

材料与成形性能

基于修正 J-C 本构模型的固溶态 7050 铝合金中温变形行为研究

黎 燕^{1,2}, 潘成海³, 滕海灏³, 王 敬¹, 梁 强¹

(1. 重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067; 2. 重庆工商大学 工程训练中心, 重庆 400067;
3. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 为研究固溶态 7050 铝合金的中温变形行为, 在变形温度为 333~523 K、应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹ 的条件下进行了中温压缩实验, 构建了一种考虑温度和应变速率的修正 J-C 本构模型。结果表明: 在所研究的条件下, 当应变在 0.1 以下时, 应力随着应变的增加而增加; 当应变在 0.1 以上时, 应力趋于平稳状态。固溶态 7050 铝合金的温度软化效应显著。对比真实应力-真实应变数据与经典 J-C 本构模型预测数据、修正 J-C 本构模型预测数据发现, 修正 J-C 本构模型预测数据与真实应力-真实应变数据的误差在±5% 以内, 表明修正 J-C 本构模型具有较高的预测精度和扩展性, 可准确地描述固溶态 7050 铝合金在中温阶段的流动应力特性。

关键词: 固溶态 7050 铝合金; J-C 本构模型; 中温变形行为; 应力; 应变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.028

中图分类号: TG166.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0221-06

Study on middle temperature deformation behavior of solid-solution 7050 aluminum alloy based on modified J-C constitutive model

Li Yan^{1,2}, Pan Chenghai³, Teng Haihao³, Wang Jing¹, Liang Qiang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
2. Engineering Training Center, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the middle temperature deformation behavior of solid-solution 7050 aluminum alloy, the middle temperature compression experiments were conducted at the deformation temperature of 333–523 K, the strain rate of 0.001–0.1 s⁻¹, and a modified J-C constitutive model considering temperature and strain rate was established. The results show that under the studied conditions, the stress increases with the increasing of strain when the strain is below 0.1, and tends to be stable when the strain is above 0.1. The temperature softening effect of solid-solution 7050 aluminum alloy is significant. Comparing the data of true stress-true strain with the predicted data of classical J-C constitutive model and modified J-C constitutive model, it is found that the deviation between the data predicted by modified J-C constitutive model and the true stress-true strain data is within ±5%, indicating that the modified J-C constitutive model has high precision and expansibility. Thus, this model can accurately describe the flow stress characteristics of solid-solution 7050 aluminum alloy in the middle temperature stage.

Key words: solid-solution 7050 aluminum alloy; J-C constitutive model; middle temperature deformation behavior; stress; strain

7050 系铝合金具有质量轻、强度高、塑性好以及耐腐蚀性强的特点, 被广泛应用于大型化、整体化的航空锻模件^[1-3]。其基本成形工艺为: 锻造—固溶—淬火—中温压缩—时效。固溶强化将锻态 7050

铝合金加热至一定温度使大部分第二相粒子溶解, 再经过时效处理细化晶粒以达到强化的效果^[4]。因固溶强化后会产生残余应力, 导致锻件变形超差, 因此, 通常会在淬火后进行变形量为 1%~6% 的中温压缩来消除残余应力^[5-6]。

7050 铝合金的变形行为研究为其成形工艺和 CAE 模拟仿真提供了理论依据。目前, 国内外对 7050 铝合金变形行为的研究较多。Koç M 等^[7]、Xu L Z 等^[8]以固溶态 7050 铝合金为对象, 研究了热压缩变形对降低大型铝合金锻件残余应力的影响规律; 吴

收稿日期: 2023-11-13; 修订日期: 2024-02-15

基金项目: 重庆工商大学教改项目 (2022145)

作者简介: 黎 燕 (1989-), 女, 硕士, 中级工程师

E-mail: 2023038@ctbu.edu.cn

通信作者: 潘成海 (1988-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 443993960@qq.com

道祥等^[9]研究了固溶温度对 7050 铝合金第二相粒子的影响,并建立了高温修正的 Johnson-Cook (J-C) 本构模型;Teng H H 等^[10]使用修正的 VOCE 本构模型在 333~523 K 温度范围内对固溶态 7050 铝合金的变形行为进行了研究;陈修梵等^[11]、贾耀军等^[12]利用修正的双曲正弦本构方程研究了均匀后 7050 铝合金在 573~723 K 温度范围内的高温变形行为。

