

30%Cr-Cu 复合材料热变形及动态再结晶 临界条件

耿昊¹, 朱顺新², 刘勇^{*2,3}

(1. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 郑州 450015; 2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471023;
3. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 洛阳 471023)

摘要: 采用放电等离子烧结法 (SPS) 制备出 30%Cr-Cu 复合材料, 对其致密度、硬度和导电率等相关性能进行测试, 并观察分析该复合材料的显微组织。利用 Gleeble-1500D 型热模拟试验机在变形温度 650~950℃、应变速率 0.001~10 s⁻¹、变形量 60% 的条件下对 30%Cr-Cu 复合材料进行热模拟压缩试验。对热压缩试验得到的真应力-应变数据进行拟合、计算和分析, 构建该复合材料的本构方程, 同时得到材料的加工硬化率 θ , 利用材料的 $\ln\theta$ - ϵ 曲线出现有拐点和 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 曲线对应有最小值这一判据, 分析该复合材料的动态再结晶临界条件。结果表明: 30%Cr-Cu 复合材料的真应力-应变曲线主要以动态再结晶软化机制为特征, 峰值应力随应变速率的增加和温度的降低而升高; 该复合材料的 $\ln\theta$ - ϵ 曲线出现拐点, $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 曲线对应有最小值, 该最小值所对应的应变为临界应变 ϵ_c , 且 ϵ_c 随变形温度的升高和应变速率降低而减小, ϵ_c 与 Zener-Hollomon 参数 Z 的函数关系为 $\epsilon_c = 2.38 \times 10^{-3} Z^{0.1696}$ 。

关键词: 30%Cr-Cu 复合材料; 本构方程; 加工硬化率; 动态再结晶; 临界条件

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)06-1308-08

Hot deformation and critical conditions of dynamic recrystallization of the 30%Cr-Cu composites

GENG Hao¹, ZHU Shunxin², LIU Yong^{*2,3}

(1. The 713th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China;
2. School of Materials Science and Engineering, He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
3. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals, He'nan Province, Luoyang 471023, China)

Abstract: 30%Cr-Cu composites were prepared by spark plasma sintering process (SPS). The basic properties of the composite such as relative density, Brinell hardness and electrical conductivity were tested and the microstructures of the composites were observed. Hot simulation compression tests of the 30%Cr-Cu composites were conducted at deformation temperature of 650–950℃, strain rate of 0.001–10 s⁻¹ and deformation amount of 60% by the Gleeble-1500D thermal-mechanical simulation test machine. The true stress-true strain data of the 30%Cr-Cu composites were fitted, calculated and analyzed, constitutive equation of the composites was constructed, and the work hardening rate θ of the 30%Cr-Cu composite was obtained at the same time. The critical conditions of dynamic recrystallization during hot deformation of the 30%Cr-Cu composites were analyzed by computing the inflection point criterion of $\ln\theta$ - ϵ curves and the minimum value criterion of $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ curves. The results show that the true stress-strain curves of the 30%Cr-Cu composites are mainly characterized by dynamic recrystallization softening mechanism. The peak stress increases with the increasing strain rate and the decreasing deformation temperature. The inflection point presents in the $\ln\theta$ - ϵ curve and a minimum value appears in the corresponding $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$.

收稿日期: 2016-08-22; 录用日期: 2016-10-20; 网络出版时间: 2016-11-04 15:10

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20161104.1510.002.html

基金项目: 国家自然科学基金 (51101052); 河南省高校重点科研项目 (15A430006)

通讯作者: 刘勇, 博士、教授, 博士生导师, 研究方向为功能铜合金领域 E-mail: liuyong@haust.edu.cn

引用格式: 耿昊, 朱顺新, 刘勇. 30%Cr/Cu 复合材料热变形及动态再结晶临界条件[J]. 复合材料学报, 2017, 34(6): 1308-1315.

GENG H, ZHU S X, LIU Y. Hot deformation and critical conditions of dynamic recrystallization of the 30%Cr-Cu composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(6): 1308-1315 (in Chinese).

curve when the critical state of the 30%Cr-Cu composites is attained, in which the strain that relates to the minimum value is the critical strain ϵ_c . The critical strain ϵ_c decreases with the increasing deformation temperature and the decreasing strain rate. The model of the critical strain with ϵ_c and Zener-Hollomon parameter can be described by the function of $\epsilon_c = 2.38 \times 10^{-3} Z^{0.1396}$.

