

Monel400 合金热压缩变形流变应力本构方程

李积贤¹, 郭胜利², 刘生璞², 张九海¹

(1. 中色(宁夏)东方集团有限公司, 宁夏 石嘴山 753000;

2. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘要: **目的** 研究 Monel400 合金的热变形流变行为, 确定合金热压缩变形的流变应力本构方程。**方法** 在 Gleeble1500 热模拟机上对 Ni-Cu 固溶体单相合金 Monel400 进行等温热压缩实验, 研究 Monel400 合金在变形温度为 1173~1423 K、应变速率为 $0.01\sim 10\text{ s}^{-1}$ 时的流变应力; Monel400 合金的本构模型为含有 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函数模型, 通过回归分析获得了材料常数 $Q, \ln A, n, \alpha$ 与真应变 ε 的关系; 并对不同变形条件下的实测值与计算值进行对比。**结果** Monel400 合金的流变应力随温度的升高和应变速率的降低而降低; Monel400 合金流变应力的计算值与实验值吻合较好。**结论** 通过计算得到的本构模型能够较好地表征 Monel400 合金的高温流变特性。

关键词: Monel400 合金; 流变应力; 双曲正弦函数; 回归分析; 本构方程

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.021

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)04-0132-07

Flow Stress Constitutive Equation of Monel400 Alloy during Hot Compression

LI Ji-xian¹, GUO Sheng-li², LIU Sheng-pu², ZHANG Jiu-hai¹

(1. CNMNC, Shizuishan 753000, China;

2. General Research Institute of Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the hot deformation behaviors of Monel400 alloy and establish its constitutive equation of flow stress during thermal compression deformation. The hot compression tests of Ni-Cu solid solution single-phase alloy Monel400 were conducted at deformation temperature of 1173~1423 K and the strain rate of $0.01\sim 10\text{ s}^{-1}$ on a Gleeble-1500 thermal simulator. The constitutive equation of Monel400 alloy was represented by Zener-Hollomon parameter in a hyperbolic sine function, the relationship between material constant $Q, \ln A, n, \alpha$ and ε were evaluated by regression analysis. The comparison between the experimental and the calculated data under various processing conditions were provided. The flow stress decreased with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate. The flow stress calculated by the constitutive equation agreed well with the experimental values. Therefore, the developed constitution equations can be used to predict the high temperature flow behavior characteristic of Monel400 alloy.

KEY WORDS: Monel400 alloy; flow stress; hyperbolic sine function; regression analysis; constitutive equation

Monel400 合金是 Ni-Cu 固溶体的单相奥氏体合金, 具有较高的强度和优良的耐蚀性能, 同时还具有良好的机械性能^[1]。用 Monel400 合金制造的压力容器使用寿命长、检修周期长、维修费用低、事故发生

率低, 因此在石油化工、国防工业、核工业中应用广泛^[2-3]。然而, 由于 Monel400 合金的导热系数($21.744\text{ W/m}\cdot\text{K}$)和线膨胀系数($13.86\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$)较小^[4], 因此该合金的热裂倾向较强, 合金在焊接过程中局部受热

收稿日期: 2018-03-20

作者简介: 李积贤(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向为稀有金属材料加工工艺技术。

不均匀的条件下, 焊接接头出容易产生焊缝凝固裂纹^[5]。近年来, 国内外学者对 Monel400 合金展开了一系列的研究, 但该合金在高温下热变形性能的研究很少。

流变应力是金属在热塑性加工过程中塑性变形能力的基本反映, 是选择热加工设备和制定热加工工艺参数的重要依据, 同时也能够反映金属材料在热变形过程中内部微观组织的演化^[6], 因此, 理解金属材料热变形过程中的流变应力行为非常重要, 对提高金属材料的热成形能力具有重要的意义^[7]。

文中以 Monel400 合金为研究对象, 采用 Gleeble1500 热模拟机进行等温热压缩实验, 获得 Monel400 合金在不同应变速率和变形温度下的真应力-真应变曲线, 并建立描述该合金流动特性的本构

方程, 研究 Monel400 合金在高温下的热变形行为, 为合理的热加工工艺参数提供参考, 并为其体积成形的研究和有限元数值模拟提供理论依据。

1 材料与方法

实验所用材料为 Monel400 合金, 其合金成分见表 1^[3]。Monel400 合金热压缩试样的尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$, 实验过程在 Gleeble1500 热模拟机上进行。为减小压缩过程中摩擦力对 Monel400 合金流变应力的影响, 压缩前将试样两端打磨光亮并涂抹石墨润滑剂。采用的变形温度为 1173, 1223, 1273, 1323, 1373, 1423 K, 应变速率为 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹, 加热速率为 10 °C/s, 压缩变形量为 50%。

