

文章编号:1674-2974(2016)06-0010-06

挤压态 CuCr25 合金热变形行为及其加工图^{*}

陈刚¹, 段为樑^{1†}, 吴旭升²

(1. 湖南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 浙江泰堡金属制品有限公司, 浙江乐清 325616)

摘要:在 Gleeble-3500D 热模拟试验机上, 对挤压态 CuCr25 合金在应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, 变形温度为 $750 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下进行恒温压缩模拟实验. 结果表明: 挤压态 CuCr25 合金在热变形过程中流变应力随变形温度升高和应变速率降低而减小; 可用双曲正弦模型来描述合金的流变行为, 其平均激活能为 383.4 kJ/mol ; 基于动态材料模型获得了挤压态 CuCr25 合金的热加工图, 并结合金相显微组织分析得到了该合金在实验参数范围内较优的热加工工艺参数范围: 加工温度 $830 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$.

关键词:挤压态 CuCr25 合金; 热压缩变形; 变形激活能; 加工图

中图分类号: TG301

文献标识码: A

Hot Deformation Behavior and Processing Maps of the Extruded CuCr25 Alloy

CHEN Gang¹, DUAN Wei-liang^{1†}, WU Xu-sheng²

(1. College of Materials Science and Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082 China;

2. Zhejiang Taibao Metal Products Co Ltd, Yueqing, Zhejiang 325616, China)

Abstract: Isothermal compression tests of extruded CuCr25 alloy were carried out at the temperature range of $750 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ and at the strain rate range of $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ on Gleeble-3500D system. The experiment results showed that the flow stress decreased with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate, which could be described by hyperbolic-sine equation with the average hot deformation activation energy Q of 383.4 kJ/mol . The processing maps were calculated on the basis of the dynamic materials model. The optimum processing parameters were proved to be the deformation temperature range of $830 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ and the strain rate range of $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ was obtained by processing maps and deformed microstructural observation.

Key words: extruded CuCr25 alloy; hot compression deformation; hot deformation activation energy; processing maps

CuCr 合金具有强度和硬度高、导热性和导电性好以及抗腐蚀性强等优点而广泛应用于制备电阻电

极、触头材料、集成电路引框架、电车及电力火车架空导线、电动工具的转向器、大型高速涡轮发电机转

* 收稿日期: 2015-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51571089), National Natural Science Foundation of China(51571089)

作者简介: 陈刚(1965-), 男, 湖南长沙人, 湖南大学教授

† 通讯联系人, E-mail: dna20061422@126.com

子导线、电工开关以及电动机集电环等要求高导电率高强度的产品,尤其是在大功率高中压真空开关中 CuCr 合金显示出其广阔的应用前景^[1-3]。目前,关于铜铬材料的研究,主要集中在制备工艺方面,而关于铜铬合金材料高温热变形的研究,鲜有报道。

热加工是合金材料制备的关键工序,在热变形加工中,材料由于热力作用其组织性能发生复杂的冶金学变化,宏观上的热流变应力是表征合金在热变形过程中材料塑性变形性能的一个最基本量,研究热变形过程中的热流变应力对金属塑性变形理论的研究以及制定合理的热加工工艺具有重要的作用。热加工图是基于动态材料模型(DMM)的能量图和失稳图的叠加,在合金热加工过程的优化以及新材料加工参数的设置中得到广泛应用^[4-7]。目前,对铜合金的热变形行为和加工图已有较多的研究报道,张辉等^[8]对 KFC 铜合金热压缩变形流变应力进行了分析;张良等^[9]对 Cu-8.0Ni-1.8-Si-0.15Mg 合金热变形行为进行了研究;刘勇等^[10]对钨含量不同的 W-Cu 复合材料高温变形行为进行了研究;肖艳红^[11]等对 H62 黄铜流变行为建立了本构模型;Gronostajsk^[12]根据铝青铜的热压缩应力应变曲线作出热加工图并对其热变形行为进行了分析。本文在 Gleeble-3500D 热模拟实验机上,对挤压态 Cu-Cr25 合金在不同温度、不同变形速度下进行圆柱体高温单道次轴对称压缩试验,得到该合金的真应力-真应变曲线,通过对合金热压缩变形流变应力、应变速率以及变形温度之间的关系的研究,计算出该合金的热变形激活能,建立挤压态 CuCr25 合金高温流变应力本构方程及热加工图,为该合金后续轧制热加工工艺的制定和优化提供实验数据和理论依据。