总体来说,关于固溶强化后中温压缩的 7050 铝合金变形行为的研究较少,给冷压工艺设计造成了阻碍,因此,亟需建立固溶态 7050 铝合金中温变形行为模型,以掌握压缩变形过程中的材料应力、应变变化趋势,为材料成形仿真提供大锻件基础材料模型。构建能够准确反映中温变形特性的本构方程,对于深入理解材料性能及优化工艺参数具有显著的研究意义。本文获得了固溶态 7050 铝合金的中温变形数据,建立了修正的 J-C 变形应力预测模型,为大锻件的塑性变形消除残余应力提供有利指导。

1 实验

1.1 实验材料及方法

表 1 为本文实验材料 7050 铝合金的化学成分,其固溶工艺示意图如图 1 所示,以 10 K·min⁻¹ 的速度加热至 750 K,保温 4 h 后进行水淬,获得固溶处理试样。分别取锻态试样和固溶态试样各 1 个,对试样表面进行电解抛光,随后采用 Keller 试剂进行表面腐蚀,利用光学显微观察设备 Leica DM ILM 进行金相组织观测。

表 1 锻态 7050 铝合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of forged 7050 aluminum alloy (% , mass fraction)

Cu	Mn	Si	Mg	Ti	Fe	Zn	Cr	Al
2.0~2.6	0.1	0.12	1.9~2.6	0.06	0.15	5.7~6.7	0.04	余量

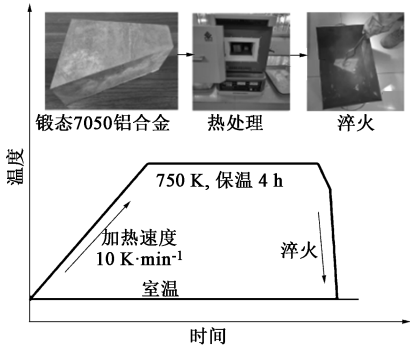


图 1 7050 铝合金固溶强化工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solid-solution strengthening process for 7050 aluminum alloy

按照表 2 所示的中温压缩实验参数,采用线切割的方式取 12 个试样,试样为尺寸为 $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的圆柱体,采用 Gleeble-3180 热物理模拟实验机进行中温压缩实验,工艺示意图如图 2 所示,以 10 K·s⁻¹ 的速度加热至 333、423、473 和 523 K,保温 5 min 后进行水淬,应变速率分别为 0.001、0.01 和 0.1 s⁻¹,压缩变形量为 50%。

表 2 中温压缩实验参数

Table 2 Parameters of compression experiment at middle temperature

试样编号	应变速率/ s ⁻¹	加热温度/ K	冷却 条件	变形量/ %	加热速度/ (K·s ⁻¹)
1~4	0.001				
5~8	0.01	333、423、 473、523	水冷	50	10
9~12	0.1				

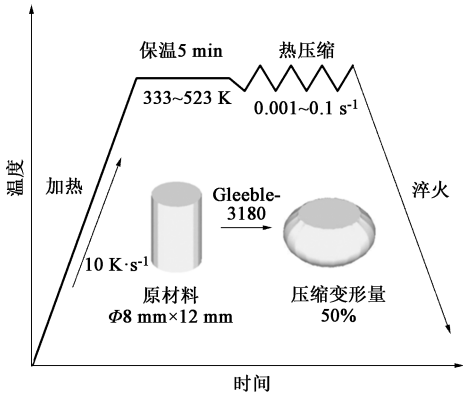


图 2 中温压缩工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of compression process at middle temperature

1.2 结果与讨论

锻态和固溶态 7050 铝合金的金相组织观测结果如图 3 所示。可以发现,锻态 7050 铝合金存在 AlZnMgCu、Al₂Mg₃Zn₃、Al₂CuMg 和 Al₇Cu₂Fe 等多种相的粒子^[9]。图 3a 中锻态 7050 铝合金的晶粒弥散分布着大量的第二相粒子。通过固溶强化工艺后,如图 3b 所示,大部分第二相粒子融入到基体中,提高了基体的过饱和度。固溶过程促进了再结晶,使材料的等轴化程度提升,塑性和强度均得到提高。

