

基于 DMNR 模型的 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金本构方程

刘太盈¹, 韩莹莹², 王 磊³

(1. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074; 2. 北京动力机械研究所, 北京 100072;
3. 浙江省杭州市正才控股集团有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 采用 Gleeble-3500 热压缩模拟机对 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金进行了热压缩试验, 试验温度为 1223、1273、1323 和 1373 K, 应变速率为 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹, 探究了 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金在高温热压缩时, 应力 σ 与应变 ε 、温度 T 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 之间的关系, 并建立了基于二次非线性回归 (DMNR) 模型的本构方程。研究发现: 在同一应变速率下, 随着温度的升高, 流动应力呈现下降趋势, 在同一温度条件下, 随着应变速率的升高, 流动应力呈上升趋势, AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金具有明显的应变速率强化和高温软化现象。基于 DMNR 模型回归建立了 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金的高温本构方程, 通过对比分析发现所建立的模型具有较好的预测性能, 平均相对误差为 9.94%。

关键词: 高熵合金; 流变特征; 本构方程; DMNR 模型; 流动应力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.035

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 06-0258-07

Constitutive equation on AlCoCrFeNi_{0.6} high entropy alloy based on double multiple nonlinear regression model

Liu Taiying¹, Han Yingying², Wang Lei³

(1. Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China; 2. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 100072, China; 3. Zhejiang Hangzhou Zhengcai Holding Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: The hot compression test of AlCoCrFeNi_{0.6} high entropy alloy was carried out by hot compression machinery Gleeble-3500 at test temperatures of 1223, 1273, 1323 and 1373 K and strain rates of 0.001, 0.01, 0.1 and 1 s⁻¹, and the relationship between flow stress σ and strain ε , temperature T and strain rate $\dot{\varepsilon}$ was explored. Then, the constitutive equation based on the double multiple nonlinear regression (DMNR) model was established. The results show that under the same strain rate, with the increasing of temperature, the flow stress shows a downward trend, and under the same temperature condition, the flow stress shows an increases trend with the increasing of strain rate. Therefore, AlCoCrFeNi_{0.6} high entropy alloy has obvious strain rate strengthening and high temperature softening phenomenon. Based on double multiple nonlinear regression (DMNR) model, the high-temperature constitutive equation of AlCoCrFeNi_{0.6} high entropy alloy is established. Through comparative analysis, it is found that the established model has good prediction performance, and the average relative error is 9.94%.

Key words: high entropy alloy; rheological characteristics; constitutive equation; DMNR model; flow stress

高熵合金是近年来金属材料研究的热点之一, 它由 5 种或者 5 种以上主要元素组成, 每种主元的摩尔含量在 5%~35% 之间^[1-2]。传统合金设计理论认为, 合金中加入元素种类过多容易导致合金产生金属间化合物等脆性相或复杂相, 从而降低材料的塑性和韧性。但是, 高熵合金由于具有较高的混合

熵, 各种元素之间具有较大的相容性, 可避免因相分离而生成端际固溶体或形成金属间化合物, 促进了简单相的形成^[3-4]。因此, 高熵合金的相结构简单, 一般表现为面心立方 (FCC)、体心立方 (BCC) 或者 FCC+BCC 的双相结构^[5-6], 具有高强度和良好塑韧性的组合, 以及耐高温、耐腐蚀和高的抗氧化性等优良性能。高熵合金拥有这些优异的性能主要是基于高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和鸡尾酒效应^[7-8]。

本构模型是材料高温变形的数学表达, 它描述了应力与变形参数 (变形温度、应变速率和应变

收稿日期: 2022-08-04; 修订日期: 2022-11-19

基金项目: 国防科技 173 计划技术领域基金 (2021-JCJQ-JJ-0197)

作者简介: 刘太盈 (1987-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: ltaiynglove@163.com

等)之间的关系。对于材料高温本构模型的描述可以分为两类:一类是基于高温应力-应变曲线、采用回归方法建立的模型,称为唯象型本构模型;另一类是基于材料高温变形机理建立的变形本构模型,称为机理型本构模型。唯象型本构模型主要有 Johnson-Cook 模型^[9]、Khan-Huang-Liang 模型^[10]和 Arrhenius-type 模型^[11-12]等;机理型本构模型主要有 Zerilli-Armstrong 模型^[13-14]、动态再结晶模型^[15]等。近年来,不少学者也开展了针对高熵合金材料的高温变形研究^[16-20],宋繁策等^[16]采用 Arrhenius 本构模型建立了 AlFeCoNiMo_{0.2} 高熵合金的本构方程,并建立了该材料的热加工图,为该合金热挤压工艺的制定及优化提供了有效依据。针对 FeCoCrNiC_{0.05} 高熵合金,彭需发等^[18]研究了该合金在高温条件下的变形行为,分析了热变形参数对合金流动应力和显微组织的影响规律,建立了该合金在不同变形条件下的动态软化机制。Eletti R R 等^[19]结合 Z 参数和 Arrhenius 模型建立了 CoCrFeMnNi 高熵合金的高温变形本构模型,并基于 EBSD 对材料的动态再结晶行为进行了分析,发现动态再结晶晶粒沿初始晶界成核,形成项链状结构。Ahmed M Z 等^[20]对 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金的高温变形行为进行了研究,基于应力-应变曲线获得材料的激活能、应力指数和 Z 参数,进一步建立材料本构模型。AlCoCrFeNi 系高熵合金具有高强度、高硬度,同时具有良好的塑韧性,更具发展潜力^[21]。