Keywords: 30%Cr-Cu composites; constitutive equation; work hardening rate; dynamic recrystallization; critical condition

Cr-Cu 复合材料充分综合了 Cr 和 Cu 的优点, 即 Cr 的高熔点、高硬度、良好的抗熔焊和耐压性能、以及 Cu 良好的塑性、可靠的导电、导热性。Cr-Cu 复合材料优良的截流水平和耐电压能力, 使其广泛应用于中高压真空开关中^[1-4]。

材料在热加工过程中, 一方面材料内部会随变形量的增加出现大量位错塞积和增殖, 表现出加工硬化现象; 另一方面, 材料变形时也会发生动态回复和动态再结晶, 从而会抵消部分加工硬化, 使材料软化^[5-6]。当材料达到临界应变时, 会发生动态再结晶。动态再结晶是材料热加工变形中非常重要的微观组织变化过程, 精确找到材料发生动态再结晶的临界应变是建立临界应变预测模型的关键。通过相关研究发现, 动态再结晶在应变未达到峰值应变(ϵ_p)时已经发生^[7-8]。Poliak 和 Jonas 等^[9-10]提出基于热力学不可逆原理的动力学临界条件, 认为临界条件与加工硬化率曲线($\theta = d\sigma/d\epsilon$)出现拐点和 $-\partial\theta/\partial\sigma$ 曲线上的最小值相对应。杨志强等^[11]结合 $\ln\theta$ - ϵ 曲线的拐点对应 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 曲线最小值的判据, 分析了 TiC/Cu-Al₂O₃ 复合材料动态再结晶临界条件; 张鹏等^[12]通过研究 θ - σ 和 $-\partial\theta/\partial\sigma$ 曲线, 建立了 15%SiCp/Al 复合材料的临界应变模型和稳态流变模型。采用加工硬化率法研究动态再结晶的临界条件均表现出较高的适应性和精确度。

近年有关 Cr-Cu 复合材料的研究多集中在复合材料的制备和组织性能等方面, 但关于其热变形行为、动态再结晶临界应变模型的报道不多。本文通过对 Cr-Cu 复合材料进行热压缩变形, 研究流变应力、变形温度和应变速率之间的关系, 计算材料热变形激活能并构建本构方程, 采用 $\ln\theta$ - ϵ 曲线的拐点与 $(-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon)$ - ϵ 曲线最小值判据, 推导得出该复合材料的动态再结晶临界应变模型, 以期在实际生产提供理论依据。

1 实验材料及方法

本试验原材料为纯度 99.9%、平均粒径为 38 μm 的电解 Cu 粉和纯度 99.9%、平均粒径 44 μm 的 Cr 粉; 将 Cu 粉和 Cr 粉按质量比 7 : 3 的

比例在 Y 型混料机上充分混合, 并在 SPS-30 放电等离子烧结炉中进行烧结, 制备出 $\phi 20\text{ mm} \times h 15\text{ mm}$ 圆柱状试样。烧结工艺为: 真空度 4~5 Pa; 升温速度 100℃/min; 升温至 700℃保温 2 min, 继续升温至 950℃并轴向加压 30 MPa、保温 3 min, 然后随炉冷却至室温取出试样。

对制备试样的密度、导电率、硬度等性能进行测试。利用阿基米德排水法测量试样的密度; 对试样表面进行处理保证表面平整光滑, 利用厦门天研仪器有限公司的 Sigma 2008B1 数字电导率仪测量其电导率; 同时利用郑州华银试验仪器有限公司的 320 HBS-3000 型数显布氏硬度计测量材料的布氏硬度, 布氏硬度计的压头选用直径为 $\phi 5\text{ mm}$ 淬火钢球, 加载 2.45 kN, 保载时间 30 s。

将烧结后的复合材料加工成 $\phi 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱试样, 在美国 DSI 公司生产的 Gleeble-1500D 热模拟机上进行高温热压缩变形试验, 为减少摩擦, 压缩前可在试样两端均匀涂敷石墨粉润滑剂。热模拟试验参数为: 变形温度为 650~950℃, 应变速率为 0.001~10 s^{-1} , 变形量为 60%。变形后立即水淬, 保留热变形组织便于观察分析。采用日本 JSM-5610 LV 型扫描电镜和日本 JEM-2100 型高分辨透射电镜观察得到的复合材料烧结态的微观组织。

2 结果与讨论

2.1 30%Cr-Cu 复合材料综合性能和微观组织

表 1 为 30%Cr-Cu 复合材料的综合性能。可知, 放电等离子烧结法制备的 30%Cr-Cu 复合材料综合性能较好。

图 1 为 30%Cr-Cu 复合材料及其烧结态的微观组织形貌。在图 1(a)中, 连续致密的灰色相为 Cu

表 1 30%Cr-Cu 复合材料的综合性能

Table 1 Comprehensive properties of the 30%Cr-Cu composites

Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Relative density/%	Conductivity/ ($\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$)	Hardness (HBS)
7.9	94.4	22.6	66.9