表 1 Monel400 合金的化学成分 (质量分数)
Tab.1 Chemical composition of Monel400 alloy (mass fraction) %

C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Cu	Ti	Co	Mo	其他
0.12	0.1	1.04	65.8	0.085	1.15	31.8	0.045	0.012	0.014	—

2 分析与讨论

2.1 Monel400 合金真应力-真应变曲线

Monel400 合金在高温下进行等温压缩变形的真应力-真应变曲线见图 1。由图 1 可知, 在变形初期,

Monel400 合金的流变应力值迅速增大。这是因为在变形初期随着应变量的逐渐增大, 使 Monel400 合金变形组织内部的位错密度迅速增加, 从而增大了位错运动的阻力, 使加工硬化作用明显, 变形抗力逐渐增大。当达到一定的变形量后, 材料的变形抗力趋于平稳。

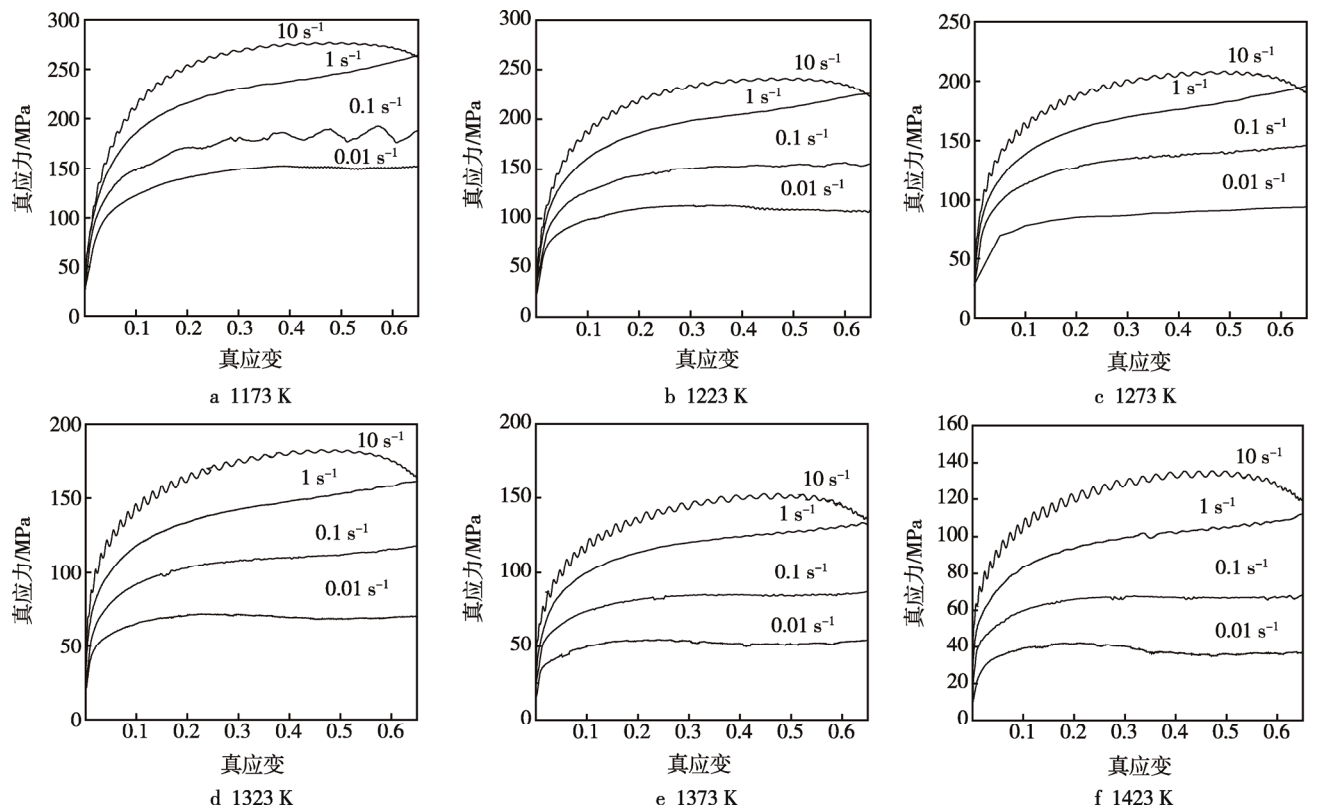


图 1 Monel400 合金热压缩变形真应力-真应变曲线
Fig.1 True stress-true strain curves of Monel400 alloy during hot compression