本文以 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金为研究对象,在温度为 1223~1373 K 和应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 下进行热压缩试验,讨论了不同条件下的流变应力特征,并且构建了基于二次非线性回归的材料高温本构方程。

1 试验与材料

试验材料为 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金,以纯度大于 99.9% 的铝、钴、铬、铁和镍金属单质为原料,使用真空电弧炉在高纯度氩气保护下熔炼,熔炼前先去除原料表面氧化皮,再用丙酮清洗、干燥。反复熔炼多次以确保成分的均匀性,其成分(%,质量分数)为 Al12.1-Co22.0-Cr21.4-Fe22.2-Ni22.3,其原始铸态金相组织如图 1 所示。由图 1 可知,铸态下由大量平行的柱状树枝晶构成,并且为典型的树枝晶结构,一次枝晶比较发达,二次枝晶相对较小,二次枝晶臂长约为 35 μm、臂宽约为 10 μm。白色部分为 FCC 结构(枝晶),黑色部分为 BCC 结

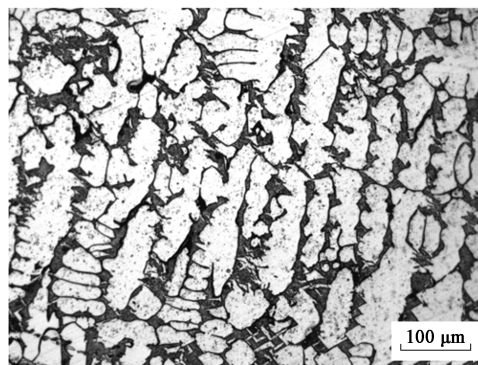


图 1 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金铸态金相组织图

Fig. 1 As-cast metallographic structure diagram of AlCoCrFeNi_{0.6} high entropy alloy

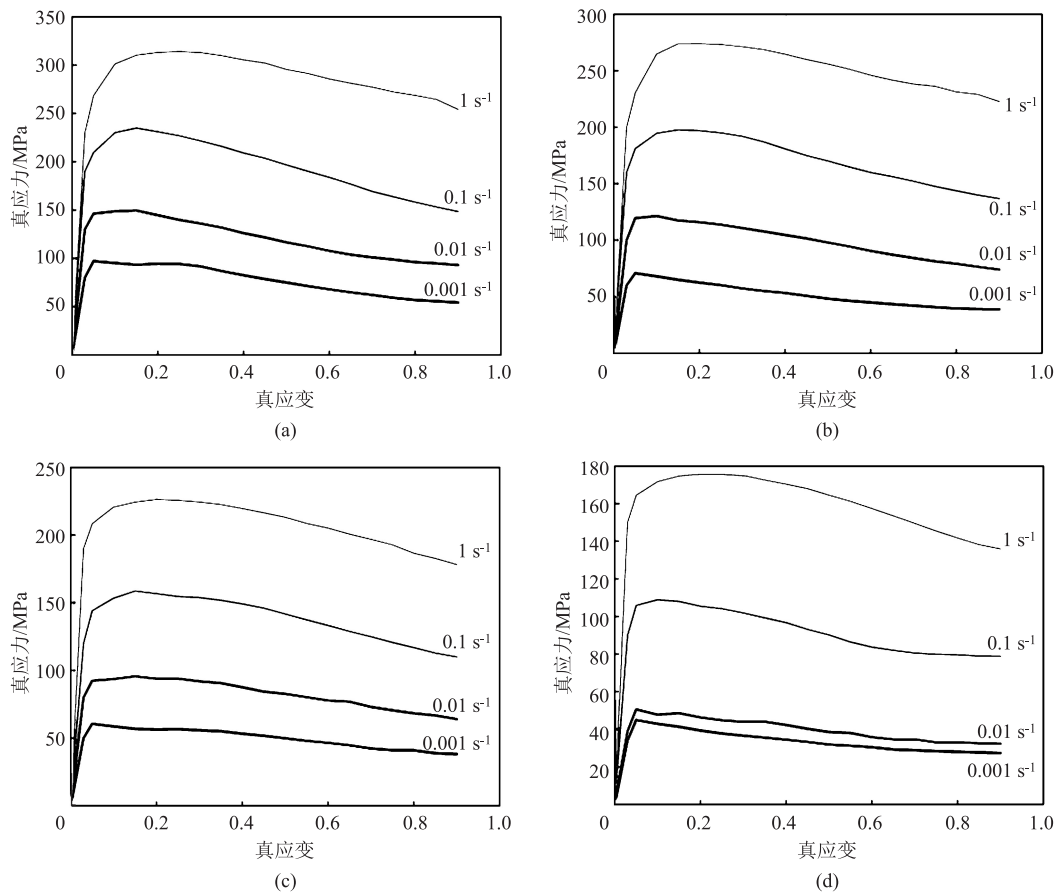
构(枝晶间),其中 FCC 相占 61.5%,BCC 相占 38.5%。原始组织的平均晶粒尺寸为 32.4 μm。

