

基于热压缩试验的 Cu-0.98Ni-0.24P 合金本构方程及热加工图研究

皇保欢^{1,2} 张彦敏¹ 李吉宝³ 杨耀鹏¹ 黄 宽¹ 单运启¹ 赵世恒¹ 张鸿飞¹ 冯 江¹ 张朝民¹ 宋克兴^{1,2}
(1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.河南省科学院; 3.宁波博威合金材料股份有限公司)

摘 要 利用 Gleeble-1500D 热模拟机研究了 Cu-0.98Ni-0.24P 合金变形量为 50%、温度为 700~850 ℃,应变速率为 0.01~5 s⁻¹ 下的热变形行为,建立了考虑温度补偿的本构方程,并对其进行了修正。结果表明,Cu-0.98Ni-0.24P 合金在 700、750 ℃ 下流变应力无明显峰值应力,以动态回复为主;在 800、850 ℃ 下应变速率为 0.01 s⁻¹ 时流变应力出现峰值应力,发生了完全的动态再结晶。对修正后的本构方程进行模拟计算,发现计算值与实际值吻合。根据热加工图,获取了在试验条件范围内 Cu-0.98Ni-0.24P 合金的最佳热加工参数:温度为 700~780 ℃、应变速率为 0.01~0.1 s⁻¹ 和温度为 800~840 ℃、应变速率为 0.01~5 s⁻¹。

关键词 Cu-Ni-P 合金;热压缩;本构方程;热加工图

中图分类号 TG146.1⁺1 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Constitutive Equation and Hot Working Diagram of Cu-0.98Ni-0.24P Alloy Based on Hot Compression Experiment

Huang Baohuan^{1,2}, Zhang Yanmin¹, Li Jibao³, Yang Yaopeng¹, Huang Kuan¹, Shan Yunqi¹, Zhao Shiheng¹, Zhang Hongfei¹, Feng Jiang¹, Zhang Chaomin¹, Song Kexing^{1,2}
(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology; 2.Henan Academy of Sciences; 3.Ningbo Bowei Alloy Materials Co., Ltd.)

Abstract: The hot deformation behavior of Cu-0.98Ni-0.24P alloy under deformation of 50%, temperature range of 700~850 ℃ and strain rate range of 0.01~5 s⁻¹ was investigated by Gleeble-1500D thermal simulation machine. The constitutive equation considering temperature compensation was established and modified. The results indicate that the flow stress of Cu-0.98Ni-0.24P alloy exhibits absence of peak stress at 700 ℃ and 750 ℃, which is dominated by dynamic recovery. At 800 ℃ and 850 ℃ and strain rate of 0.01 s⁻¹, the peak stress appears and complete dynamic recrystallization occurs. The modified constitutive equation is simulated and calculated, and the calculated is value in consistent with the actual value. According to the hot processing diagram, the optimal parameters of Cu-0.98Ni-0.24P alloy in the test range are obtained as 700~780 ℃, 0.01~0.1 s⁻¹ and 800~840 ℃, 0.01~5 s⁻¹.

Key Words: Cu-Ni-P Alloy, Hot Compression, Constitutive Equation, Hot Processing Diagram

随着电子设备向轻薄化、轻量化方向发展,单位截面积的载流量也随之增加,普通铜合金在使用过程中会导致发热量增加,严重时会造成设备自燃,安全隐患巨大^[1]。现有铜合金体系中,C17410、C17460、Cu-Be 等合金能够满足上述性能要求,但因成本及环保问题而使用受限^[2-3]。Cu-Ni-P 合金具有良好的热稳定性及抗高温应力松弛性能,并且在生产过程中无有毒物质排放,成为替代传统 Cu-Be 合金的热门材料^[4-5]。然而,铸态 Cu-Ni-P 合金组织存在严重的枝晶偏析,通常需要进行长时间均匀化退火处理,但是会导致晶粒粗化使合金塑性变差,后续热轧变形过程中易出现开裂现象。因此,需要研究热变形过程应力应变及失稳规律,制定合理的

收稿日期:2023-07-14;修改稿收到日期:2023-08-31
基金项目:宁波市创新联合体专项基金资助项目(2021H003);国家自然科学基金资助项目(52373313);河南省重大科技专项基金资助项目(221100210300)
第一作者简介:皇保欢,男,1997 年出生,硕士研究生,河南洛阳(471000),E-mail:653682002@qq.com
通信作者:张彦敏,女,1970 年出生,教授,河南洛阳(471000),E-mail: zhangmin70@163.com
引用格式:皇保欢,张彦敏,李吉宝,等. 基于热压缩试验的 Cu-0.98Ni-0.24P 合金本构方程及热加工图研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023, 43(11): 1 518-1 523.
HUANG B H, ZHANG Y M, LI J B, et al. Constitutive equation and hot working diagram of Cu-0.98Ni-0.24P alloy based on hot compression experiment[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 518-1 523.