不同的变形温度、应变速率对 Monel400 合金高温流变应力的影响见图 2。由图 2 可知,在一定的应变速率下,随着变形温度的升高,合金的流变应力值下降明显。这是由于该合金的热激活作用随着变形温度的升高而增强,原子的平均动能也相应增加,原子在其平衡位置附近做热振动的振幅也增大,从而提高了位错与空位的活性,在降低了合金变形抗力的同时也增强了 Monel400 合金塑性变形的能力;同时,高温条件下的动态软化作用如动态回复与动态再结晶也得到了增强。在这些因素的复杂作用下,合金热变形过程中的临界切应力下降,流变应力值减小^[8-9]。可见, Monel400 合金是温度敏感材料。在一定的变形温度下,随着应变速率的增加, Monel400 合金的变形组织缺乏足够的时间用于形核与长大,引起合金内部位错数量的急剧增加,使合金表现出明显的加工硬化现象,具体表现为 Monel400 合金的流变应力迅速升高,说明 Monel400 合金具有正的应变速率敏感性^[10]。

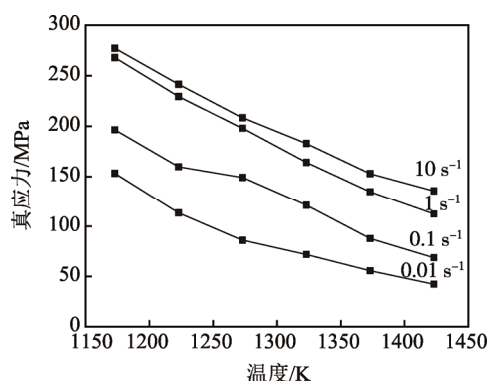


图 2 变形温度、应变速率对流变应力的影响

Fig.2 Effects of deformation temperature and strain rate on flow stress

2.2 流变应力本构方程

本构方程可以描述 Monel400 合金发生高温塑性变形时其流变应力、应变速率和变形温度之间的关系。由于金属或合金的热变形存在热激活过程,应变速率受热激活过程控制,通常采用 Sellars 和 Tegart^[11]提出的双曲正弦函数形式表示流变应力、应变速率与变形温度之间的关系^[12-13]。

$$\dot{\varepsilon} = A f(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$Z = A_1 \sigma^{n_1} = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad \alpha\sigma < 0.8 \quad (2)$$

$$A_2 \exp(\beta\sigma) = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad \alpha\sigma > 1.2 \quad (3)$$

式中: A , T , A_1 , n_1 , n , α , β 为常数; T 为热力学温度; R 为气体常数; Q 为变形激活能; σ 为真应力; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; σ , β , n_1 三者之间满足 $\sigma = \beta/n_1$ 。

根据 Zener 和 Hollomon^[14]的研究,可采用 Z 参数表示金属或合金在高温塑性变形过程中应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 与温度 T 之间的关系。

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

式中: Z 为 Zener-Hollomon 参数; A 为结构因子 (s^{-1}); α 为应力水平参数 (MPa^{-1}); n 为应力指数。

由双曲正弦函数反函数的定义式^[15]:

$$\sinh^{-1}(\alpha\sigma) = \ln \left[\alpha\sigma + (\alpha^2\sigma^2 + 1)^{1/2} \right] \quad (5)$$

可将流变应力表达为 Z 参数的函数。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可知,要获得材料的流变应力本构方程,必须得到 A , Q , n , α 等材料参数。对 Monel400 合金在不同应变量下的流变应力分别取值,以应变量 0.2 为例计算 Monel400 合金的材料常数。对式(2)和式(3)两边分别求对数得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \quad (7)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma \quad (8)$$