为了研究合金的热变形行为,利用线切割从铸锭上切割若干个 Φ8 mm×12 mm 的圆柱形试样。在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行试样热模拟压缩,试验前在试样两端垫上石墨片并涂抹润滑剂,以减少试样与压头间的摩擦。试验温度分别为 1223、1273、1323 和 1373 K,应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹。首先以 10 °C·s⁻¹ 的速度从室温加热至试验温度,保温 3 min,使得样品内部温度均匀,再以一定的应变速率对试样进行压缩,变形量为 60%。试验完成后迅速水淬,保留热变形组织。最终系统中得到相应的时间、载荷、位移、温度、真应力和真应变等试验数据。将压缩后的试样从中间切开,截面垂直于压缩方向,经过打磨、抛光后使用王水(盐酸:硝酸=3:1)腐蚀,然后在金相显微镜下观察显微组织。

2 结果与讨论

2.1 流动应力曲线

图 2 为不同温度和应变速率组合下的 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金的真应力-真应变曲线。从图 2 可以发现:在相同温度条件下,随着应变速率的升高,流动应力逐渐增大,表现出明显的应变速率强化效应;在同一应变速率条件下,伴随着温度的升高,流动应力逐渐降低,有明显的高温软化现象。此外,不同变形条件下的真应力-真应变曲线均表现为先上升,到达峰值应力后逐渐下降,表现出明显的动态软化现象,可以推测,在累积一定的变形能量后,在受载材料中发生了不同程度的动态再结晶效应,

图 2 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金的高温流动应力曲线

(a) 1223 K (b) 1273 K (c) 1323 K (d) 1373 K

Fig. 2 Isothermal flow stress curves of AlCoCrFeNi_{0.6} high entropy alloy

致使材料的软化程度大于加工硬化，所以，表现出到达峰值应力后，流动应力曲线随着应变的增加不断降低。图 3a 为不同测试条件下的峰值应力 σ_{peak} 与压缩最后时刻应力 σ_{last} 的对比，柱状图中最高位

置表示峰值应力，最低位置为最后时刻应力。从图 3a 可以发现：同一应变速率下，随着温度的升高，峰值应力和最后时刻应力值均不断下降；在相同温度下，随着应变速率的降低，具有同样的趋势。图

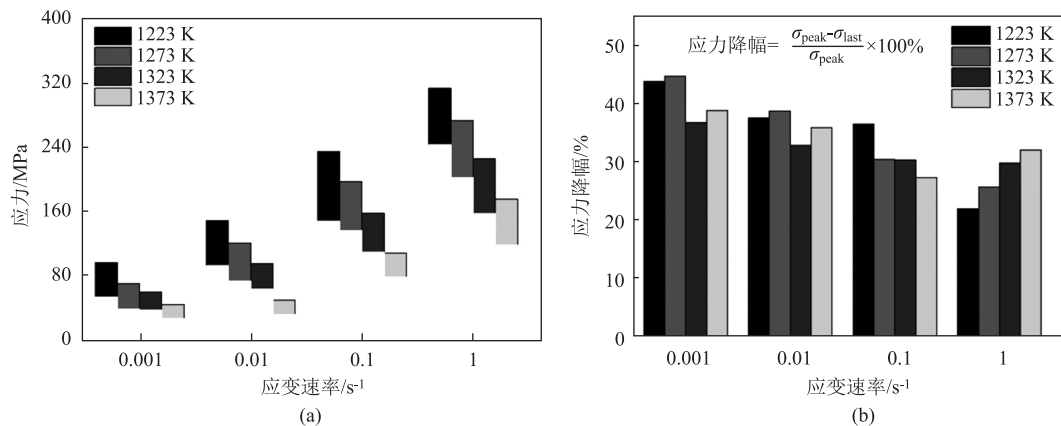


图 3 不同曲线的统计结果

(a) 峰值应力与最后时刻应力统计图 (b) 应力降幅图

Fig. 3 Statistical results of different curves

(a) Statistical diagram of peak stress and last moment stress (b) Stress reduction diagram