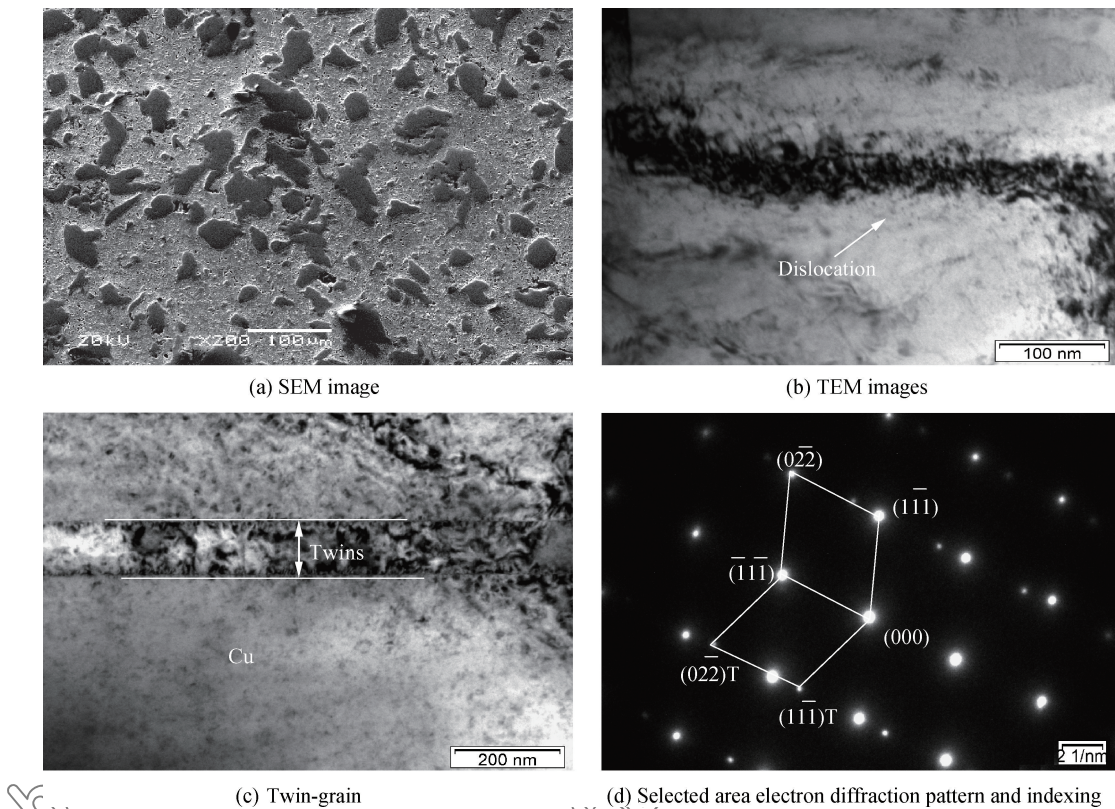


图 1 30%Cr-Cu 的微观组织微观形貌和选区衍射斑点

Fig. 1 Microstructures of the 30%Cr-Cu composites and selected area electron diffraction pattern

基体，黑色增强相 Cr 颗粒均匀弥散分布于 Cu 基体上，结合良好，无明显孔隙。由图 1(b)中可以观察到 Cu 基体上有明显的位错缠绕、塞积形成的位错墙。由图 1(c)可见 Cu 基体上的平板状孪晶组织，图 1(d)为孪晶的电子衍射斑点。经过计算得知晶带轴为 $[011]$ ，孪晶面为 $(\bar{1}1\bar{1})$ ，孪晶界能够使位错的平均自由程降低，材料强度增加。

2.2 30%Cr-Cu 复合材料真应力-应变曲线

图 2 为 30%Cr-Cu 复合材料在不同条件下的真应力-应变曲线。由图 2(a)可知，当变形温度为 750℃时，随应变速率的增加峰值应力逐渐增大，由图 2(b)可知，应变速率恒定为 0.01 s⁻¹时，随温度的增加峰值应力逐渐减小。由图 2 可以看出，该复合材料具有明显的动态再结晶特征：变形初始阶段，随应变量的增加，应力急剧增加达到峰值；随应变的继续增加，应力呈现缓慢下降的趋势。在同一应变条件下，温度越低，应变速率越快，材料的峰值应力越大。这是因为变形开始阶段位错大量增殖并引起堆积和缠结，导致位错密度增加，阻碍位错的运动，从而产生加工硬化现象^[13-14]。当应变继续增加，位错引起的畸变能达到一定程度时，变形储存