1 实验

实验用原材料为直径为 43 mm 的 CuCr25 合金热挤压棒材,将原始棒材加工成尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的压缩试样,热压缩试验在 Gleeble-3500 热模拟机上进行。压缩过程中,在圆柱体试样两端的槽内填充 75% 石墨 + 20% 机油 + 5% 硝酸三甲苯脂,以减小变形过程中摩擦力对流变应力的影响。变形温度范围为 750~900 °C,应变速率为 0.01~10 s⁻¹,总压缩真应变为 0.6,热模拟实验的升温速度为 10 °C/s,保温时间为 5 min。压缩完成后立即水冷到室温,以保留变形后的组织。采用线切割方法将变

形试样沿轴向中心剖开,利用 NEOPHOT32 金相显微镜观察热压缩后的显微组织。

2 结果与分析

2.1 流变应力行为

图 1 所示为挤压态 CuCr25 合金在变形温度为 750~900 °C,应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 热压缩条件下流变应力曲线。由图 1 可以看出,所有的应力-应变曲线上都出现了一个明显的应力峰值。在变形的初始阶段,加工硬化作用占主导地位,材料的流变应力迅速增加,随着变形量的增加,材料将发生动态再结晶,当加工硬化作用和软化作用达到平衡时,应力-应变曲线出现一个应力峰值,随后再结晶软化作用占据主导地位,材料的应力逐渐降低,最后达到一稳定值不变。

从图 1 还可以看出,在相同的变形温度下,流变应力随着应变速率的增加而升高,这是因为当应变速率增加时,实现塑性变形的时间缩短而使得动态软化效果相对减弱,加工硬化过程加剧,临界切应力升高,从而导致流变应力增加。在相同的应变速率下,真应力水平随温度的升高明显下降,这是因为随着温度升高,原子间的动能增强,临界切应力降低,以及软化效果随温度升高而增强,从而导致合金的流变应力降低。

金属材料的高温塑性变形过程和高温蠕变过程相似,都存在热激活过程,流变应力取决于变形温度和应变速率,通常可以用 Arrhenius 方程来描述^[13],其表达式如下:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

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

式中: $A_1, A_2, A, \alpha, n_1, \beta$ 均为与材料有关的常数,主要取决于材料的化学组成;式(3)中的 α 为式(2)中 β 与式(1)中 n_1 的比值; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; T 为绝对温度; R 为气体常数; Q 为热变形激活能。求出 A, α, n, Q 即可描述材料的高温流变特性。

Sellars 等提出并实验验证了热变形条件,通常可以用温度补偿的应变速率因子 Zener-Hollomon 参数 Z 来表示^[13-14]:

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

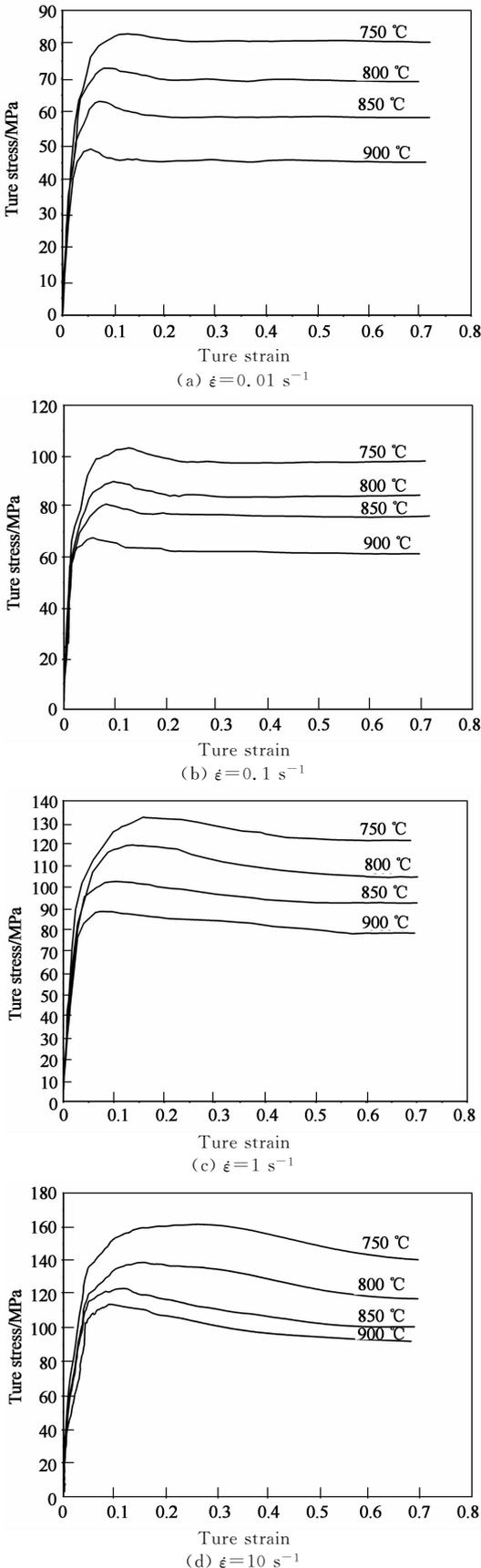


图1 挤压态CuCr25合金热压缩变形真应力-真应变曲线
Fig.1 True stress-strain curves of the extruded CuCr25 alloy at different temperatures and strain rates

对式(1),式(2)和式(4)两边取对数,可分别得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma \quad (6)$$

$$\ln Z = \ln A + n [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (7)$$

由式(5),(6)可知直线 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$, $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 的斜率分别为 n_1 和 β ,采用最小二乘法线性回归 n_1 取图 2(a)中峰值应力较低的3条直线斜率的平均值; β 取图 2(b)中峰值应力较高的3条直线斜率的平均值.计算得 $\alpha = \beta/n_1 = 0.01037$.

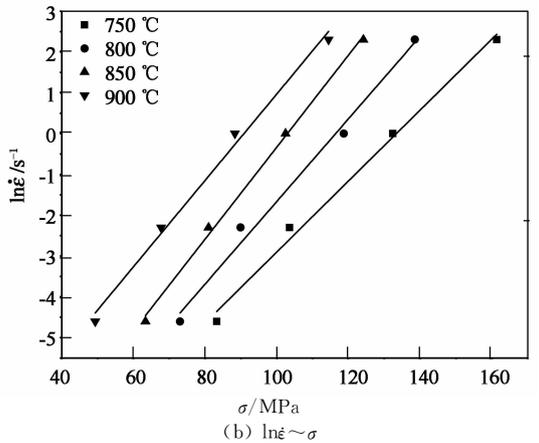
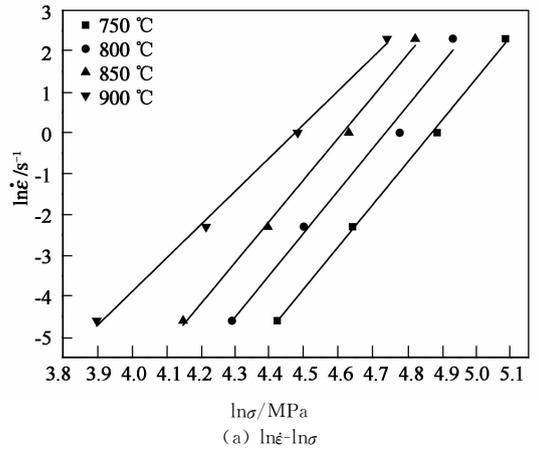


图2 流变应力与应变速率的关系
Fig.2 The relation between strain rate and flow stress

$$Q = R \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right]_T \left[\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_T \quad (8)$$