热加工工艺范围^[6-8]。马艺霖等^[9]以 Cu-Ni-Sn 合金的流变应力-应变曲线为依据,建立了合金的双曲正弦模型,并以 Avrami 方程为基础,构建了其动态再结晶体积分数模型;ZHANG J L 等^[10]对高 Ni、Si 含量的 Cu-Ni-Si 合金进行了热压缩试验,根据 Arrhenius 本构模型建立了热压缩本构方程,其相对误差和相关系数分别为 7.34% 和 0.991,结合功率耗散图和失稳图,得到热加工图;李律达等^[11]研究了 Cu-Ni-Ti 合金热变形行为,利用热加工图,找出其流变失稳区,获得了试验范围内最佳的工艺参数:825~850 °C、0.1~1 s⁻¹;XU W 等^[12]对 Cu-3Ti-0.1Zr 合金的热压缩变形进行了研究,构建了在真应变为 0.8 时合金的热压缩本构方程,计算得知合金的激活能为 319.56 kJ/mol。

目前,关于 Cu-Ni-P 合金的热压缩变形行为的研究还未见报道。因此,本研究对 Cu-0.98Ni-0.24P 合金进行了单轴热压缩试验,在流变应力分析的基础上,建立该合金的本构模型和热加工图,通过对金相组织的分析,研究变形温度和应变速率对变形组织的影响,为该合金热加工工艺的选取提供参考。

1 试验材料和方法

试验材料为铸态 Cu-0.98Ni-0.24P(质量分数,%)合金,均匀化处理后加工成 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的热压缩试样。热压缩试验在 Gleeble-1500D 热模拟机上进行,变形温度分别为 700、750、800 和 850 °C,应变速率分别为 0.01、0.1、1 和 5 s⁻¹,总变形量为 50%。试样变形及测试取样位置见图 1,在进行试验时在试样两侧添加润滑剂从而减少因摩擦引起的不均匀变形等试验误差,提高试验精度。将试样以 10 °C/s 的速度升温至变形温

度,保温 3 min,再进行不同应变速率的压缩试验。卸载后对试样迅速进行水淬,利用线切割沿轴向进行切割,并利用 Zeiss Axio Vert A1 型光学显微镜对剖面中心位置进行金相组织观察。

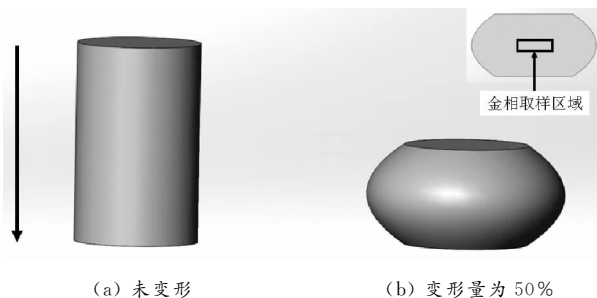


图 1 试样变形及测试位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of deformation and sampling position

2 试验结果与分析

2.1 Cu-Ni-P 合金流变应力曲线

图 2 为不同变形条件下 Cu-0.98Ni-0.24P 合金的真应力-真应变曲线。可以看出,在初始阶段,随着变形量的增加合金的流变应力迅速上升,合金在此阶段出现了加工硬化现象。当变形温度为 700、750 °C 时,合金的应力曲线出现了明显的动态回复特征,当应变量达到一定值后,合金发生动态回复,应力曲线出现拐点,随后曲线平稳上升没有出现明显的峰值应力,见图 2a 和图 2b。在变形温度为 800、850 °C 时,应变速率为 0.01 s⁻¹ 时,合金的流变应力逐渐上升而后达到峰值,合金发生动态再结晶,随着应变量的继续增加应力逐渐减小,此时应力曲线符合动态再结晶特征,见图 2c 和图 2d。再结晶