能将成为再结晶的驱动力，导致发生动态再结晶软化^[15]。

2.3 30%Cr-Cu 复合材料本构方程

金属材料热变形过程中的流变应力由多方面因素决定，包括：材料的成分 C、变形温度 T、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、变形量 ϵ 以及材料内部的显微组织结构等^[16]。本文采用双曲正弦函数来描述^[17]：

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left\{-\frac{Q}{RT}\right\} \tag{1}$$

式中： σ 为应力；A、 α 、n 均为与材料有关的常数，主要取决于材料的化学组成；Q 为热变形激活能；R 为气体常数；sinh() 为双曲正弦函数。求出 A、 α 、n、Q，即可描述材料的高温流变特性。McGart 和 Sellars^[17] 提出并通过试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 表示^[18-19]：

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{2}$$

根据不同变形条件下的峰值应力，可绘出 30% Cr-Cu 复合材料的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 曲线，如图 3 所示。在一定变形温度和应变速率下，由式(1)对 1/T 求偏导可得

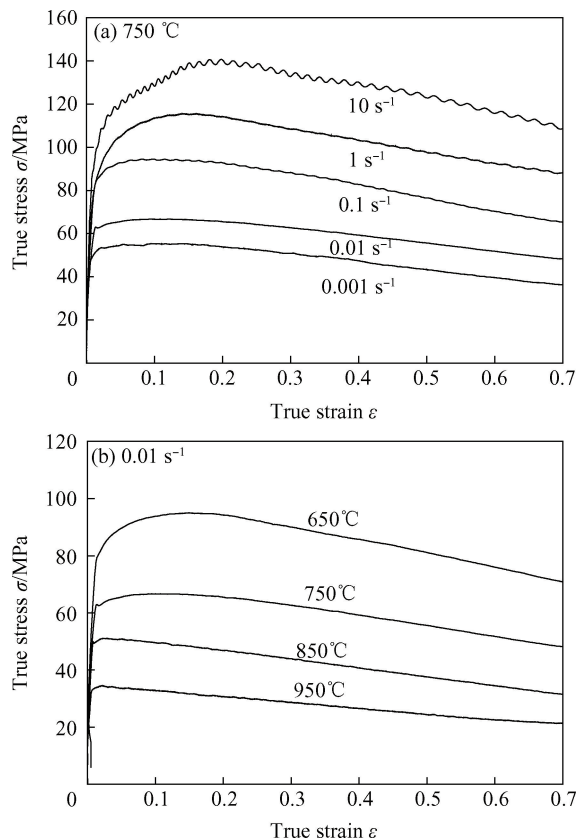
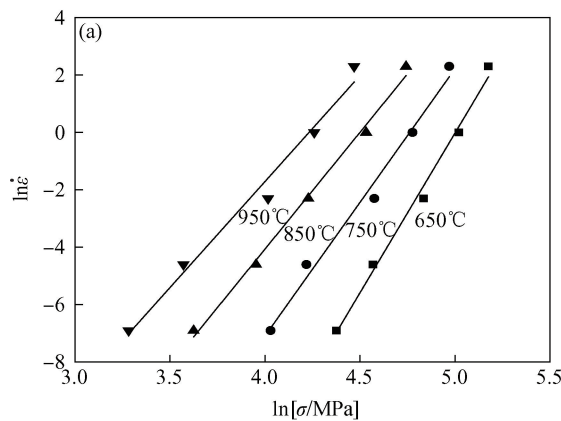


图 2 30%Cr-Cu 复合材料不同条件下的真应力-应变曲线
Fig. 2 True stress-strain curves of the 30%Cr-Cu composites under different conditions

$$Q = R \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \bigg|_{\dot{\epsilon}} \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \bigg|_T \quad (3)$$

采用线性回归处理,可建立 30%Cr-Cu 复合材料在热压缩过程中稳态流变应力与应变速率及变形温度的关系,即图 4(a)的 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线和图 4(b)的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$ 曲线;图 4(c)所示为流变应力与参数 Z 的关系。



依据图 4 线性回归分析计算,可得上述各参数值为: $A = e^{19.452}$, $n = 5.301$, $\alpha = 0.014$, $Q = 213.840 \text{ kJ/mol}$ 。将上述参数值代入式(1),可得 30%Cr-Cu 复合材料的本构方程:

$$\dot{\epsilon} = e^{19.452} [\sinh(0.0146\sigma)]^{5.711} \exp\left[-\frac{213\,840}{8.314T}\right] \quad (4)$$