取峰值应力和对应的温度绘制相应的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]^{-1} / T$ 图,如图 3 和 4 所示,直线 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]^{-1} / T$ 的斜率分别为 n 和 B' ,采用最小二乘法线性回归,可求得 $n = 7.35322, B' = 6.271405$,则 $Q = RnB' = 383.4 \text{ kJ/mol}$.由 $\dot{\epsilon}$ 与 T ,可求出对应的 $\ln Z$ 值,绘出 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 图,如图 5 所示,斜率 $\ln A = 39.58$,则 $A = 1.54659 \times 10^{17}$,将以上所求得的参数值

代入式(3),即可得到挤压态 CuCr25 合金高温热变形流变应力方程.

$$\dot{\epsilon} = 1.54659 \times 10^{17} [\sinh(0.01037\sigma)]^{7.35322} \times \exp\left(-\frac{383\,400}{8.314T}\right) \quad (9)$$

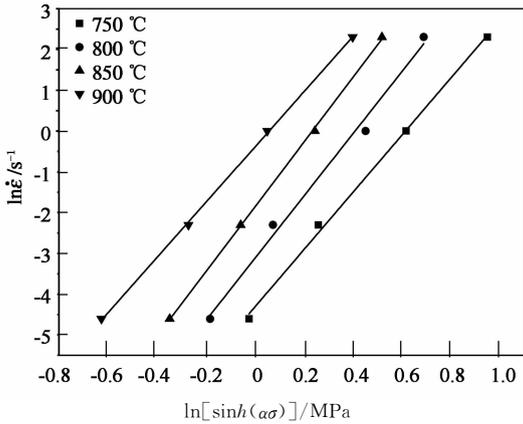


图 3 不同变形温度下 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系
Fig. 3 Relationship between $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ at different temperatures

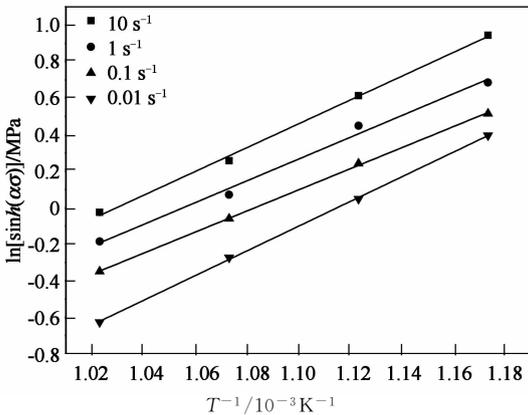


图 4 不同应变速率下的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]^{-1}/T$ 关系
Fig. 4 Relationship between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]^{-1}/T$ at different temperatures

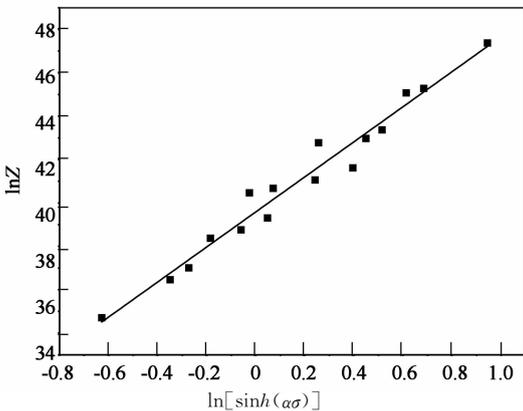


图 5 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 之间的关系
Fig. 5 Relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

2.2 DMM 加工图

DMM 加工图是基于大塑性变形的连续力学、物理系统模拟和不可逆热力学等基本原理解建立的,通过测定不同变形条件下材料塑性变形参数,计算出材料在塑性变形时的功率耗散特性,可以准确地描述材料在高温变形时的组织演变同塑性变形参数之间的关^[15].在给定变形温度 T 、应变 ϵ 的条件下,应变速率敏感指数 m 可以由耗散量函数 G 和耗散协量函数 J 的变化率来表示^[16]:

$$m = \left[\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right]_{\epsilon T} \quad (10)$$

无量纲的功率耗散效率因子 η 可以由应变速率敏感指数 m 描述:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (11)$$

η 描述了材料热变形过程中因显微组织改变而消耗的能量与总能量的比值, η 随温度和应变速率的变化就构成了功率耗散图.