3b 给出了不同测试条件下的曲线上应力降幅的程度, 从图 3b 中可以发现: 应力降幅在 22%~44% 之间, 且随着应变速率的不断增加, 应力降幅呈逐渐减小趋势; 随着温度的升高, 基本上呈现下降趋势 (除 1 s⁻¹ 外)。应力降幅的变化主要和变形过程中的动态软化现象有关。

图 4 为试样在 950 °C、不同应变速率条件下样品的宏观形貌, 从图 4 中可以发现, 压缩后的试样不仅高度发生变化, 而且在横向发生了严重的鼓肚现象。当温度为 950 °C、应变速率为 1 s⁻¹ 时, 试样在鼓肚位置产生了明显的宏观裂纹, 这是由于温度较低时试样的塑性较差, 再加上应变速率过大导致试样在短时间内发生剧烈的塑性变形从而产生了宏观裂纹。图 5 为 950 °C/0.1 s⁻¹ 和 1050 °C/0.001 s⁻¹ 时热变形后的显微结构。由图 5a 统计后可知, 热变形后 FCC 相占 67.4%, BCC 相占 32.6%, 相比于铸态结构的 FCC 相增加、BCC 相减少, 这是由于高温有利于元素的扩散, 使得富 Al 和 Ni 的 BCC 相中 Al 元素和 Ni 元素析出, 导致 BCC 相转化为 FCC 相。部分原始晶粒在垂直于压缩方向上被拉长, 同时部分区域发生了动态再结晶。图 5b 为试样在 1050 °C/0.001 s⁻¹ 时热变形后的显微结构, 统计后可知, 热变形后 FCC 相占 81.3%, BCC

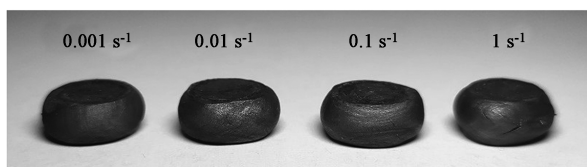


图 4 950 °C、不同应变速率条件下的样品

Fig. 4 Samples at 950 °C and different strain rates

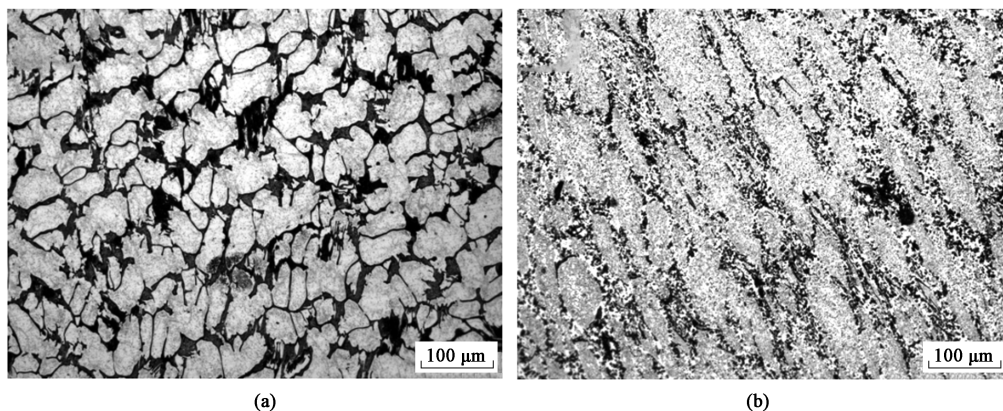


图 5 变形后的微观组织

(a) 950 °C/0.1 s⁻¹ (b) 1050 °C/0.001 s⁻¹

Fig. 5 Microstructures after deformation

相占 18.7%。由此可知, 温度升高会加剧 BCC 相转化为 FCC 相, 因为升温会加快原子的扩散, 从而有利于 BCC 相的溶解。由图 5 可以发现, 在此条件下两相均发生了动态再结晶, 再结晶晶粒主要分布在 BCC 相, 但是 FCC 相也存在部分再结晶晶粒, 这与 950 °C 时是不同的。说明只有当温度达到一定高度时 (1050 °C), FCC 相才会发生动态再结晶, 因为高温有利于原子扩散、晶界迁移, 因此有利于再结晶。