图 4 为中温压缩实验获得的不同温度下 7075 铝合金的真实应力-真实应变曲线。由图 4 可知,7050 铝合金的中温变形行为受变形温度的影响显著,随着温度的升高,应变速率的影响也逐渐增大。当变形温度为 333 K 时,位错密度显著升高,使材料硬化。发生加工硬化后,铝合金的强度和

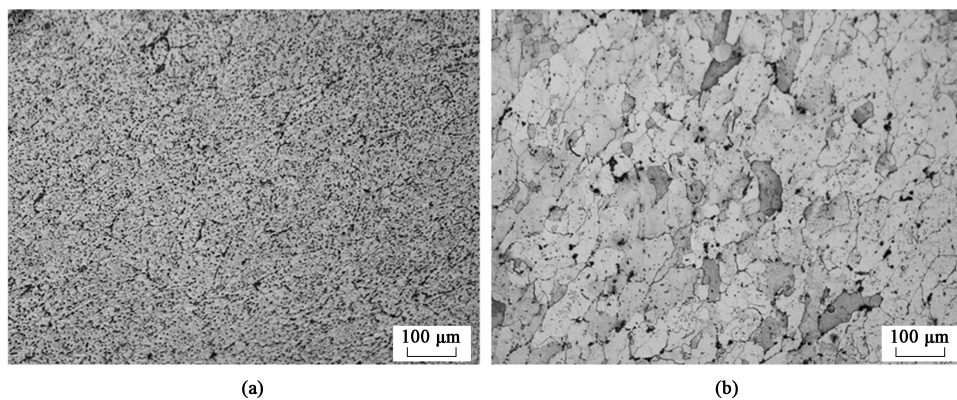


图3 锻态 (a) 和固溶态 (b) 7050 铝合金的金相组织图

Fig. 3 Metallographic structure diagrams of forged (a) and solid-solution (b) 7050 aluminum alloy