在功率耗散图中,并不是功率耗散效率越大、材料的内在可加工性能就越好,因为在加工失稳区功率耗散效率也可能会较高,所以有必要先判断出合金的加工失稳区.在动态材料模型中,加工失稳的判断是由 Prasad^[17]建立的,他将不可逆热力学的极大值原理应用于大应变塑性流变中,进而推导出保持塑性流变稳定的条件式为^[18]:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln [m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (12)$$

将功率耗散图和失稳图叠加在一起,就构成了不同真应变 ϵ 对应的 DMM 加工图,如图 6 所示.图 6 是挤压态 CuCr25 合金在应变量为 0.4 和 0.6 时的加工图,其中阴影区为流动失稳区,等值线上的数字表示功率耗散因子.从图 6 中可以看出,应变量为 0.4 和 0.6 时的失稳区变化不大,且都在高温高应变速率时发生失稳;功率耗散因子变化规律相似,且随着应变量的增大,功率耗散因子变化幅度不大,因此本文以应变量为 0.6 时的加工图分析.

由图 6(b)可以看出,在应变速率为 0.4~10 s^{-1} 时,功率耗散因子随着应变速率的减小而增大;在应变速率为 0.01~0.1 s^{-1} ,变形温度为 830~900 $^{\circ}C$ 时,功率耗散因子随着温度的升高,应变速率的减小而增大,且在变形温度 900 $^{\circ}C$,应变速率 0.01 s^{-1} 时,出现功率耗散效率峰值为 24%,大的功率耗散效率意味着出现特殊的显微组织转变或导致流变失稳;在变形温度为 830~900 $^{\circ}C$,应变速率大于 1 s^{-1} 时材料会发生流变失稳,在热加工时,应该避免

此区域.

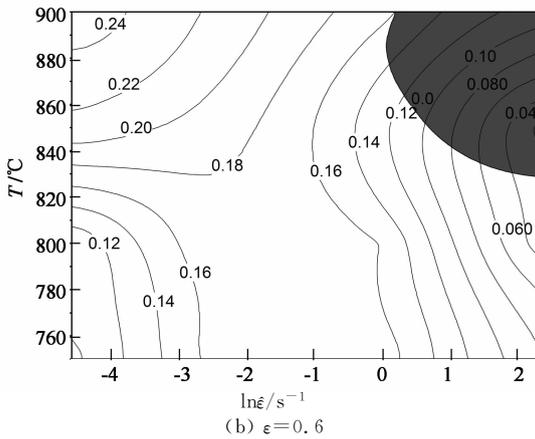
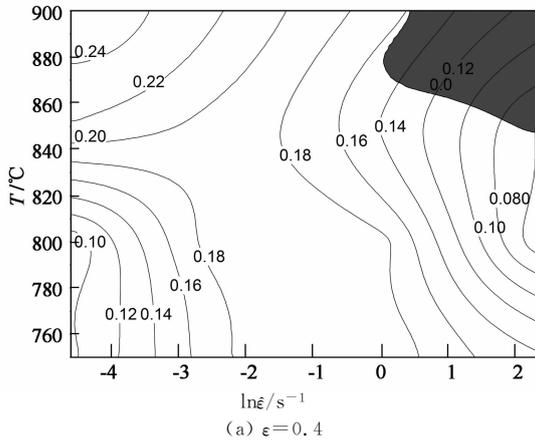


图 6 挤压态 CuCr25 合金
在不同真应变时的 DMM 加工图
Fig. 6 DMM maps of the extruded
CuCr25 alloy at various true strains