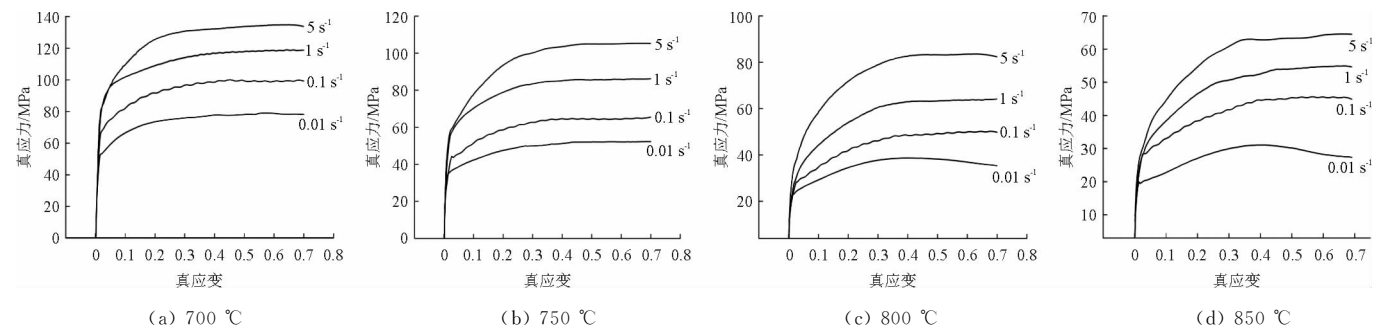


图 2 Cu-0.98Ni-0.24P 合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of Cu-0.98Ni-0.24P alloy under different deformation conditions

的程度越高,软化作用越明显,应力下降得越多。

由图 2 还可看出,变形温度及应变速率对合金的流变应力曲线变化趋势影响显著。在相同的变形温度下,流变应力随着应变速率的增大而升高。以真应变为 0.6 时为例,当变形温度为 750 °C 时,随着应变速率从 0.01

增加到 5 s⁻¹,合金的流变应力从 54.1 增加到 105.1 MPa,增加了 94.3%,这是由于随着应变速率提高,位错的运动受到的阻力逐渐增大,导致动态再结晶和动态回复不能充分进行^[13]。在相同的应变速率下,流变应力随着变形温度的升高而降低。以真应变 0.6

为例,当应变速率为 0.1 s^{-1} 时,随着变形温度从 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高到 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$,流变应力从 98.9 降低到 45.8 MPa ,降低了 53.6% ,这是由于随着温度升高,合金内部能量增加,原子扩散移动作用增强,位错移动作用增强^[14]。

2.2 Cu-Ni-P 合金本构模型

金属材料在进行热变形时,变形温度和应变速率对材料的热变形性能有很大影响^[14]。本构方程能够直接反应热变形参数对流变应力的影响,因此被广泛应用于流变应力分析。通用的表达式为^[15-16]:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中, σ 、 $\dot{\epsilon}$ 、 Q 、 R 和 T 分别为流变应力、应变速率、热变形激活能、气体常数和热力学温度; A 、 n 和 α 为材料常数。

将式(1)取自然对数得:

$$\ln \sinh(\alpha\sigma) = -\frac{1}{n} \ln A + \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} + \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{RT} \quad (2)$$

由式(2)对应变为 0.4 时不同热变形参数条件下的真应力进行线性拟合后,得到 $Q=456\ 310\text{ J/mol}$, $n=7.322\ 2$, $\alpha=0.007\ 1$ 。

研究表明,变形条件对应力-应变本构关系有明显的影响^[17]。在获得 Cu-Ni-P 合金的热形变活化能量 Q

的基础上,引进了温度补偿形变系数 Z ,其与温度、应变率之间的关系为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{RT} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (3)$$

对式(3)两边取自然对数可得:

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (4)$$

线性拟合后得到截距 $\ln A=48.728$ 。

当应变为 0.4 时,计算 Cu-Ni-P 合金的本构模型为:

$$\dot{\epsilon} = e^{48.728} [\sinh(0.007\ 1\ \sigma)]^{7.322\ 1} \times \exp[-453\ 610/(RT)]$$

2.3 本构模型的修正

从图 2 可以看出,不同应变变量下合金流变应力差异较为明显,因此需要考虑应变变量对本构方程参数的影响。求出应变变量在 $0.1\sim 0.6$ 范围内不同应变变量对应的材料常数(Q 、 $\ln A$ 、 α 和 n),绘制成散点图进行多项式拟合,比较 $3\sim 8$ 次多项式拟合结果,经对比后得出,5 次多项式拟合准确度最高,拟合得到的结果见图 3。可以看出, α 与 Q 都随着应变增大而下降; $\ln A$ 随着应变的增大先下降而后缓慢上升达到拐点随之下降, n 值随着