2.2 DMNR 本构方程建立

二次非线性回归模型是考虑材料变形条件的多重耦合作用, 在该模型中分别采用不同的贡献函数 $f_1 \sim f_6$ 来表示不同变形参数及耦合作用, 具体为: $f_1 = f_\varepsilon [h_1(\varepsilon)]$ (应变作用), $f_2 = f_{\dot{\varepsilon}} [h_2(\dot{\varepsilon})]$ (应变速率作用), $f_3 = f_T [h_3(T)]$ (温度作用), $f_4 = f_{\varepsilon-T} [h_4(T, \varepsilon)]$ (应变与温度耦合作用), $f_5 = f_{\dot{\varepsilon}-T} [h_5(\dot{\varepsilon}, T)]$ (应变速率与温度耦合作用) 和 $f_6 = f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}} [h_6(\varepsilon, \dot{\varepsilon})]$ (应变与应变速率耦合作用)。其中, ε 为应变、 $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率、 T 为温度、 $h_1 \sim h_6$ 为不同变量的函数。首先, 通过回归平均流动应力与变形参数获得各个贡献函数, 随后回归不同方程的权重值获得最终的本构方程。其回归方程为:

$$\sigma = f_0 f_1^{w_1} f_2^{w_2} f_3^{w_3} f_4^{w_4} f_5^{w_5} f_6^{w_6} = f_0 \prod_{j=1}^6 f_j^{w_j} \quad (1)$$

式中: σ 为平均流动应力; f_0 为修正系数; $w_1 \sim w_6$ 分别为不同变形参数的贡献函数的权重指数。

为获得各贡献函数 $f_1 \sim f_6$, 需针对不同影响因素与平均流动应力进行回归分析, 具体流程: (1) 基于所有变形条件的平均流动应力与应变的关系回归贡献函数: $f_\varepsilon = a_i \varepsilon^i$, 其中, a_i 、 i 分别为应变系数和应变指数; (2) 基于所有变形条件的平均流动应力

与应变速率的关系回归贡献函数: $f_{\dot{\varepsilon}} = (\dot{\varepsilon})^b$, 其中, b 为应变速率指数; (3) 基于所有变形条件的平均流动应力与温度的关系回归贡献函数: $f_T = \exp[c(T)/T]$, 其中, c 为温度 T 的函数; (4) 基于所有变形条件的平均流动应力与应变和温度的关系回归贡献函数: $f_{\varepsilon-T} = \exp[d(\varepsilon)/T\varepsilon]$, 其中 d 为应变 ε 的函数; (5) 基于所有变形条件的平均流动应力与温度和应变速率的关系回归贡献函数: $f_{\dot{\varepsilon}-T} = (\dot{\varepsilon})^{e(T)}$, 其中 e 为温度 T 的函数; (6) 基于所有变形条件的平均流动应力与应变和应变速率的关系回归贡献函数: $f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}} = (\varepsilon/\dot{\varepsilon})^f$, 其中, f 为指数; (7) 基于式 (1) 回归各个贡献函数的权重。

基于上面的计算流程, 对 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金的 DMNR 本构关系模型进行回归分析, 如图 6 所示, 获得的贡献函数如下:

$$f_{\varepsilon} = -2802.819\varepsilon^6 + 8669.029\varepsilon^5 - 10717.106\varepsilon^4 + 6855.215\varepsilon^3 - 2444.068\varepsilon^2 + 408.202\varepsilon + 122.263 \quad (2)$$

$$f_{\dot{\varepsilon}} = 5.454(\dot{\varepsilon})^{0.214} \quad (3)$$

$$f_T = \exp\left(\frac{1.319T + 7959.032}{T}\right) \quad (4)$$

$$f_{\varepsilon-T} = \exp\left(\frac{2.807}{T\varepsilon} + 6.627\right) \quad (5)$$

$$f_{\dot{\varepsilon}-T} = (\dot{\varepsilon})^{(0.0001837T)} \quad (6)$$

$$f_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}} = (\varepsilon/\dot{\varepsilon})^{0.000812} \quad (7)$$

在以上分析的基础上, 再通过一次多元非线性回归就能够获得各贡献函数的权重, 见表 1。

表 1 DMNR 模型贡献函数的回归权重

Table 1 Regression weights of contribution functions for DMNR model

参数	f_0	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
数值	-5.165	1.025	-0.514	1.299	0.390	1.301	-27.059

最后, 将表 1 中回归出的各权重代入至 DMNR 模型中, 就可以得到 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金高温变形条件下的平均流动应力 σ 关于应变、应变速率、温度以及他们之间交互作用影响的本构方程:

$$\sigma = 0.00571 \times (-2802.819\varepsilon^6 + 8669.029\varepsilon^5 - 10717.106\varepsilon^4 + 6855.215\varepsilon^3 - 2444.068\varepsilon^2 + 408.202\varepsilon + 122.263)^{1.025} \times 0.418 \left[(\dot{\varepsilon})^{-0.110} \times \exp\left(\frac{1.713T + 10338.783}{T}\right) \right] \times \exp\left(\frac{1.095}{T\varepsilon} + 2.585\right) \times (\dot{\varepsilon})^{(0.000238T)} \times (\varepsilon/\dot{\varepsilon})^{-0.0220} \quad (8)$$