2.4 30%Cr-Cu 复合材料动态再结晶临界条件

材料的加工硬化率 θ 表示流变应力随应变变量增加的快慢程度,其大小与热压缩过程中材料内部位错密度的变化有关^[20]。Poliak 和 Jonas 等^[9-10]认为材料发生动态再结晶时,材料的 θ - σ 曲线呈现有拐点特征,即 $-\partial^2\theta/\partial\sigma = 0$ 。利用偏导数关系可推导出: $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon = \partial\theta/\partial\sigma$,说明不仅 θ - σ 曲线呈现拐点特征, $\ln\theta$ - ϵ 曲线也必然具有相应的拐点。因此,可根据 30%Cr-Cu 复合材料的应力-应变曲线绘制 $\ln\theta$ - ϵ 和 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 曲线,再利用 $-\partial^2(\ln\theta)/\partial\epsilon^2$ 判据可得到相应的临界应变值 ϵ_c 。

图 5 为 30%Cr-Cu 复合材料在变形温度 750 °C、应变速率 0.01 s^{-1} 时的实测真应力-应变曲线和经过非线性方程拟合后的真应力-应变曲线。试验获得的真应力-应变曲线是不光滑且呈现锯齿状,无法直接从曲线中计算加工硬化率 θ ,本文先对通过试验数据绘制的真应力-应变曲线进行拟合,获得拟合方程,再经过微分求得得到真应变下拟合曲线斜率,最后绘制 $\ln\theta$ - ϵ 曲线,确定动态再结晶的临界条件。图 5(a)中真应力-应变曲线拟合方程为 $\sigma = (0.000671 + 3.0484\epsilon + 1046.7723\epsilon^2 + 3318.1187\epsilon^3 + 12537.5969\epsilon^4 + 8853.8535\epsilon^5) / (0.000114 + 0.02602\epsilon - 16.3452\epsilon^2 + 33.8311\epsilon^3 - 85.0681\epsilon^4 - 46.2307\epsilon^5 + 95.6730\epsilon^6)$ (5)

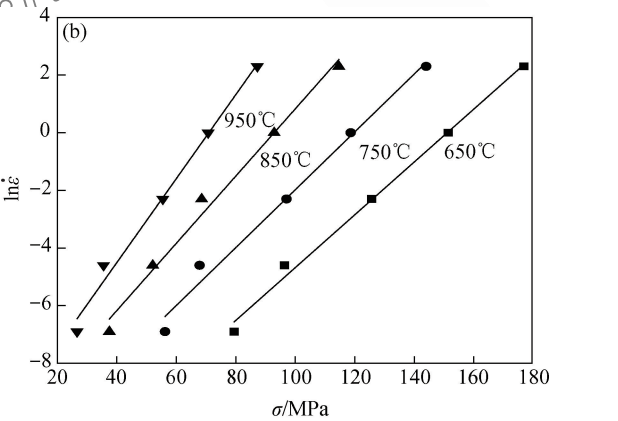


图 3 基于 30%Cr-Cu 复合材料峰值应力和应变速率关系构建的 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln\sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 曲线
Fig. 3 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln\sigma$ and $\ln \dot{\epsilon}$ - σ curves based the relationship between peak stress and strain rate of the 30%Cr-Cu composites

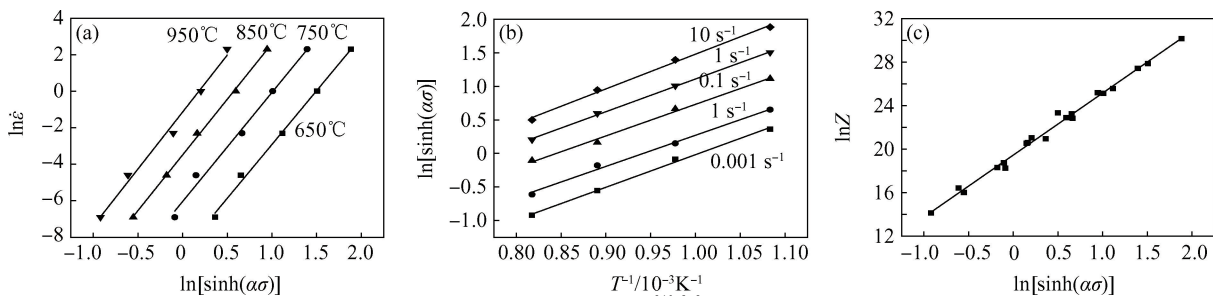


图4 30%Cr-Cu 复合材料峰值应力 σ 与变形温度 T 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及参数 Z 之间的关系

