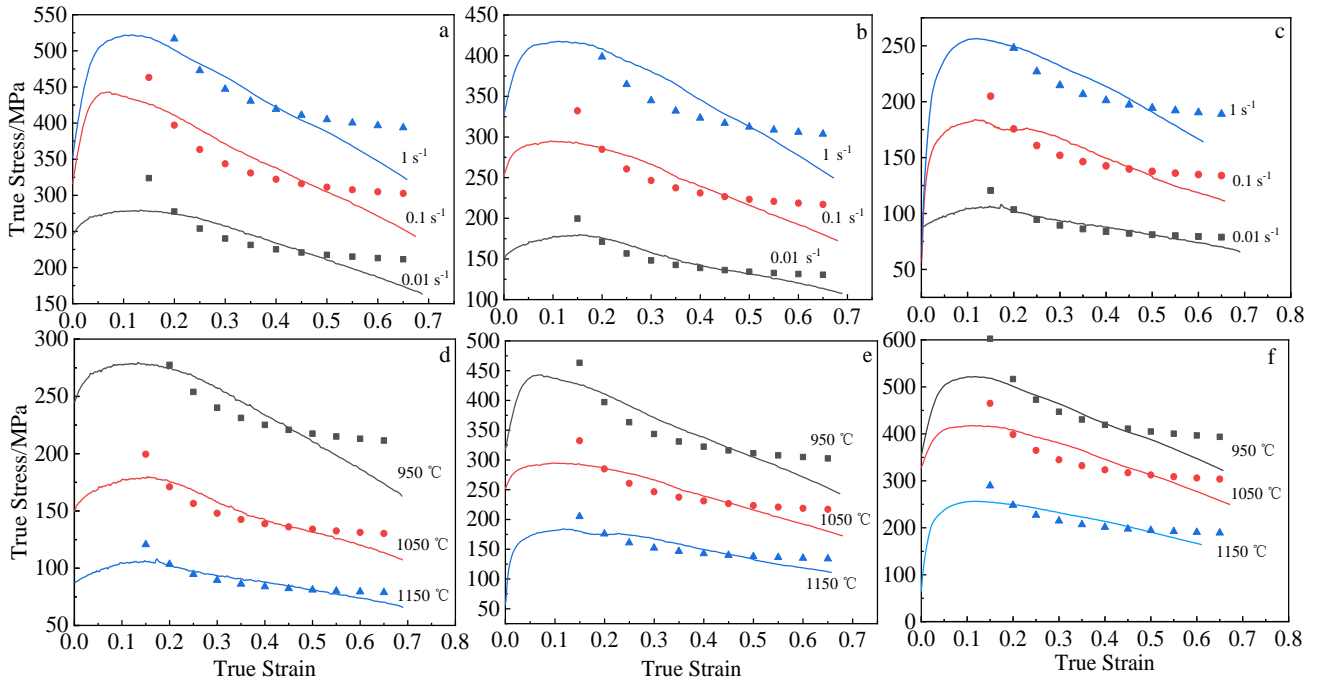


图 6 修正 C 后模型的预测值与试验值的对比

Fig.6 Comparisons between predicted value and tested value of the model under different conditions after modification of C : (a) $950 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, and (c) $1150 \text{ }^\circ\text{C}$; (d) 0.01 s^{-1} , (e) 0.1 s^{-1} , and (f) 1 s^{-1}