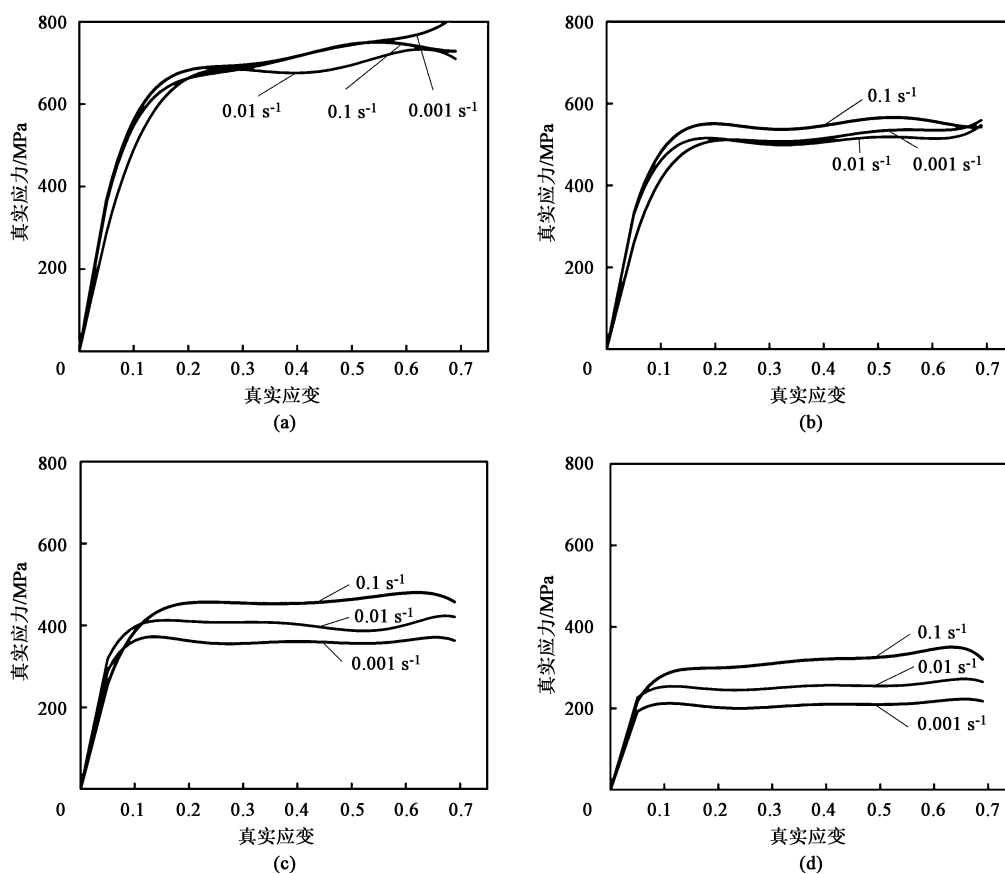


图4 不同温度下固溶态 7050 铝合金的真实应力-真实应变曲线

(a) 333 K (b) 423 K (c) 473 K (d) 523 K

Fig. 4 True stress-true strain curves of solid-solution 7050 aluminum alloy at different temperatures

硬度大大提高,此时应变速率对应力的影响呈非线性关系。当变形温度为 423 K 时,材料位错产生交滑移使材料产生软化,即发生回复。当变形温度由 333 K 提升至 523 K 时,7075 铝合金的强度和硬度下降过程明显。当变形温度为 523 K 时,软化达到一定程度,应变速率对应力的影响呈现规律性。

2 本构模型的建立

2.1 经典 Johnson-Cook 本构模型

Johnson-Cook 模型是由 Johnson G R 和 Cook W H^[13] 两位科学家在 1983 年开创性提出的,已经成为变形行为研究领域的基石。该模型由应变、应

变速率和温度 3 大控制因素组成^[14]，具体数学表达式如式 (1) 所示。

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{ref}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{ref}}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中： σ 为真实应力，MPa； ϵ 为真实应变； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， s^{-1} ； $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率， s^{-1} ； T 为温度，K； T_{ref} 为参考温度，K； T_{melt} 为熔点温度，K； A 为在参考温度和参考应变速率下的屈服应力，MPa； B 为应变硬化系数，MPa； n 为应变硬化指数； C 为应变速率硬化系数； m 为温度软化系数^[15]。

7050 铝合金的 J-C 本构模型参数如表 3 所示^[16]。

表 3 7050 铝合金 J-C 本构模型参数

Table 3 Parameters of J-C constitutive model for 7050 aluminum alloy

参数	A/MPa	B/MPa	n	m	C
数值	500	240	0.22	2.55	0.003

将以上参数数值代入式 (1) 中得到式 (2)。

$$\sigma = (500 + 240\epsilon^{0.22}) (1 + 0.003 \ln \epsilon^*) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{ref}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{ref}}} \right)^{2.55} \right] \quad (2)$$

式中： ϵ^* 为无量纲的应变速率参数， $\epsilon^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 。

图 5 比较了实验测得的真实应力-真实应变数据与基于经典 J-C 本构模型 (式 (2)) 的预测数据。可以发现，经典 J-C 本构模型的预测数据与真实应力-真实应变实验数据相比具有显著的差异，所以，经典 J-C 本构模型不能准确地描述固溶态 7050 铝合金中温阶段的应力-应变关系。

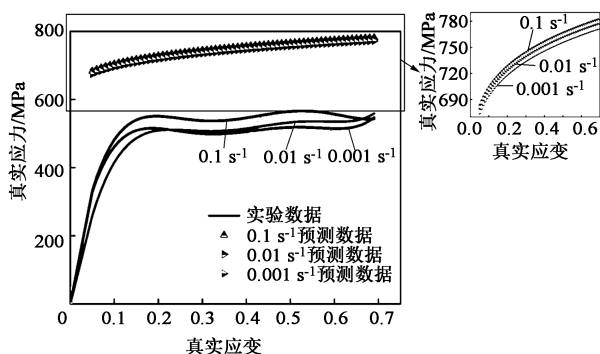


图 5 423 K 温度下的真实应力-真实应变实验数据与经典 J-C 本构模型预测数据对比

Fig. 5 Comparison of true stress-true strain between experimental data and predicted data by classical J-C constitutive model at temperature of 423 K