图 6 为试验结果和预测结果的对比如, 由图 6

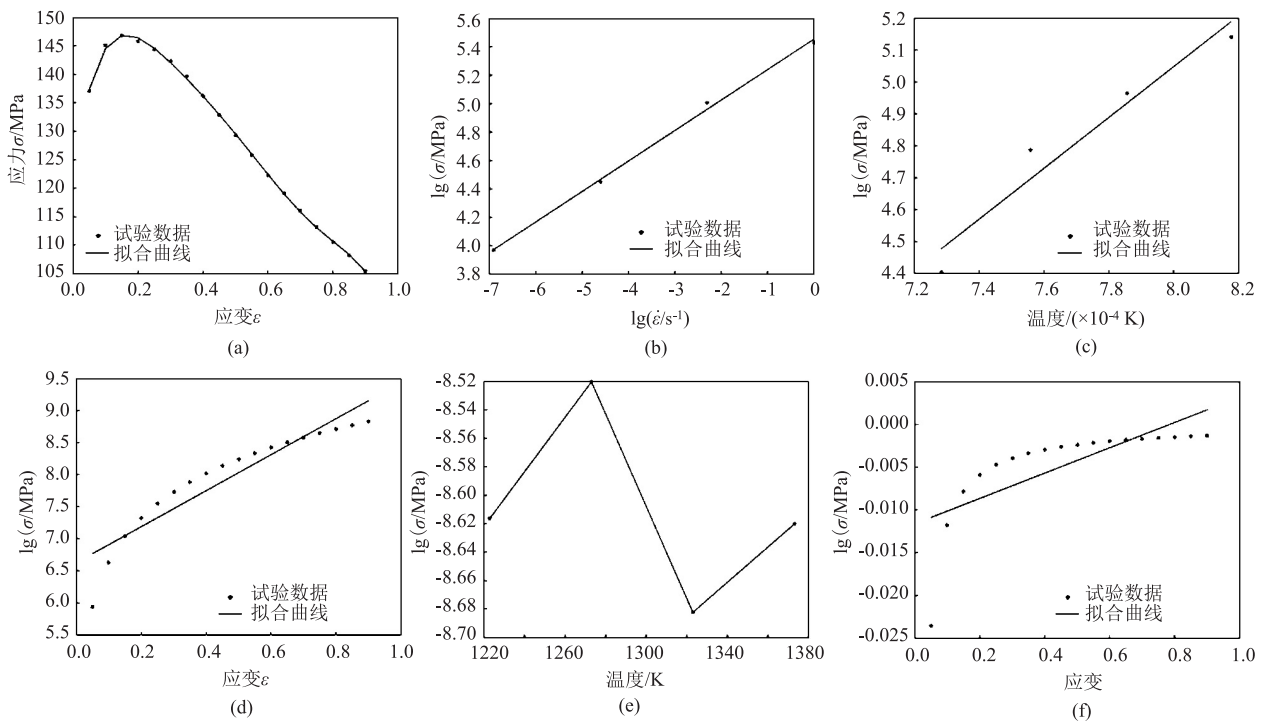


图 6 平均流动应力及各参数拟合曲线

(a) 应变 (b) 应变速率 (c) 温度 (d) 应变-温度耦合 (e) 应变速率-温度耦合 (f) 应变-应变速率耦合

Fig. 6 Fitting curves of average flow stress and various parameters

(a) Strain (b) Strain rate (c) Temperature (d) Strain-temperature coupling (e) Strain rate-temperature coupling (f) Strain-strain rate coupling

可知, 采用 DMNR 模型能够对 AlCoCrFeNi_{0.6} 高熵合金的高温流动应力进行预测, 为了对所建立的本构方程的预测能力进行评估, 引入平均相对误差 *AARE* 进行误差分析, 表达式为:

$$AARE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{E_k - P_k}{E_k} \right| \times 100 \quad (9)$$

式中: E_k 和 P_k 为试验和预测的第 k 个流动应力值, MPa; N 为试验和预测数据数量。

通过统计计算, 可知整体平均相对误差为 9.94% (图 7), 表明所建立的考虑了应变补偿的本构方程有较好的预测能力。对不同变形条件下的结果进行对比分析, 如图 8 所示, 其中, 不同符号表示不同温度和应变速率下的预测应力, 不同曲线表示不同温度和应变速率下的试验应力, 可以发现, 在 1123 K、高应变速率和低应变条件下, 模型预测