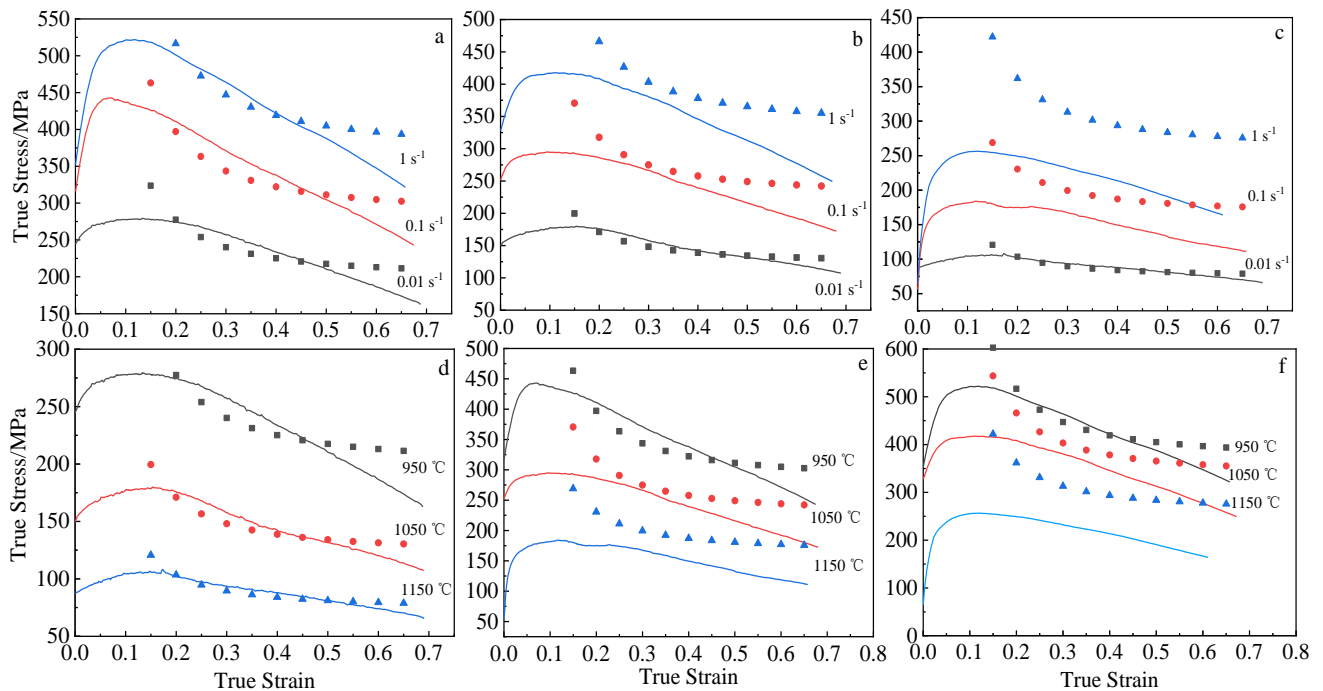


图 7 修正 C 、 D 后模型的预测值与试验值的对比

Fig.7 Comparisons between predicted value and tested value of the model under different conditions after modification of C and D : (a) $950 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, and (c) $1150 \text{ }^\circ\text{C}$; (d) 0.01 s^{-1} , (e) 0.1 s^{-1} , and (f) 1 s^{-1}

表 1 不同变形温度的 adj R^2 值Table 1 Values of adj R^2 at different temperatures

Deformation temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Adj R^2 of modified D	Adj R^2 of modified C	Adj R^2 of simultaneously modified C and D
950	0.9144	0.9276	0.9144
1050	0.9377	0.9408	0.9420
1150	0.9361	0.9349	0.9329

表 2 不同应变速率的 adj R^2 值Table 2 Values of adj R^2 at different strain rates

Strain rate/ s^{-1}	Adj R^2 of modified D	Adj R^2 of modified C	Adj R^2 of simultaneously modified C and D
0.01	0.9536	0.9536	0.9536
0.1	0.9314	0.9412	0.9113
1	0.8672	0.9233	0.8237

4 本构模型精度定量分析

为了更加科学地判断 3 种修正的本构模型的预测精度, 分别采用上述 3 种模型, 在整个应变范围内, 每间隔 0.05 应变, 计算应力的预测值, 并将预测值与试验值进行线性拟合, 采用线性相关系数 adj R^2 描述模型的精度, 不同变形温度和不同应变速率条件下的 adj R^2 值分列于表 1 和表 2。

可以发现, 单独修正 D 和 C 、 D 同时修正的本构模型在高应变速率 (1 s^{-1}) 时, 均出现了 adj R^2 小于 0.9 的情况, 表明这 2 种模型在高应变速率条件下的预测能力偏弱。而单独修正 C 的本构模型, 无论在各变形温度, 还是各应变速率条件下, adj R^2 均大于 0.92, 整体精度高于另外 2 种修正模型, 为推荐使用的 Johnson-Cook 本构模型。

5 结论

1) 采用真空热压烧结制备的 Zr-6Al-0.1B 合金属于变形温度和应变速率敏感材料, 其热变形特性表现为在变形初期, 应力随应变的增加急速升高, 迅速达到峰值, 而后, 随着应变的增加应力持续减小, 而不存在应力平衡阶段。

2) 构建了热压烧结 Zr-6Al-0.1B 合金的 Johnson-Cook 本构模型, 并通过修正温度敏感系数、应变速率敏感系数, 以及 2 个系数同时修正, 构建出 3 种修正的 Johnson-Cook 本构模型。通过对比分析 3 种模型的预测精度, 确定单独修正应变速率敏感系数的本构模型具有较高的预测精度, 为推荐使用的 Johnson-Cook 本构模型。