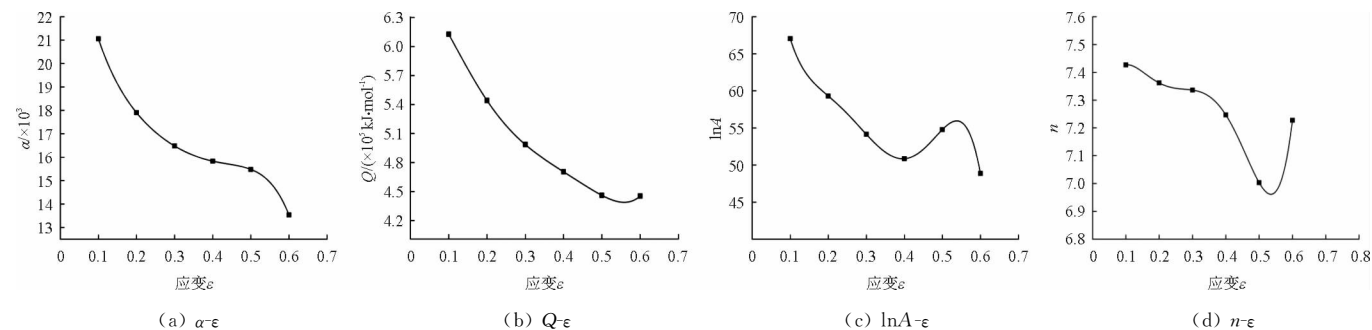


图 3 应变对 Cu-0.98Ni-0.24P 合金参数的影响

Fig.3 Effects of strain on parameters of Cu-0.98Ni-0.24P alloy

应力的增大先缓慢降低而后快速下降随之升高。材料常数与应变的关系为:

$$\alpha = 29.219\ 57 - 127.251\ 16\epsilon + 599.644\ 44\epsilon^2 - 1\ 675.037\ 99\epsilon^3 + 2\ 527.204\ 57\epsilon^4 - 1\ 555.097\ 97\epsilon^5 \quad (5)$$

$$Q = 8.225\ 43 - 31.022\ 03\epsilon + 144.211\ 32\epsilon^2 - 385.955\ 64\epsilon^3 + 514.104\ 99\epsilon^4 - 261.533\ 64\epsilon^5 \quad (6)$$

$$\ln A = 112.454\ 99 - 902.660\ 87\epsilon + 6\ 402.6188\ 8\epsilon^2 - 22\ 747.15\epsilon^3 + 38\ 017.662\ 5\epsilon^4 - 23\ 670.783\ 33\epsilon^5 \quad (7)$$

$$n = 6.943\ 37 + 12.656\ 77\epsilon - 117.572\ 3\epsilon^2 + 474.663\ 96\epsilon^3 - 871.394\ 79\epsilon^4 + 584.125\ 5\epsilon^5 \quad (8)$$

图 4 为通过本构模型计算得出的模拟应力与实际

应力的对比。可以看出,在不同的热变形参数下,模拟应力与实际应力具有较高的符合度,变化趋势一致。采用平均绝对误差相对误差(A_{ARE})和相关系数(R)进一步验证本构模型的准确性,相关的表达式为^[18]:

$$A_{ARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (10)$$

式中, E_i 为试验值; P_i 为计算值; $\bar{E}$ 和 $\bar{P}$ 分别为 E_i 和 P_i 的平均值; N 为计算中涉及的数据总和。

在热变形参数范围内共选取 112 个点,对比计算值

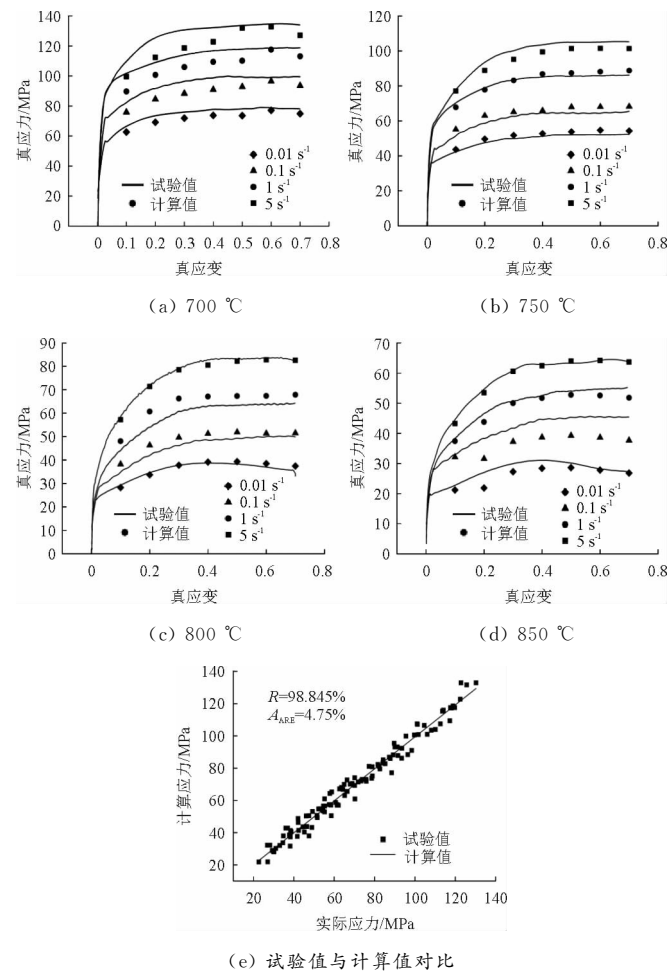


图 4 不同变形条件下 Cu-Ni-P 合金的实际应力与计算应力
Fig.4 Comparison between actual and simulated stress of Cu-Ni-P alloy under different deformation conditions

与实际值,得到 $R = 98.85\%$, $A_{ARE} = 4.75\%$ 。可以看出,修正后的本构模型能够准确地预测 Cu-0.98Ni-0.24P 合金在不同热变形参数下的应力值。

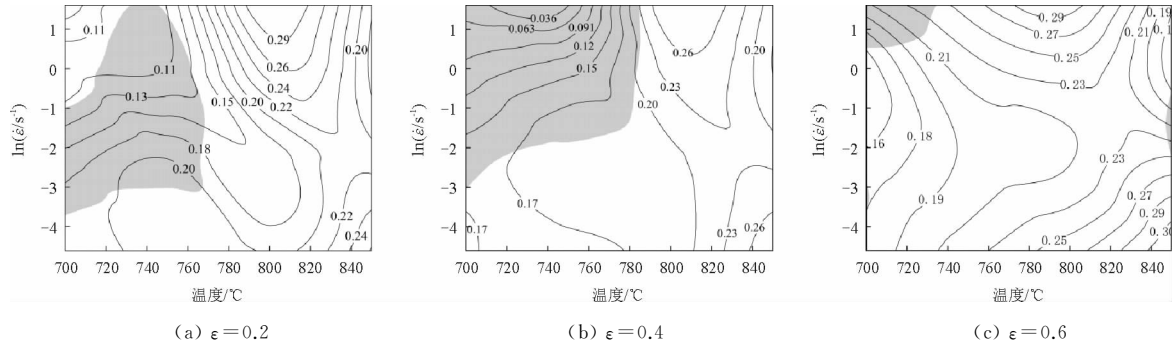


图 5 Cu-0.98Ni-0.24P 合金不同应变量的热加工图
Fig.5 Hot processing diagram of Cu-0.98Ni-0.24P alloy with different variables

域和高温低应变速率区域,失稳区域面积较小,其变形参数分别为 $700 \sim 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1 \sim 5\text{ s}^{-1}$ 和 $840 \sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.1 \sim 1\text{ s}^{-1}$, η 的最小值为 0.21。
Cu-0.98Ni-0.24P 合金在不同变形量下,失稳区的范围有明显的差异。考虑到合金在进行热压缩试验时,

2.4 Cu-Ni-P 合金热加工图

热加工图由功率耗散图和流变失稳图组成,反映合金在不同变形条件下的组织演化机制,以了解材料的热加工性能^[19-20]。铜合金在热加工过程中易发生变形和开裂,为了获得合适的热加工条件,使用动态材料模型(DMM)构建加工图^[21-22]。

根据 DMM 理论,可以得到在不同应变速率和变形温度下对应的功率耗散效率 η , η 值越高,表明此区域的加工性能越好。但还需要结合张兵等^[23]、PRASAD Y V R K 等^[24]提出用无量纲常数 $\xi(\dot{\epsilon})$ 来表示的失稳判断依据进一步分析,表达式为:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (11)$$