根据式(7)、式(8)分别作不同变形条件下应变速率与流变应力的关系曲线,如图 3 所示。

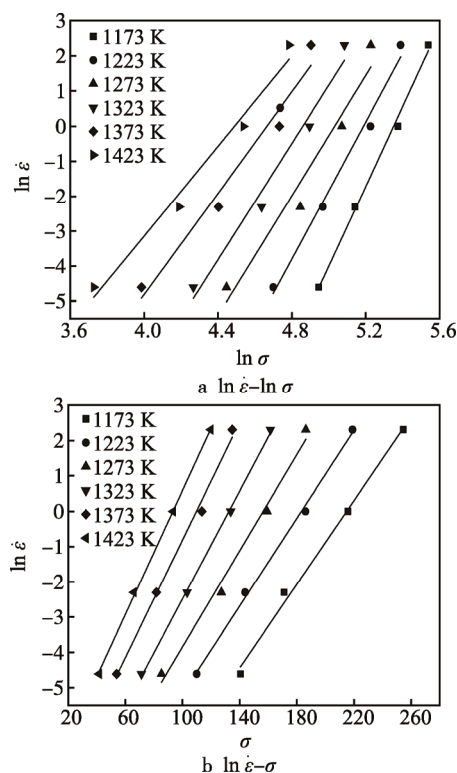


图 3 真应变 $\varepsilon=0.20$ 时, Monel400 合金在不同温度下应变速率与流变应力的关系曲线

Fig.3 When $\varepsilon=0.20$, the relation curve between strain rate and stress of Monel400 alloy at different temperature

n_1 取图 2a 中各直线斜率的平均值, 求得 $n_1=7.3215$; β 取图 2b 中各直线斜率的平均值, 求得 $\beta=0.0631$, 则 $\alpha=\beta/n_1=0.0086$ 。

对式(1)两边取对数, 并假定 Q 与温度不相关, 当温度为常数时可得到:

$$\ln \varepsilon = n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] + \ln A - \frac{Q}{RT} \quad (9)$$

由式(9)可知, $\ln \varepsilon$ 与 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 呈线性关系, 其斜率即为应力指数 n 。将 Monel400 合金在不同变形温度下的流变应力值与其相对应的应变速率分别代入式(9), 得到 $\ln \varepsilon - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系曲线见图 4。

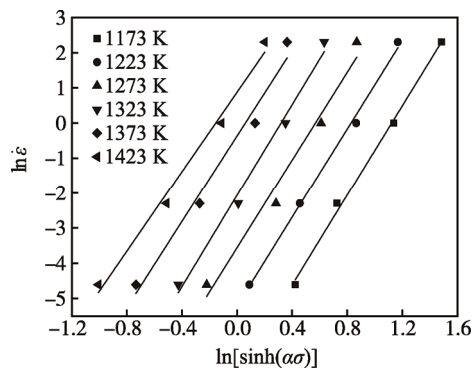


图4 真应变 $\varepsilon=0.20$ 时, Monel400 合金在不同变形温度下

$\ln \varepsilon$ 与 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 的关系曲线

Fig.4 When $\varepsilon=0.20$, relation curve between $\ln \varepsilon$ and $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ of Monel400 alloy at different temperature

取图 3 中各条曲线的斜率的平均值, 求得 $n=6.1979$ 。当应变速率一定时, 假设 Q 不随温度变化, 对式(4)等式两边取对数, 可得到:

$$\ln [\sinh(\alpha \sigma)] = A_3 + \frac{Q}{nRT} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 $1/T$ 呈线性关系, 作出 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - T^{-1}$ 关系曲线见图 5。

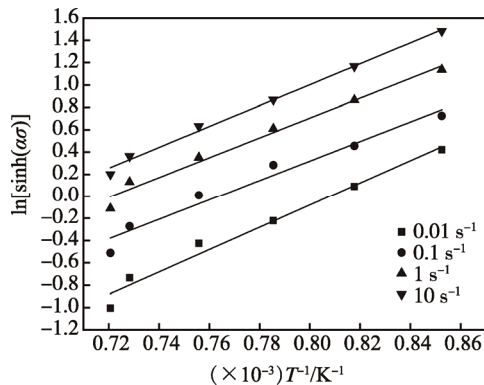


图5 真应变 $\varepsilon=0.20$ 时, Monel400 合金在不同变形温度下 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 T^{-1} 的关系曲线

Fig.5 When $\varepsilon=0.20$, the relation curve between $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ and T^{-1} at different temperature for Monel400 alloy

图 5 中 4 条直线斜率的平均值为 9276.4296, 进而可求得 Q 。图 5 所示为在不同的应变速率下, Monel400 合金流变应力的双曲正弦对数项和温度的倒数呈线性关系。这说明, Monel400 合金在经历高温变形时的变形温度和流变应力之间满足 Arrhenius 关系, 可采用 Z 参数来描述 Monel400 合金在高温塑性变形时的流变应力^[16]。考虑到热变形激活能不随温度发生变化, 对式(9)两边取微分为:

$$Q = Rn \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\varepsilon} \quad (11)$$