在分析加工图时,往往要结合显微组织来进行佐证,图 7 所示为挤压态 CuCr25 合金在不同变形温度、应变速率时的显微组织,结合图 6(b),图 7 可以看出,在热加工流变失稳区即高温高应变区(温度为 830~900 °C,应变速率大于 1 s⁻¹时),显微组织呈流线带状且有剪切带组织如 7(d)所示,这是由于在应变速率较高时,铜基体和 Cr 相变形程度不协调界面处产生应力集中所引起的;在热加工安全区内,挤压态 CuCr25 合金在热压缩过程中铜基体发生了明显的动态再结晶,如图 7(a),(b),(c)所示.在温度较低、应变速率较低时,铜基体有细小的再结晶晶粒的形成,此过程发生了部分动态再结晶,如图 7(a)所示;当温度升高,铜基体细小的再结晶晶粒增多,动态再结晶更明显,图 7(b)所示;当温度达到 900 °C、应变速率为 0.01 s⁻¹时,铜基体已完全是等轴的再结晶晶粒,此条件下发生了完全再结晶如图 7(c)所示,此图也佐证了图 6(b)中在变形温度 830~900 °C,应变速率 0.01~0.1 s⁻¹时,大的功率耗散因子意味着发生了特殊的显微组织转变,即发生

了完全动态再结晶,得到等轴的再结晶组织,这个区域的组织易于控制,其对应的变形温度、应变速率为最佳工艺参数,即变形温度为 830~900 °C,应变速率 0.01~0.1 s⁻¹.

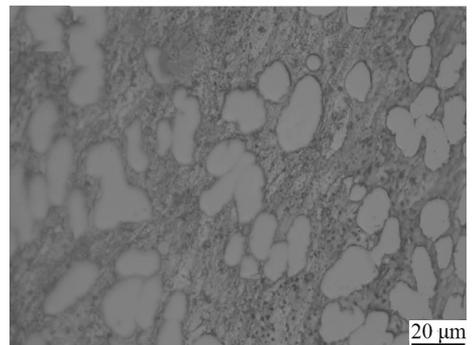
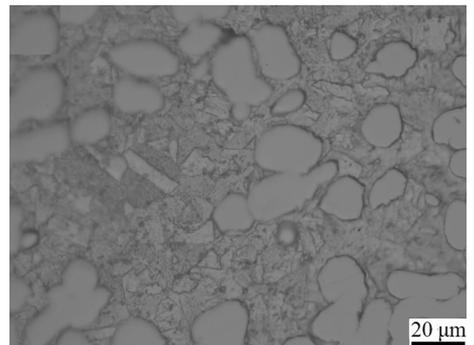
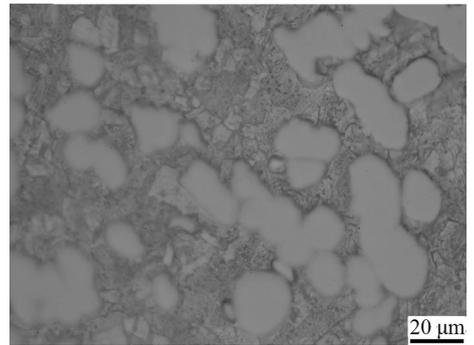
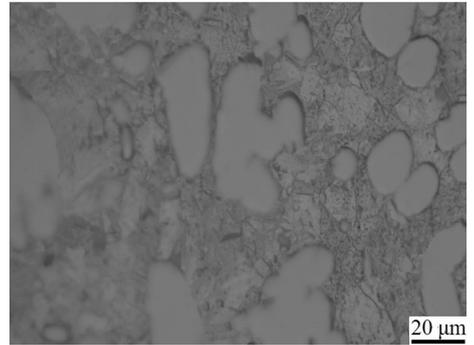


图 7 不同变形温度及应变速率时
挤压态 CuCr25 合金的显微组织

Fig. 7 Microstructures of the extruded CuCr25 alloy
at various deformation temperatures and strain rates

3 结 论

1) 挤压态 CuCr25 合金在变形温度为 750~900 °C, 应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 时, 发生明显的动态再结晶; 在相同的变形温度下, 流变应力随着变形速率的增加而升高, 在相同的应变速率下, 真应力水平随温度的升高明显下降。

2) 挤压态 CuCr25 合金流变应力行为满足双曲正弦模型, 合金的平均激活能 Q 为 383.4 kJ/mol, 流变应力方程为

$$\dot{\epsilon} = 1.54659 \times 10^{17} [\sinh(0.01037\sigma)]^{7.35322} \times \exp\left(-\frac{383400}{8.314T}\right)$$