2.2 修正 Johnson-Cook 本构模型

由于经典 J-C 本构模型的材料参数是不变的，但在热变形过程中，微观组织的演变受到温度和应变速率等条件的影响，因此，降低了模型的预测精度^[9]。本文对应变、应变速率和温度控制部分的材料参数进行了修正，使模型预测曲线更加贴合本文温度范围和应变速率下的真实应力-真实应变数据曲线。以 423 K 作为参考温度、 0.001 s^{-1} 作为参考应变速率，通过 Origin 软件对真实应力-真实应变曲线进行拟合，确认 4 阶模型曲线与真实应变-真实应力曲线的拟合度较高。主要步骤如下。

(1) 在参考温度、参考应变速率条件下，将式 (1) 变换为式 (3)，为提高预测精度，设置为 4 阶函数。

$$\sigma = A_1 + B_1\epsilon^1 + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3 + B_4\epsilon^4 \quad (3)$$

式中： A_1 为在参考温度和参考应变速率下的屈服应力，MPa； B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 为应变硬化系数，MPa。

将此变形条件下所获取的真实应力、真实应变数据点绘制成散点图，并采用二次多项式进行拟合，拟合结果如图 6 所示，根据多项式的拟合系数可以确定 A_1 、 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 的数值^[17]。

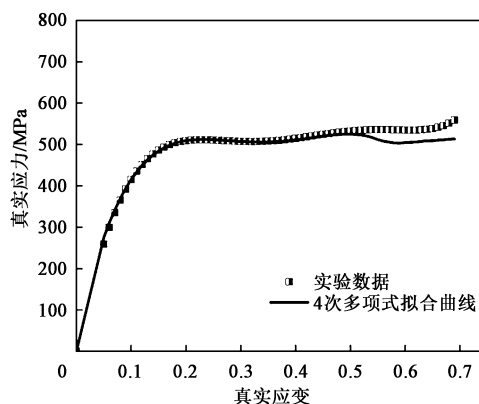


图 6 在参考温度和参考应变速率下的真实应力-真实应变拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of true stress-true strain at reference temperature and reference strain rate

(2) 在变形温度为 423 K 时，式 (1) 可转换为式 (4)。

$$\sigma = (A_1 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3 + B_4\epsilon^4) \cdot (1 + C_1 \ln \epsilon^*) \quad (4)$$

式中： C_1 为应变速率硬化系数。

将式 (4) 变换为式 (5)。

$$\frac{\sigma}{A_1 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3 + B_4\epsilon^4} = 1 + C_1 \ln \epsilon^* \quad (5)$$

根据式 (3) 计算得到的 A_1 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4

和 0.1 和 0.01 s⁻¹ 应变速率下的真实应力、真实应变数据点,采用一次多项式进行线性拟合,获得 C₁ 的数值。

(3) 将式 (1) 转换为式 (6)。

$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4)(1 + C_1\ln\dot{\varepsilon}^*)} = 1 - \left(\frac{T - T_{\text{ref}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{ref}}}\right)^m \quad (6)$$

将 3 个应变速率与 4 个变形温度下的所有真实应力、真实应变数据点代入式 (6),修正拟合获得温度软化系数 *m* 的数值。根据上述步骤得到的材料参数如表 4 所示。

表 4 修正 J-C 本构模型的材料参数
Table 4 Material parameters of modified J-C constitutive model

参数	数值
<i>A</i> ₁	478.454
<i>B</i> ₁	585.75
<i>B</i> ₂	-3609.1
<i>B</i> ₃	8600.26
<i>B</i> ₄	-6676.2
<i>C</i> ₁	0.034
<i>m</i>	0.670

修正后的 J-C 本构模型如下:

$$\sigma = (487.454 + 585.75\varepsilon - 3609.1\varepsilon^2 + 8600.26\varepsilon^3 - 6676.2\varepsilon^4)(1 + 0.034\ln\dot{\varepsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{ref}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{ref}}}\right)^{0.67}\right] \quad (7)$$