式(11)括号中的项 $\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)}$ 为当应变速率

不变时, $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - T^{-1}$ 关系曲线经过线性回归的斜率。将 $n=6.1979$, 以及图 5 中 4 条直线斜率的平均值代入式(11)中, 求得该 $Q=477.778$ kJ/mol。

将 Q 和不同的变形条件对应的应变速率和应力值逐一代入式(4)并对等式两边取对数, 可得到:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (12)$$

图6为 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系的拟合直线, 由拟合直线的截距可得到 $\ln A=41.7869$ 。

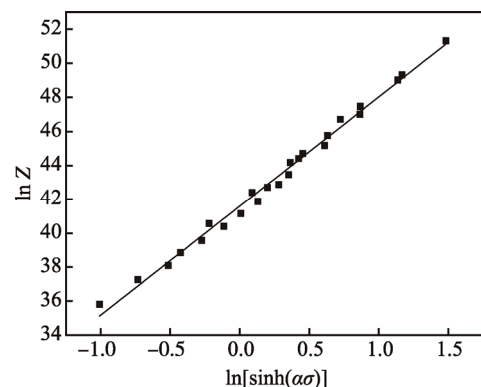


图6 Monel400 合金 Z 参数与流变应力的关系

Fig.6 Relationships between Z parameters and flow stress of Monel400 alloy

通常认为, 与变形温度和应变速率相比, 应变变量对流变应力的影响较小, 可以忽略不计。事实上, 应变变量对流变应力还是有一定的影响的, 尤其是在发生动态再结晶的情况下, 流变应力曲线是先达到峰值然后下降, 最后趋于平稳, 因此, 仅利用峰值应力或稳态应力不能够准确的反映复合材料在热变形过程中的流变行为。所以, 将应变变量作为一个重要的影响因素予以考虑, 对不同应变变量对应的材料常数进行求解, 结果见表2。

研究表明, 为了更加准确反映材料常数与应变变量之间的关系, 可以将材料常数表征为应变变量的多项式函数。利用五次多项式对材料常数进行拟合, 得到如图 7 所示的拟合结果。从图 7 可以看出, α, n 的拟合

效果非常理想, Q , $\ln A$ 的拟合结果虽有一定偏差, 但整体上各点很好地落在拟合线条上或两边, 拟合结果

较为理想, 这说明以应变量为自变量的五次多项式函数能够很好的表征材料常数的变化规律。

表 2 Monel400 合金在不同应变率时材料常数的计算结果
Tab.2 Calculation result of material constants of Monel400 alloy under different strain

ε	n	$\ln A$	α	Q
0.050	6.9639	42.5361	0.0122	503.8910
0.075	6.6034	41.8361	0.0110	484.4640
0.100	6.4967	41.5827	0.0102	480.1710
0.125	6.4313	44.2899	0.0093	476.6110
0.150	6.4455	42.2053	0.0092	487.6070
0.175	6.2431	41.4194	0.0087	473.5550
0.200	6.1979	41.7869	0.0086	477.7780
0.225	6.0679	40.9933	0.0085	470.0840
0.250	5.8558	40.2813	0.0086	464.4980
0.275	5.7583	40.0946	0.0086	463.4290
0.300	5.6847	39.8468	0.0086	461.4750
0.325	5.5096	38.8984	0.0088	453.5920
0.350	5.4600	39.5321	0.0088	460.3770
0.375	5.3218	38.8355	0.0089	454.2430
0.400	5.2492	38.2383	0.0089	448.0650
0.425	5.2001	37.4545	0.0088	438.7720
0.450	5.1202	37.3207	0.0090	438.6980
0.500	5.0649	36.7473	0.0089	431.7990
0.550	5.1281	37.5165	0.0087	437.6730
0.600	5.1928	37.7036	0.0085	438.1970