Fig. 4 Relationships among peak stresses, strain, deformation temperature and Z parameter of the 30%Cr-Cu composites

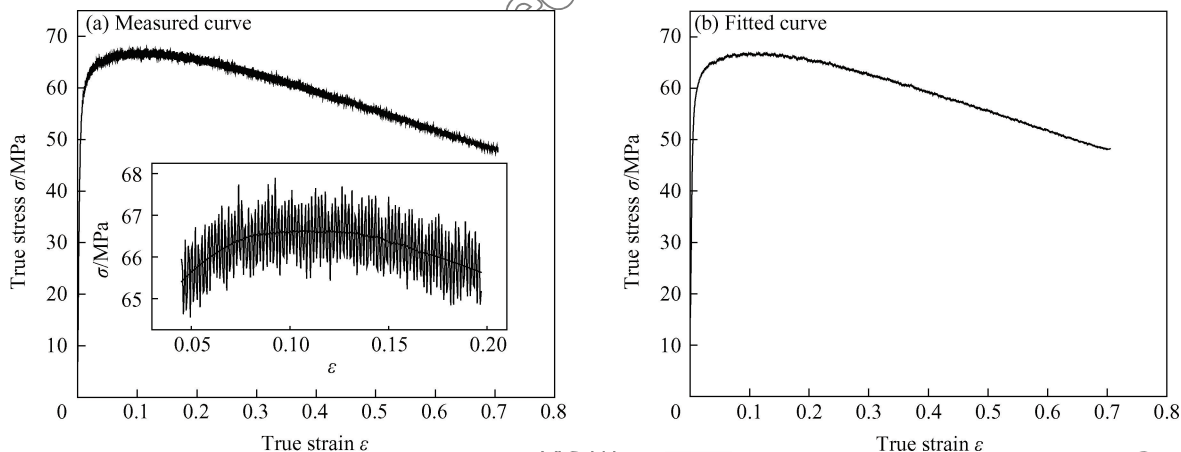


图5 30%Cr-Cu 复合材料在变形温度 750°C 和应变速率 0.01 s⁻¹ 时的真应力-应变曲线

Fig. 5 True stress-strain curves of the 30%Cr-Cu composites at the temperature of 750°C and strain rate of 0.01 s⁻¹

由上式可以得到各应变下的加工硬化率 θ ，绘制 $\ln\theta$ - ϵ 曲线和 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 曲线，如图 6 所示。对 $\ln\theta$ - ϵ 曲线进行三次方程拟合后得到图 6(a) 的 $\ln\theta$ - ϵ 拟合曲线，其中在应变 0.06 附近出现拐点，为了确定拐点具体位置，得出 $\ln\theta$ - ϵ 曲线拟合方程：

$$\ln\theta = 9.216 - 257.082\epsilon + 4043.619\epsilon^2 - 22594.330\epsilon^3 \quad (6)$$

对式(6)求导得

$$-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon = -257.082 + 8087.238\epsilon - 67782.99\epsilon^2 \quad (7)$$

根据式(7)绘制得到的 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 曲线如图 6(b) 所示。当 $-\partial^2(\ln\theta)/\partial\epsilon^2 = 0$ 时所对应的应变，即为材料在 750°C、应变速率为 0.01 s⁻¹ 时的临界应变 $\epsilon_c = 0.05966$ 。

利用该复合材料不同应变速率和不同变形温度条件下的真应力-应变数据，绘制其热变形条件下的 $\ln\theta$ - ϵ 曲线，如图 7 所示。可知，不同应变速率（见图 7(a)）与不同温度（见图 7(b)）条件下的 $\ln\theta$ - ϵ 曲线有相似规律：随变形量的增加，加工硬化率开始时迅速降低，然后进入缓慢降低阶段，到变形后

期又快速下降，其中，在加工硬化率缓慢降低处曲线出现拐点。

图 8 为不同变形条件下对应于图 7 的 $\ln\theta$ - ϵ 曲线绘制的 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 关系曲线。可知， $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ - ϵ 曲线均出现最小值，且最小值与 $\ln\theta$ - ϵ 曲线的拐点位置相对应，该点处对应的应变即为动态再结晶临界应变。