参考文献 References

- [1] Jia Yujie(贾豫婕), Lin Xiheng(林希衡), Zou Xiaowei(邹小伟) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2022, 41(5): 354
- [2] Lin Jian(林健), Feng Gang(冯刚), Lei Yongping(雷永平) *et al. Journal of Beijing University of Technology*(北京工业大学学报)[J], 2022(10): 1078
- [3] Li F, Lin C, Shi Y H *et al. Rare Metal Materials and Engineering A*[J], 2022, 51(3): 866
- [4] Du J, Wen B, Melnik R *et al. Computational Materials Science*[J], 2015, 103: 170
- [5] Liu Shan(刘闪). *Effects of Boron on Microstructures and Mechanical Properties of Zr₃Al-based Alloys*(硼 Zr₃Al 基金组织性能的影响)[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015
- [6] Mohammadi A, Enikeev N A, Murashkin M Y *et al. Acta Materialia*[J], 2021, 203: 116 503
- [7] Li J H, Li Q, Zhang F C *et al. Materials Letters*[J], 2015, 153: 70
- [8] Hu Baocheng(胡宝成). *A Research on Zr-Al Alloy Annealing Process and Mechanical Properties*(锆铝合金热处理工艺及力学性能的研究)[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014
- [9] Kondoh K, Fukuo M, Kariya S *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 852: 156 954
- [10] Ren Y B, Han Y, Yan S *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2021, 30: 269
- [11] Tang L T, Zhu D G, Sun Z *et al. Vacuum*[J], 2018, 150: 166
- [12] Xu W, Lu X, Hayat M D *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(5): 3696
- [13] Yu Y, Chen J Y, Ma T X *et al. Rare Metal Materials and*

- Engineering A*[J], 2022, 51(9): 3182
- [14] Yan H J, Wang W, Zhang S J *et al. Materials*[J], 2022, 15(5): 1816
- [15] Sirigiri V K R, Gudiga V Y, Gattu U S *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2022,62(6): 3450
- [16] Zhang Shuangjie(张双杰), Zhang Zhao(张 昭), Wang Wei(王伟) *et al. Hot Working Technology* (热加工工艺)[J], 2022(10): 39
- [17] Priest J, Ghadbeigi H, Ayvar-Soberanis S *et al. Procedia CIRP*[J], 2022, 108: 106
- [18] Chao Z L, Jiang L T, Chen G Q *et al. Composite Structures*[J], 2022, 282: 115 029

Establishment and Precision Analysis of Johnson-Cook Constitutive Model for Hot Pressing Sintered Zr-6Al-0.1B Alloy

Wang Wei^{1,2}, Du Shuaishuai¹, Yan Huajun^{1,2}, Ma Shibo^{1,2}, Zhang Shuangjie^{1,2}, Mu Zhenkai^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(2. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: ZrAl alloy is a potential space material for aerospace. Zr-6Al-0.1B alloy was prepared by vacuum hot pressing sintering. The isothermal compression tests of hot-pressed sintered Zr-6Al-0.1B alloy were conducted under the deformation temperature of 950-1150 °C and the strain of rate of 0.01-1 s⁻¹ by Gleeble-3500 thermal simulation machine. The results show that at the beginning of deformation, the stress is increased rapidly with increasing the strain and it reaches the peak stress quickly. Then, the stress is decreased continuously with increasing the strain, and there is no stress equilibrium stage. With decreasing the deformation temperature or increasing the strain rate, the stress-strain curve shifts to the high stress region, indicating that the hot-pressed sintered Zr-6Al-0.1B alloy is sensitive to deformation temperature and strain rate. The Johnson-Cook constitutive model of hot-pressed sintered Zr-6Al-0.1B alloy was established, and the temperature sensitivity coefficient D and strain rate sensitivity coefficient C were modified. Through the qualitatively and quantitatively comparative analyse between the predicted value by the model and the tested value, the model shows better prediction accuracy when C is modified alone. This study provides guidance for the selection of subsequent hot working parameters of hot-pressed sintered Zr-6Al-0.1B alloy, and provides a reliable constitutive model for the corresponding numerical simulation research.

Key words: Zr-6Al-0.1B alloy; isothermal compression test; Johnson-Cook constitutive model; model modification; precision analysis

Corresponding author: Wang Wei, Ph. D., Lecturer, School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, P. R. China, Tel: 0086-311-81668702, E-mail: wangweicaijia@hebust.edu.cn