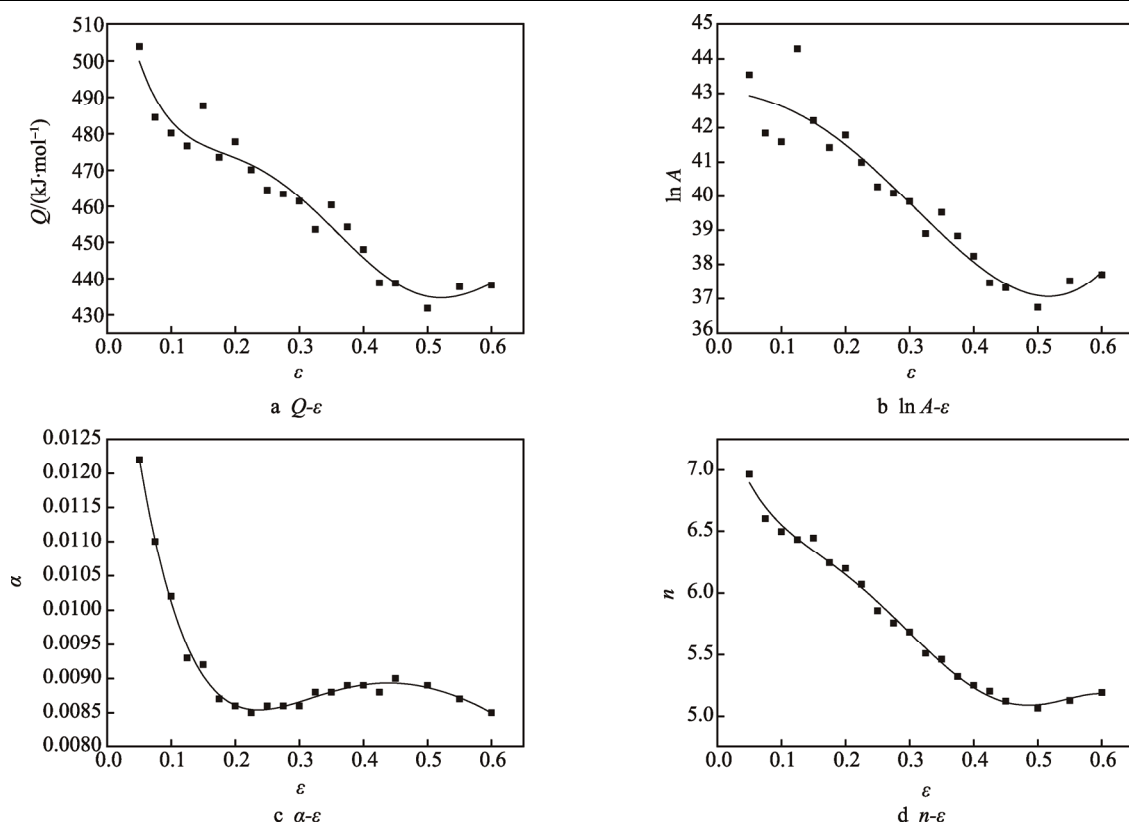


图 7 Q , $\ln A$, n , α 与真应变 ε 的关系
Fig.7 Relationships between Q , $\ln A$, n , α and ε

五次多项式拟合得到的 Q , $\ln A$, n , α 与真应变 ε 的关系式为:

$$\begin{cases} \alpha = 0.0158 - 0.0908\varepsilon + 0.4185\varepsilon^2 - 0.8856\varepsilon^3 + 0.8885\varepsilon^4 - 0.3516\varepsilon^5 \\ n = 7.5616 - 18.3913\varepsilon + 122.0661\varepsilon^2 - 465.3631\varepsilon^3 + 783.8588\varepsilon^4 - 467.5677\varepsilon^5 \\ Q = 537.0566 - 1044.1167\varepsilon + 7079.4421\varepsilon^2 - 23490.8590\varepsilon^3 + 34323.2678\varepsilon^4 - 1804.1798\varepsilon^5 \\ \ln A = 43.1252 - 3.3391\varepsilon - 4.0631\varepsilon^2 - 163.0694\varepsilon^3 + 348.6414\varepsilon^4 - 152.1782\varepsilon^5 \end{cases}$$

将以上用真应变 ε 表示的各材料常数 Q , n , A , α 为。

代入式(6), 则可得到 Monel400 合金的流变应力 σ 与真应变 ε 的函数关系式, 即合金的本构方程。

利用 Monel400 合金的本构方程, 就可以求出 Monel400 合金在不同应变率下的流变应力值, 如图 8 所示为 1173 K 温度下的实测值与拟合值关系。从图 8 可知, 在拟合直线的两端实测值与计算值吻合良好。在中间变形区域, 实测值与计算值虽有一定的偏差, 但整体分布在拟合直线的两边。拟合曲线的斜率为 1.088, 拟合效果良好。不同变形条件下的实测值与计算值对比结果见图 9。由图 9 可知, 不同变形条件下, 实测值与计算值吻合良好, 数据偏差较小, 变化趋势一致, 证明该本构方程可以较好地预测 Monel400 合金发生高温塑性变形时的流变应力行