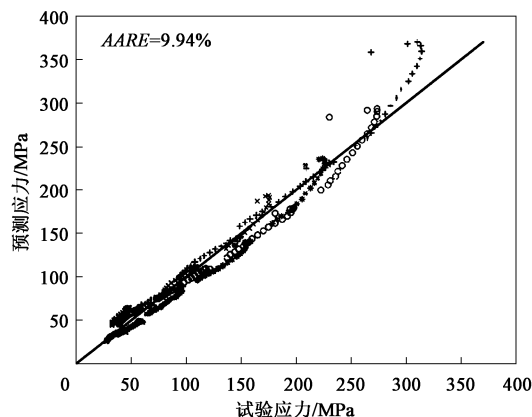


图 7 流动应力预测与试验数据相关性

Fig. 7 Correlation between predicted and experimental data of flow stress

性较差。

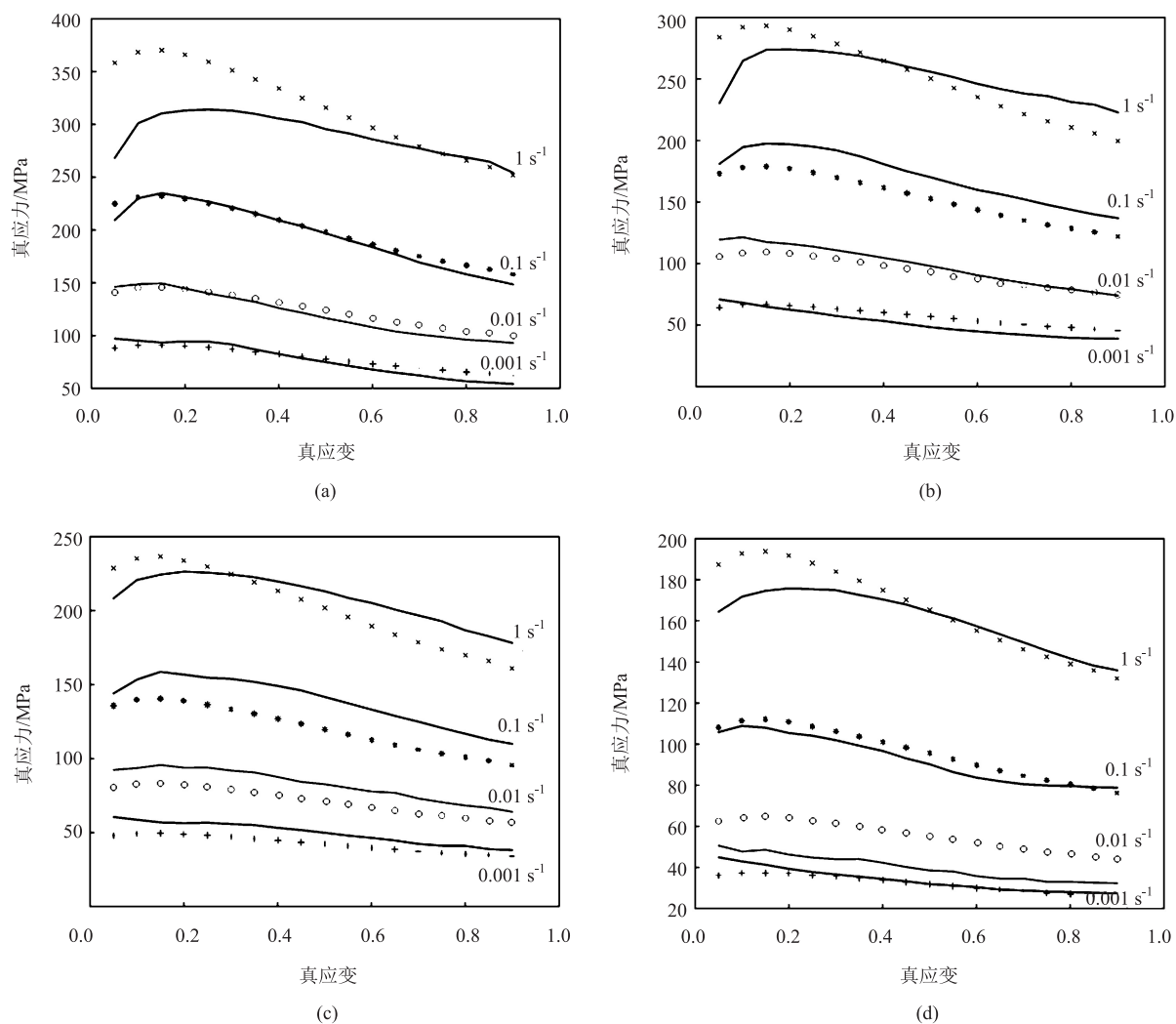


图 8 不同温度下的试验结果与预测结果对比

(a) 1223 K (b) 1273 K (c) 1323 K (d) 1373 K

Fig. 8 Comparison between experimental and predicted results at different temperatures