图 9 为不同变形温度、不同应变速率条件下 30%Cr-Cu 复合材料临界应变 ϵ_c 的三维框架图。可以看出，应变速率与临界应变正相关，即随着应变速率的提高，临界应变增加。应变速率一定时，随着温度的升高，临界应变有减小的趋势；当温度一定时，随着应变速率的增加，临界应变有增大的趋势。温度升高，为材料内部位错的迁移提供动力，有利于位错迁移，因此，复合材料在较小应变变量时就会发生动态再结晶；当材料变形速率增加时，材料内部变形晶粒产生的位错没有足够的时间进行迁移，因此需要更大的变形量来提高位错密度和位错迁移时间，从而造成动态再结晶临界应变增大^[21]。

为了能够分析应变速率和温度对动态再结晶临

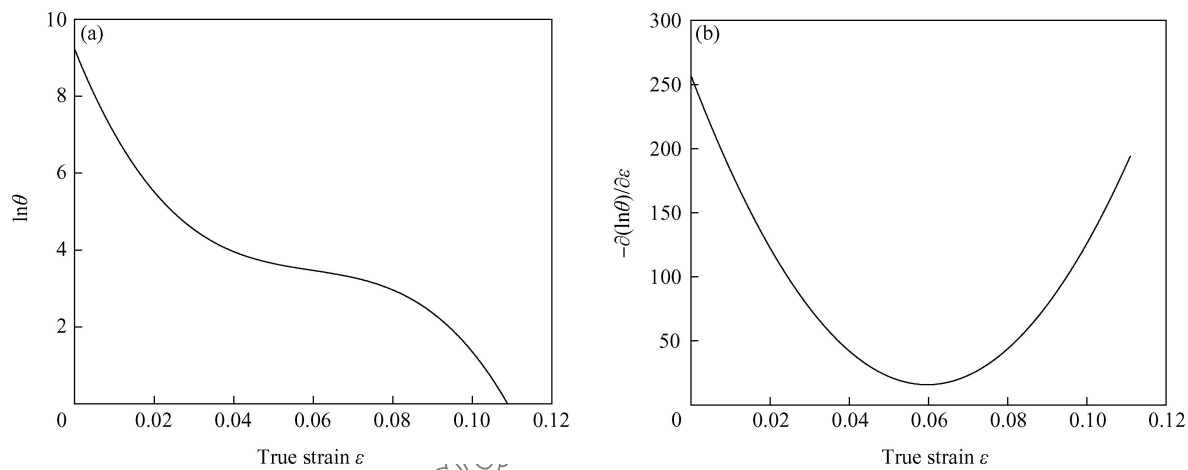


图 6 30%Cr-Cu 复合材料在变形温度 750℃ 和应变速率 0.01 s⁻¹ 时应变和硬化率的关系

Fig. 6 Relationships between true strain and work hardening rate of the 30%Cr-Cu composites at 750℃ and strain rate of 0.01 s⁻¹

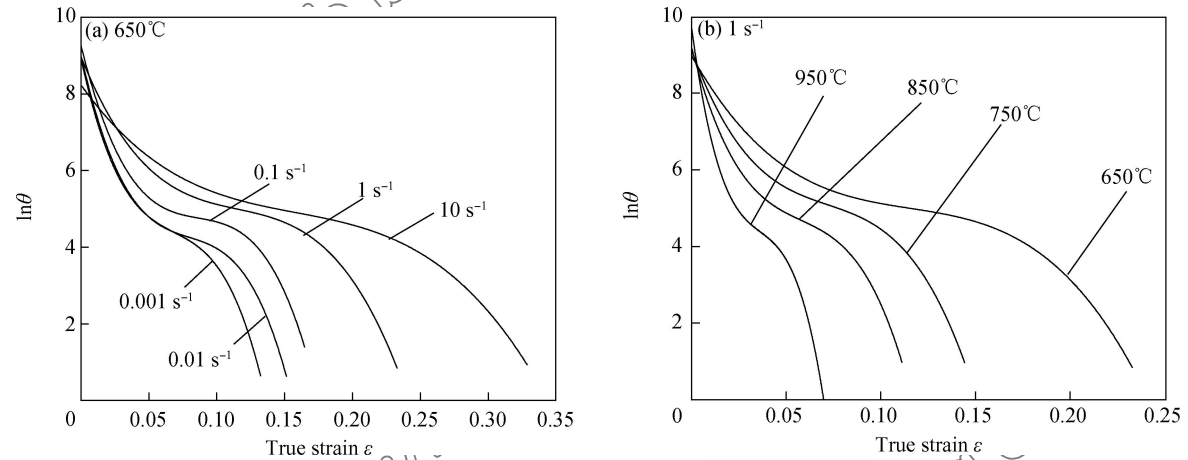


图 7 30%Cr-Cu 复合材料不同应变速率和不同变形温度时硬化率 $\ln\theta$ 与应变 ϵ 之间的关系

Fig. 7 Relationship between $\ln\theta$ and ϵ of the 30%Cr-Cu composites under different strain rates and different deformation temperatures