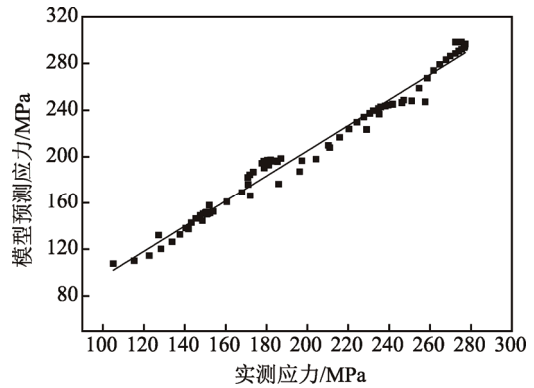


图 8 Monel400 合金在 1173 K 温度下的实测值与拟合值的对比

Fig.8 Comparison of predicted stress with measured stress of Monel400 alloy at 1173 K

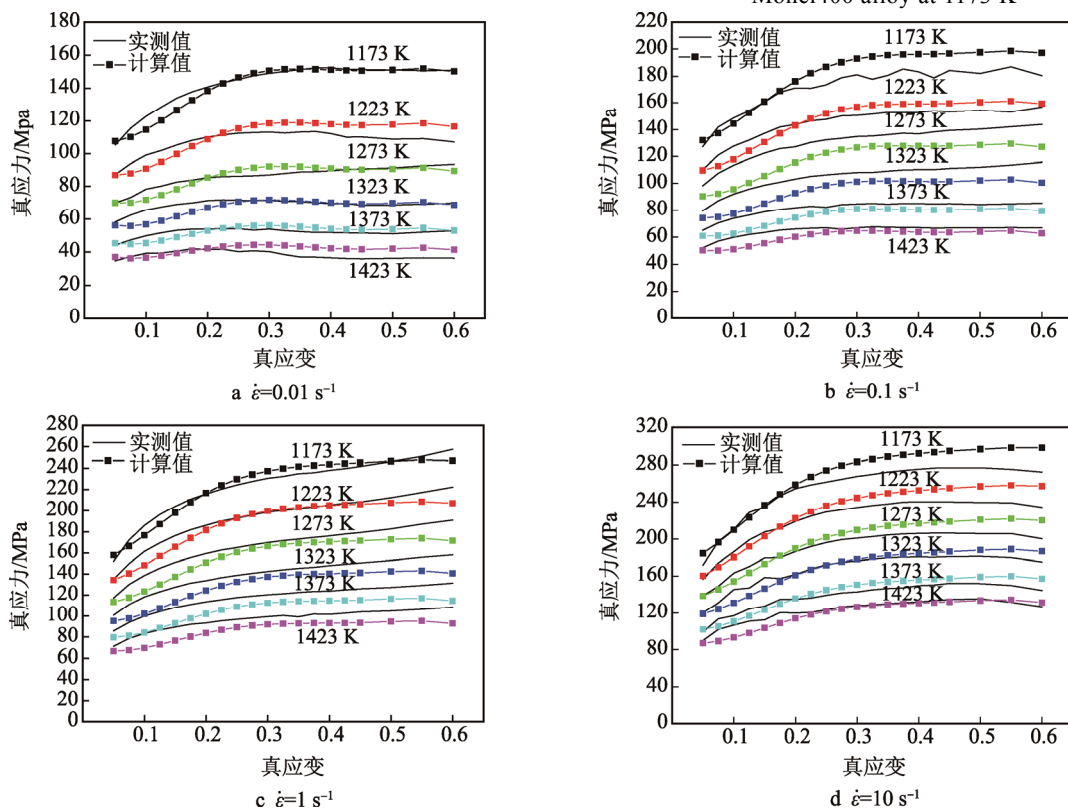


图 9 Monel400 合金在不同变形条件下实测值与计算值对比

Fig.9 Comparison of predicted stress with measured stress of Monel400 alloy in various deformation conditions

3 结论

通过对 Monel400 合金在不同变形条件下进行的高温压缩实验, 对其高温热变形行为进行研究, 得到

以下结论。

1) Monel400 合金在高温变形过程中的流变应力受变形温度和应变速率的影响较大, 具体表现为 Monel400 合金的流变应力值随着热变形过程中温度的升高而降低, 以及应变速率的增大而增大, 同时说

明 Monel400 合金具有正的应变速率敏感性。

2) 可以使用含有 Z 参数的双曲正弦本构模型描述 Monel400 合金的高温流变应力行为。应变对流变应力的影响由 Q , $\ln A$, n , α 等材料常数体现, 得到五次多项式。计算获得的本构方程可以预测 Monel400 合金的变形组织以及为热加工工艺的制定提供理论基础, 并可为该合金的有限元模拟提供数值模型。