式中, m 为应变速率敏感指数。当 $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$ 时,该区域属于不稳定区域,对应合金在热压缩过程中的不稳定组织演化。为了防止材料在热变形过程中发生失稳变形,在确定工艺参数时应该避开失稳区域。

图 5 为 Cu-0.98Ni-0.24P 合金在不同应变变量下所对应热加工图。图中的阴影区域和非阴影区域分别表示失稳区域和加工安全区域,等值线上的数值代表着功耗的效率 η 。可以看出,应变量为 0.2 时, Cu-0.98Ni-0.24P 合金的失稳区处于低温高应变速率区域,其变形温度 $700 \sim 770\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.1\text{ s}^{-1}$, 在此区域内 η 取得最小值 0.11; 应变量为 0.4 时, Cu-0.98Ni-0.24P 合金的失稳区同样处于低温高应变速率区域,变形温度为 $700 \sim 780\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.1\text{ s}^{-1}$, 在此区域内 η 取得最小值 0.036; 应变量为 0.6 时, Cu-0.98Ni-0.24P 合金的失稳区位于低温高应变速率区

试样不同部位的变形量也不尽相同。将不同变形量的失稳图进行叠加,最终获得不同变形量下的加工安全区,见图 6。可以看出,加工安全区的参数范围为:变形温度为 $700 \sim 780\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.1\text{ s}^{-1}$ 和变形温度为 $800 \sim 840\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 5\text{ s}^{-1}$ 。

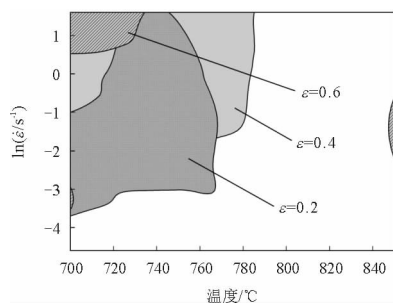


图 6 Cu-0.98Ni-0.24P 合金不同应变量失稳区域叠加图
Fig.6 Superposition diagram of instability regions in Cu-0.98Ni-0.24P alloy with different variables

2.5 Cu-Ni-P 合金热变形行为分析

图 7 是 Cu-Ni-P 合金在变形量为 50%、变形温度为 850 °C,沿压缩轴向切片中心的金相组织。可以看出,合金在变形温度为 850 °C,应变速率分别为 0.01、0.1和 5 s⁻¹变形条件下合金均出现了动态再结晶组织,且有等轴晶粒均匀分布,并且当应变速率提高时,动态再结晶的体积分数会逐渐减小。其原因在于,当金属材料在高应变速率下变形时,溶质原子会在材料内生成密集的位错区,进而引起材料与基体之间发生晶格畸变,引起应力集中,同时动态再结晶和动态回复在较短的时间内不能充分进行,动态再结晶的体积分数不断减小。

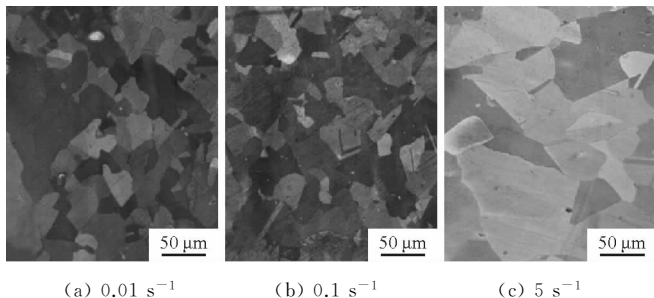


图 7 Cu-0.98Ni-0.24P 合金在 850 °C 不同应变速率下的金相组织
Fig.7 Metallographic structure of Cu-0.98Ni-0.24P alloy at 850 °C and different strain rates

图 8 是变形量为 50%、应变速率为 1 s⁻¹,不同压缩温度下 Cu-0.98Ni-0.24P 合金在沿压缩轴向切片中心的金相组织。由图 8a 可知,750 °C 下,Cu-0.98Ni-0.24P合金金相组织中观察到了裂纹和分布不均匀的孔

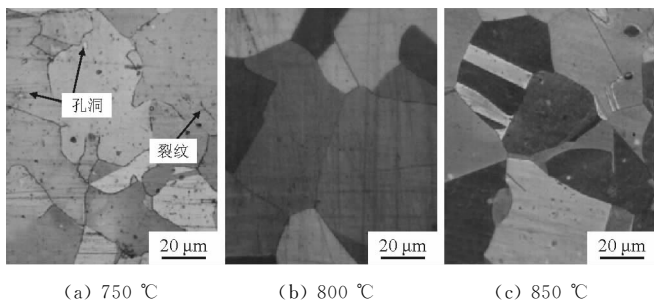


图 8 不同变形温度下 Cu-Ni-P 合金的金相组织($\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$)
Fig.8 Metallographic structure of Cu-Ni-P alloy under different deformation temperatures