3) 挤压态 CuCr25 合金在变形温度为 830~900 °C, 应变速率大于 1 s⁻¹ 时材料会发生流变失稳, 在指定热加工参数时应避免; 该合金的最佳热变形工艺参数: 变形温度为 830~900 °C, 应变速率 0.01~0.1 s⁻¹。

参 考 文 献

- [1] 洗爱平, 朱耀宵. Cu-Cr 触头合金制备技术的发展[J]. 金属学报, 2003, 9(3): 225-233.
XIAN Ai-ping, ZHU Yao-xiao. The development of manufacture processing for Cu-Cr contact alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 9(3): 225-233. (In Chinese)
- [2] WANG Xin-jian, DONG Xian-ping, WU Jian-sheng. Effects of Cr dopant on the microstructure and electromigration performance of Cu interconnects [J]. Applied Surface Science, 2009, 225(30): 9273-9278.
- [3] 李晓燕, 王顺兴, 田保红. Cu-Cr 触头材料的制备方法及进展[J]. 有色金属加工, 2007, 36(4): 10-15.
LI Xiao-yan, WANG Shun-xing, TIAN Bao-hong. Present status and development of Cu-Cr contact materials[J]. Nonferrous Metals Processing, 2007, 36(4): 10-15. (In Chinese)
- [4] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T. Processing maps for hot working of titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243(1/2): 82-88.
- [5] WANG C Y, WANG X J, CHANG H, *et al.* Processing map for hot working of ZK60 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 464(1/2): 52-58.
- [6] 张辉, 伍豪杰, 蒋福林. 4045 铝合金热变形行为及其加工图[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(8): 83-89.
ZHANG Hui, WU Hao-jie, JIANG Fu-lin. Hot deformation behavior and processing map of 4045 aluminum alloy[J]. Jour-

nal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(8): 83-89. (In Chinese)

- [7] ZHANG Yi, LIU Ping, TIAN Bao-hong, *et al.* Hot deformation behavior and processing map of Cu-Ni-Si-P alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013, 23: 2341-2347.
- [8] ZHANG Hui, ZHANG Hong-gang, PENG Da-shu. Hot deformation behavior of KFC copper alloy during compression at elevated temperatures [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16: 562-566.
- [9] ZHANG L, LI Z, LEI Q, *et al.* Hot deformation behavior of Cu-8.0Ni-1.8Si-0.15Mg alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 1641-1647.
- [10] 刘勇, 孙永伟, 田保红, 等. 钨含量对 W-Cu 复合材料高温变形行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2553-2558.
LIU Yong, SUN Yong-wei, TIAN Bao-hong, *et al.* Effect of W content on hot deformation behavior of W-Cu composite at elevated temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2553-2558. (In Chinese)
- [11] XIAO Yan-hong, GUO Cheng, GUO Xiao-yan. Constitutive modeling of hot deformation behavior of H62 brass [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 6510-6518.
- [12] GRONOSTAJSK Z. The deformation processing map for control of microstructure in CuAl9.2Fe3 aluminium bronze [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125/126: 119-124.
- [13] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14: 1136-1138.
- [14] ZENER C, HOLLomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-32.
- [15] 鞠泉, 李殿国, 刘国权. 15Cr-25Ni-Fe 基合金高温塑性变形行为的加工图 [J]. 金属学报, 2006, 42(2): 218-224.
JU Quan, LI Dian-guo, LIU Guo-quan. The processing map of hot plastic deformation of a 15cr-25ni-fe base superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(2): 218-224. (In Chinese)
- [16] NARAYANA M S, NAGESWARA R B. On the development of instability criteria during hot working with reference to IN718 [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 254(1/2): 76-82.
- [17] PRASAD Y V, NIAN R K. Recent advances in the science of mechanical processing [J]. Indian J Tech, 1990, 28: 435-451.
- [18] 曾卫东, 周义刚, 周军, 等. 加工图理论研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673-677.
ZENG Wei-dong, ZHOU Yi-gang, ZHOU Jun, *et al.* Recent development of processing map theory [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(5): 673-677. (In Chinese)