2.3 修正 Johnson-Cook 本构模型的准确性分析

将参考温度为 423 K,应变速率分别为 0.1、0.01 和 0.001 s⁻¹ 时的实验数据与修正模型预测数据进行对比,如图 7 所示。由图 7 可以发现,修正后模型的预测数据与真实实验数据的误差在±5%之间。将参考应变速率为 0.001 s⁻¹,温度分别为 333、423、473 和 523 K 时的实验数据与修正模型预测数据进行对比,如图 8 所示,可以发现,修正后模型的预测数据与真实实验数据的误差也在±5%之间,模型精度有较大的提高。为进一步说明修正模型的预测精确度,将预测模型和实验所得真实应力进行对比,如图 9 所示,可以发现,修正 J-C 本构模型预测的真实应力与实验所得真实应力非常接近,说明该模型具有很高的预测精确度。

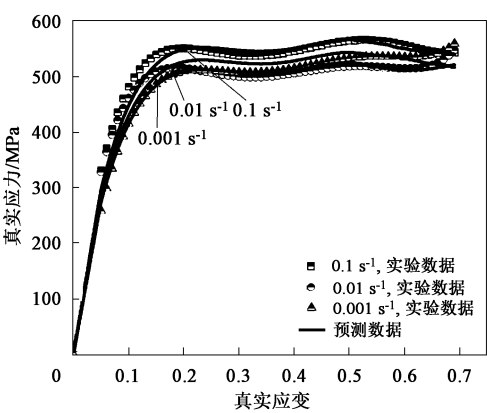


图 7 423 K 温度下的真实应力-真实应变实验数据与修正 J-C 本构模型预测数据对比

Fig. 7 Comparison of true stress-true strain between experimental data and predicted data by modified J-C constitutive model at temperature of 423 K

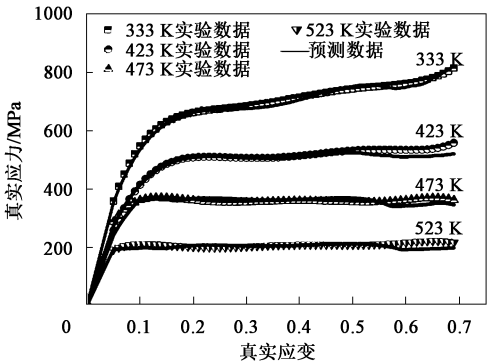


图 8 0.001 s⁻¹ 应变速率下的真实应力-真实应变实验数据与修正 J-C 本构模型预测数据对比

Fig. 8 Comparison of true stress-true strain between experimental data and predicted data by modified J-C constitutive model at strain rate of 0.001 s⁻¹

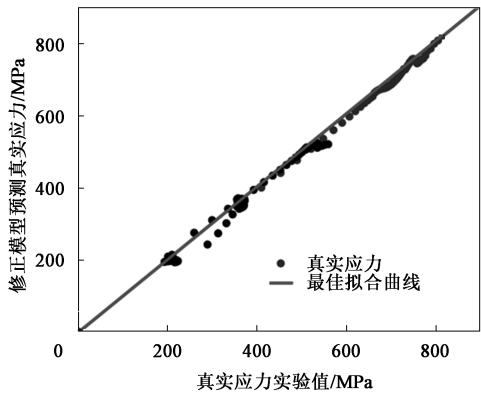


图 9 实验真实应力与修正模型预测真实应力对比

Fig. 9 Comparison of true stress between experiment and modified model prediction

3 结论

(1) 采用 Gleeble-3180 热物理模拟实验机对固

溶态 7050 铝合金进行 333~523 K 温度范围内的中温压缩实验,通过实验结果分析出温度和应变速率下的力学性能变化规律。实验结果表明,在铝合金中温阶段,随着温度的升高,铝合金动态软化效果明显增大,应变速率对应力的影响越大。

(2) 应变速率为 $0.001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$, 温度为 333~523 K 的条件下,分析拟合出修正 J-C 本构模型为:

$$\sigma = (487.454 + 585.75\varepsilon - 3609.1\varepsilon^2 + 8600.26\varepsilon^3 - 6676.2\varepsilon^4) (1 + 0.034 \ln \dot{\varepsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{ref}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{ref}}} \right)^{0.67} \right]$$

(3) 通过对真实应力-真实应变数据、经典 J-C 本构模型和修正 J-C 本构模型预测数据的对比验证,发现修正后模型的预测数据与真实应力-真实应变数据的偏差在 $\pm 5\%$ 以内,证明了修正后的 J-C 本构模型具有很高的预测准确性。

参考文献:

- [1] 姜中涛,汪鑫,周志明,等. 7050 铝合金锻件固溶处理工艺优化研究 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (6): 112-116.
Jiang Z T, Wang X, Zhou Z M, et al. Optimization of solution treatment process for 7050 aluminum alloy forgings [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (6): 112-116.
- [2] 王丹青. 7050 铝合金航空模锻件 T7452 工艺研究 [D]. 燕山: 燕山大学, 2019.
Wang D Q. Research on T7452 Process of Aviation Die Forging of 7050 Aluminum Alloy [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [3] 戴威然,田怡,秦龙万,等. 航空用 7150 高强铝合金发展现状 [J]. 云南冶金, 2018, 47 (3): 76-78, 88.
Dai W R, Tian Y, Qin L W, et al. The development situation of 7150 high strength aluminum alloy for aviation [J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47 (3): 76-78, 88.
- [4] 贺峰,杨双平,曹继敏,等. 冷变形和固溶时效对 Ti-25Nb-25Zr 合金性能的研究 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (7): 950-958.
He F, Yang S P, Cao J M, et al. Mechanical properties of Ti-25Nb-25Zr alloy in cold deformation and solution and aging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (7): 950-958.
- [5] 王德宏. 7050 高强铝合金反挤压及固溶时效热处理研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
Wang D H. Research on Influence of Backward Extrusion and Solution Aging Heat Treatment on 7050 Aluminum Alloy [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [6] 袁辉,赵作福,赵宇擎,等. 航空用 7050 铝合金热处理工艺的研究进展 [J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2022, 42 (4): 223-227.
Yuan H, Zhao Z F, Zhao Y Q, et al. Research progress of heat treatment process of 7050 aluminum alloy for aviation [J]. Journal of Liaoning University of Technology: Natural Science Edition, 2022, 42 (4): 223-227.
- [7] Koç M, Culp J, Altan T. Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174 (1-3): 342-354.
- [8] Xu L Z, Zhan L H, Xu Y Q, et al. Thermomechanical pretreatment of Al-Zn-Mg-Cu alloy to improve formability and performance during creep-age forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293: 117089.
- [9] 吴道祥,林林,陈焕良,等. 固溶温度对 7050 铝合金组织及性能的影响 [J]. 铝加工, 2018, 241 (2): 27-34.
Wu D X, Lin L, Chen H L, et al. Effect of solution temperature on microstructure and Mechanical properties of aluminum alloy 7050 [J]. Aluminum Fabrication, 2018, 241 (2): 27-34.
- [10] Teng H H, Xia Y F, Pan C H, et al. Modified voce-type constitutive model on solid solution state 7050 aluminum alloy during warm compression process [J]. Metals, 2023, 13 (5): 989.
- [11] 陈修梵,彭小燕,张慧颖,等. 7050 铝合金热压缩变形的流变行为及微观组织演变 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (12): 1237-1242.
Chen X F, Peng X Y, Zhang H Y, et al. Characterization of flow behavior and microstructural evolution of 7050 aluminum alloy during hot compression process [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35 (12): 1237-1242.
- [12] 贾耀军,周杰,董旭刚,等. 7050-H112 铝合金的高温流变行为和动态再结晶 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (4): 8-10.
Jia Y J, Zhou J, Dong X G, et al. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization of 7050-H112 aluminium alloy [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (4): 8-10.
- [13] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.
- [14] 龙帅. 合金热变形行为快速求解方法与应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
Long S. Research on the Rapid Solution and Analysis Method for Hot Deformation Behavior of Alloys and Its Application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [15] 王敬,梁强,李永亮. 5A06 铝合金的高温变形行为分析及本构模型研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 204-211.
Wang J, Liang Q, Li Y L. Hot deformation behavior analysis and constitutive model study of 5A06 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 204-211.
- [16] 辛春亮,薛再清,涂建,等. 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
Xin C L, Xue Z Q, Tu J, et al. Material Parameters Manual for Finite Element Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [17] 叶建华,陈明和,王宁,等. 基于修正 JC 模型的 TA12 钛合金高温流变的行为 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (4): 733-741.
Ye J H, Chen M H, Wang N, et al. Flow behavior of TA12 titanium alloy based on modified JC model at high temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (4): 733-741.