洞,在外部压力的影响下,晶粒多为长条状。800、850 °C下,随着变形温度升高,组织中的变形晶粒转化为再结晶晶粒。其原因在于在材料的加工过程中,动态再结晶属于吸热过程,要求在较高的温度下才能进行。当变形温度越高,位错和晶界的运动能力就越强,其驱动力也就越大,促使更多的晶胞发生移动和重新排列,从而推动更多的再结晶发生。

3 结 论

(1)在热变形过程中,Cu-0.98Ni-0.24P 合金的峰值应力随应变速率升高而增大,随变形温度升高而减小。

(2)Cu-0.98Ni-0.24P 合金的材料应力水平参数 α 为 0.007 1,材料加工硬化指数为 7.322 19,热变激活能为 453 610 J/mol,得到了修正后峰值流变应力方程。

(3)热加工图表明,在试验范围内 Cu-0.98Ni-0.24P 合金最佳加工工艺参数范围:变形温度为 700~780 °C,应变速率为 0.01~0.1 s⁻¹和变形温度为 800~840 °C,应变速率为 0.01~5 s⁻¹。

参 考 文 献

- [1] 姜业欣, 姜花芬, 解浩峰, 等. 先进铜合金材料发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 84-92.
- [2] 陈乐平, 周全. 铍铜合金的研究进展及应用[J]. 热加工工艺, 2009, 38(22): 14-18.
- [3] 许斯洋, 李英龙, 蔡志辉, 等. 高强高弹铜合金研究及发展趋势[J]. 材料与冶金学报, 2018, 17(4): 300-305.
- [4] ARUGA Y, SAXEY D W, MARQUIS E A, et al. Effect of P Content on stress relaxation and clustering behavior in Cu-Ni-P alloys[J]. Materials Transactions, 2010, 51(10): 1 802-1 808.
- [5] MURAYAMA M, BELYAKOV A, KARA T. Development of a high-strength high-conductivity Cu-Ni-P alloy.Part I: Characterization of precipitation products[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(10): 1 787-1 792.
- [6] 郁天其, 闫宏, 陈荣石. EV31 镁合金热压缩变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(4): 59-68.
- [7] 侯深圳, 蔡玉俊, 董晓传, 等. 2219 铝合金热压缩流变应力及本构方程[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(12): 135-141.
- [8] 孙越, 孙勇, 杨勇, 等. TC21 钛合金热压缩本构方程及热加工图[J]. 锻压技术, 2023, 48(4): 242-248.
- [9] 马艺霖, 樊文欣, 贾岩峰, 等. Cu-Ni-Sn 合金高温本构模型及动态再结晶行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(3): 376-379.
- [10] ZHANG J L, LU Z L, JIA L, et al. Hot deformation behavior of Cu-Ni-Si alloy at elevated temperature[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8):086 590.
- [11] 李律达, 洪鑫, 满绪存, 等. Cu-Ni-Ti 合金的高温热变形行为及热加工图[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(1): 44-51.
- [12] XU W, ZHOU L, ZHU X, et al. Microstructure evolution and hot deformation behavior of Cu-3Ti-0.1Zr alloy with ultra-high strength[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(10):2 737-2 748.
- [13] 张志阳, 周孟, 张毅, 等. Cu-Ti-Ni-Mg 合金的热变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(7): 149-156.
- [14] 黄宽, 张彦敏, 周延军, 等. Cu-15Ni-8Sn 合金热变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(12): 145-153.