3 结论

(1) 在相同温度条件下, 随着应变速率升高, 流动应力逐渐增大, 表现出明显的应变速率强化效应; 在相同应变速率下, 随着温度的不断升高, 流动应力逐渐降低, 有明显的高温软化现象。根据统计结果发现应力降幅在 22%~44% 之间, 应力降幅的变化主要和变形过程中的动态软化现象有关。

(2) 基于 DMNR 模型建立了 $\text{AlCoCrFeNi}_{0.6}$ 高熵合金的热变形本构方程。在所研究变形条件范围内, 建立的本构方程能够较好地预测材料的高温流动应力, 其平均相对误差 $AARE$ 为 9.94%。对比分析预测和试验结果, 可知该模型在 1123 K、高应变速率和低应变条件下的预测能力相对较差。

参考文献:

- [1] Otto F, Dlouhy A, Somsen C, et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61 (15): 5743–5755.
- [2] Chen M R, Lin S J, Yeh J W, et al. Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of $\text{Al}_0.5\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37 (5): 1363–1369.
- [3] Yan Y, Gao W, Wang X, et al. Microstructures and compressive properties of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys prepared by arc melting and directional solidification [J]. *Materials Research Express*, 2022, 9 (1): 016510.
- [4] Dbm A, Onsa B. A critical review of high entropy alloys and related concepts [J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448–511.
- [5] Li Z, Pradeep K G, Deng Y, et al. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off [J]. *Nature*, 2016, 534 (7606): 227–230.
- [6] Cantor B, Chang I, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 375–377: 213–218.
- [7] Yeh J W. Recent progress in high-entropy alloys [J]. *European Journal of Control*, 2006, 31 (6): 633–648.
- [8] Yuji I, Blazej G, Fritz K. Ab initio phase stabilities and mechanical properties of multicomponent alloys: A comprehensive review for high entropy alloys and compositionally complex alloys [J]. *Materials Characterization*, 2019, 147: 464–511.
- [9] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [A]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics* [C]. Netherlands, 1983.
- [10] Sung J H, Kim J H, Wagoner R. A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature [J]. *International Journal of Plasticity*, 2010, 26 (12): 1746–1771.
- [11] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri A. A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr-1Mo steel [J]. *Computational Materials Science*, 2009, 47 (2): 568–576.
- [12] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri A. Constitutive analysis to predict high-temperature flow stress in modified 9Cr-1Mo (P91) steel [J]. *Materials & Design*, 2010, 31 (2): 981–984.
- [13] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61 (5): 1816–1825.
- [14] Samantaray D, Mandal S, Borah U, et al. A thermo-viscoplastic constitutive model to predict elevated-temperature flow behaviour in a titanium-modified austenitic stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 526 (1): 1–6.
- [15] Lin Y, Chen M S, Zhong J. Prediction of 42CrMo steel flow stress at high temperature and strain rate [J]. *Mechanics Research Communications*, 2008, 35 (3): 142–150.
- [16] 宋繁策, 李鉴霖, 韩金科, 等. $\text{AlFeCoNiMo}_{0.2}$ 高熵合金热变形行为及热加工图 [J]. *精密成形工程*, 2021, 13 (6): 7–12.
- [17] Song F C, Li J L, Han J K, et al. Hot deformation behavior and processing map of $\text{AlFeCoNiMo}_{0.2}$ high-entropy alloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13 (6): 7–12.
- [18] 梅金娜, 薛飞, 吴天栋, 等. FeCrNiMn 高熵合金本构方程的建立 [J]. *材料导报*, 2021, 35 (S1): 6–11.
- [19] Mei J N, Xue F, Wu T D, et al. Establishment of constitutive equation of FeCrNiMn high entropy alloy [J]. *Materials Reports*, 2021, 35 (S1): 6–11.
- [20] 彭需发, 李慧中, 梁霄鹏, 等. $\text{FeCoCrNiC}_{0.05}$ 高熵合金的高温变形行为及动态软化机制 [J]. *湖南有色金属*, 2020, (5): 54–59.
- [21] Peng X F, Li H Z, Liang X P, et al. $\text{FeCoCrNiC}_{0.05}$ high-entropy alloy high temperature deformation behavior and dynamic softening mechanism [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2020, (5): 54–59.
- [22] Eleti R R, Bhattacharjee T, Zhao L, et al. Hot deformation behavior of CoCrFeMnNi FCC high entropy alloy [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 210: 176–186.
- [23] Ahmed M Z, Chadha K, Reddy S R, et al. Influence of process parameters on microstructure evolution during hot deformation of a eutectic high-entropy alloy (EHEA) [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51 (12): 6406–6420.
- [24] Zhang M, Hou J X, Yang H J, et al. Tensile strength prediction of dual-phase $\text{Al}_{0.6}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys [J]. *International Journal of Mineral Metallurgy and Materials*, 2020, 27 (10): 6–12.