参考文献:

- [1] 马付良, 李金龙, 曾志翔, 等. 外加电位对 Monel400 合金海水环境腐蚀磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 158—164.
MA Fu-Liang, LI Jin-Long, ZENG Zhi-xiang, et al. Effect of Applied Potential on the Tribocorrosion Behaviors of Monel 400 Alloy in Seawater[J]. Surface Technology, 2017, 46(11): 158—164.
- [2] 叶唐, 胡传顺. Monel400 合金腐蚀行为的研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(22): 36—38
YE Tang, HU Chuan-shun. Study of Corrosion Behavior of Monel 400 Alloy[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(22): 36—38.
- [3] PATIL D H, MUDIGONDA S. The Effect of the Rolling Direction, Temperature, and Etching Time on the Photochemical Machining of Monel 400 Microchannels[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2016, 2016(2): 1—9.
- [4] 马魁, 李哲. Monel400 合金高温力学性能及热脆分析[J]. 中国体视学与图像分析, 2012, 17(4): 383—388.
MA Kui, LI Zhe. Analysis on High Temperature Mechanical Properties and Hot Brittleness of Monel-400 Alloy[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2012, 17(4): 383—388.
- [5] KATSAMAS A I, HAIDEMENOPOULOS G N, ZERBAKI A D, et al. Stress-corrosion Cracking of a Monel 400 Tube[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2004, 4(6): 44—50.
- [6] 杨胜利, 沈健, 李锡武, 等. Al-Cu-Li 合金多道次热变形过程中的力学行为与微观组织演化[J]. 稀有金属材料与工程, 2017(10): 2825—2830.
YANG Sheng-li, SHEN Jian, LI Xi-wu, et al. Mechanical Behavior and Microstructure Evolution of Al-Cu-Li Alloy during Multi-Pass Hot Deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017(10): 2825—2830.
- [7] LIANG X P, LIU Y. Constitutive Relationship for High Temperature Deformation of Power Metallurgy Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.2W Alloy[J]. Materials and Design, 2012, 37: 40—47.
- [8] 刘文义, 黄光杰, 张志清, 等. AA7085 铝合金动态再结晶临界条件研究[J]. 功能材料, 2013, 44(22): 3261—3265.
LIU Wen-yi, HUANG Guang-jie, ZHANG Zhi-qing, et al. A Preliminary Study on the Critical Condition of Dynamic Recrystallization of AA7085 Aluminum Alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(22): 3261—3265.
- [9] 易幼平, 杨积慧, 蔺永诚. 7050 铝合金热压缩变形的流变应力本构方程[J]. 材料工程, 2007(4): 20—22.
YI You-ping, YANH Ji-hui, LIN Yong-cheng. Flow Stress Constitutive Equation of 7050 Aluminum Alloy During Hot Compression[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(4): 20—22.
- [10] 沈耀红, 张志清. 7085 铝合金热压缩变形的流变应力本构方程[J]. 材料导报, 2011, 25(2): 127—130.
SHEN Yao-hong, ZHANG Zhi-qing. Flow Stress Constitutive Equation of 7085 Aluminum Alloy during Hot Compression[J]. Materials Review, 2011, 25(2): 127—130.
- [11] SELLARS C M, MCLEGGART W J. On the Mechanism of Hot Deformation[J]. Acta Metal, 1966, 14(9): 1136.
- [12] SELLARS C M. Modelling Microstructural Development during Hot Rolling[J]. Material Science and Technology, 1996, 6(11): 1072—1081.
- [13] SHI H, MCLAREN A J, SELLARS C M, et al. Constitutive Equations for High Temperature of the Zener-Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels[J]. Material Science and Technology, 1997, 13: 210—216.
- [14] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of Strain Rate upon the Plastic Flow Stress[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22—32.
- [15] 胡传凯, 陈强. 镁合金 Mg-Zn-Y-Zr 的高温变形及本构方程[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(3): 220—223.
HU Chuan-kai, CHEN Qiang. Constitutive Equation of High Temperature Deformed Hot Working Mg-Zn-Y-Zr Magnesium Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(3): 220—223.
- [16] 胡捷, 杜鹃, 李德富. 抗蠕变 Zn-Cu-Cr 合金的热压缩流变应力行为[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(1): 101—106.
HU Jie, DU Peng, LI De-fu. Flow Stress Behavior of Zn-Cu-Cr Alloy during Hot Compression Deformation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(1): 101—106.