Cr、Ag 和稀土元素对铜合金性能的影响

党 乐¹ 张俊双¹ 佟 敏¹ 刘 源^{2,3} 邵星海²

(1.国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院; 2.清华大学材料学院; 3.河北清华发展研究院)

摘 要 以 Cr、Ag 和稀土元素(Y 和 Ce)为合金元素制备高导高强耐蚀型铜合金,并进行性能测试,研究了合金元素对铜合金导电性能、力学性能和耐蚀性能的影响。结果表明,在铜及铜合金中添加 0.12% 的 Ag 能够提高铜合金的导电性能,继续添加 0.5% 的 Cr 能够通过 Cr 元素的析出强化铜合金,将抗拉强度提高 20%,耐蚀性能提高 50% 左右;继续添加微量稀土元素能细化晶粒,从而进一步提高铜合金的导电性能、力学性能和耐蚀性能,且 Y 的效果略优于 Ce。

关键词 高导电;高强度;耐腐蚀;铜合金;触头

中图分类号 TG146.1⁺1;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cr, Ag and RE Elements on Properties of Copper Alloys

Dang Le¹, Zhang Junshuang¹, Tong Min¹, Liu Yuan^{2,3}, Shao Xinghai²

(1.Electric Power Research Institute, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd.; 2.School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University; 3.Institute of Tsinghua University, Hebei)

Abstract: The preparation and performance testing of high-conductivity, high-strength, corrosion-resistant copper alloys were carried out, and effects of alloying elements on electrical conductivity, mechanical properties and corrosion resistance of copper alloys were investigated. The results indicate that addition of 0.12% Ag can improve the conductivity of copper alloys. The tensile strength and corrosion resistance of copper alloys can be improved by 20% and 50%, respectively, after addition of 0.5% Cr due to the precipitation strengthening of Cr. Further addition of trace RE elements can refine the grain, thereby further improving the electrical conductivity, mechanical properties and corrosion resistance of copper alloy, where the effect of Y is slightly superior to Ce.

Key Words: High Conductivity, High Strength, Corrosion Resistance, Copper Alloy, Contact

隔离开关触头部件目前主要采用 T2 紫铜,其导电性能优异,但耐蚀性能差,强度、硬度和抗应力松弛等方面性能不能满足要求^[1]。纯 Cu 触头易锈蚀和变形,无法保证动、静触头间持久的夹紧力和有效接触,导致动、静触头间接触电阻增大而发热。通高压电流时,触头发

热会进一步加速接触部位的氧化、侵蚀和变形,需频繁维护,增加了维护成本,不利于电网的稳定运行^[2-3]。通过改变 Cu 及铜合金的成分,在保证较高导电性的同时提高其力学性能和耐蚀性能,开发研究高强高导和耐蚀型铜合金^[4-6],能显著改善触头发热问题,减少隔离开关

收稿日期:2022-11-11;修改稿收到日期:2023-01-12

第一作者简介:党乐,男,1987 年出生,工程师,呼和浩特(010020),E-mail:738130071@qq.com

引用格式:党乐,张俊双,佟敏,等. Cr、Ag 和稀土元素对铜合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 523-1 526.

DANG L, ZHANG J S, TONG M, et al. Effects of Cr, Ag and RE elements on properties of copper alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 523-1 526.

[15] 申易春相,孙宝森,吕佩阳,等. 上引连铸 Cu-4.5Fe 合金杆热塑性变形行为及本构方程修正[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(2): 152-159.

[16] 邢清源,何维维,王海龙,等. Al-8.8Zn-1.4Mg-0.5Cu-0.1Sc-0.1Er-0.1Zr合金的热变形行为及热加工图[J]. 机械工程材料, 2022, 46(3): 75-82.

[17] 高明,赵熹,刘杰,等. 新型高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 合金热变形本构方程及热加工图研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(3): 126-136.

[18] 罗登,胡斌,王振,等.近 β 钛合金 Ti-55511 热塑性变形的流变应力分析与 Arrhenius 本构方程研究[J].粉末冶金材料科学与工程, 2023, 28(3): 212-222.

[19] YANG J, WANG G, JIAO X, et al. High-temperature deformation behavior of the extruded Ti-22Al-25Nb alloy fabricated by powder metallurgy [J]. Materials Characterization, 2018, 137: 170-179.

[20] 丁宗业,贾淑果,宁向梅,等. Cu-Cr-Zr 合金的高温热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(8): 1 811-1 817.

[21] 花思明,张平则,刘子利,等. Cu-0.58Sn 合金热变形行为和热加工图[J]. 有色金属工程, 2021, 11(10): 40-47.

[22] 夏洪均,唐全波,王敬,等.7050 铝合金修正本构模型及 Zener-Hollomon 参数演化[J].塑性工程学报, 2022, 29(6): 149-156.

[23] 张兵,刘鹏茹,张志娟,等. W80-Cu20 复合材料热变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(1): 203-210.

[24] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T. Modelling of hot deformation for microstructural control[J]. Metallurgical Reviews, 1998, 43(6): 243-258.

(编辑:刘晨辉)