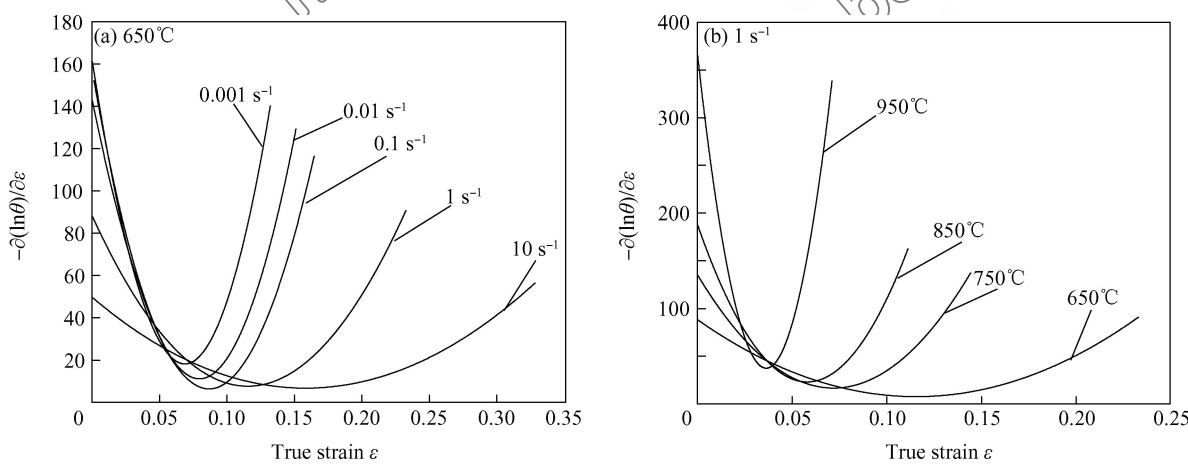


图 8 30%Cr-Cu 复合材料不同应变速率及不同变形温度时 $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ 与应变 ϵ 之间的关系

Fig. 8 Relationship between $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$ and ϵ of the 30%Cr-Cu composites under different strain rates and different deformation temperatures

界应变的影响, 引用使用最广泛的 Sellars 模型^[22]来表征临界应变:

$$\epsilon_c = k\epsilon_p \tag{8}$$

$$\epsilon_c = aZ^b \tag{9}$$

式中: k 、 a 、 b 均为常数; ϵ_c 为临界应变; ϵ_p 为峰值应变; Z 为 Zener-Hollomom 参数。对式(8)两边取

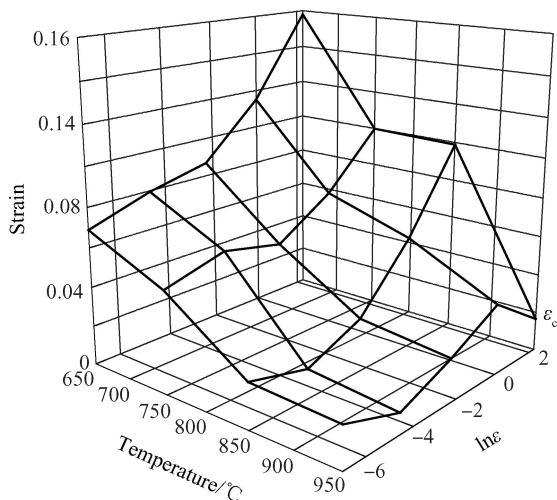


图9 变形温度和应变速率对30%Cr-Cu复合材料峰值应变的影响

Fig. 9 Effect of deformation temperatures and strain rates on critical strain of the 30%Cr-Cu composites

对数, 可得

$$\ln \epsilon_c = \ln \epsilon_0 + n \ln \dot{\epsilon} \quad (10)$$

根据不同温度和应变速率下的临界应变 ϵ_c 和相应的 Z 值, 绘制 $\ln \epsilon_c - \ln Z$ 散点图, 通过最小二乘法对其进行线性拟合, 所得结果如图 10 所示。在本试验条件下, 临界应变 ϵ_c 随 Z 参数的增大而增加, $\ln \epsilon_c$ 与 $\ln Z$ 之间存在线性关系, 相关系数为 0.77。得到的拟合方程为 $\ln \epsilon_c = 0.1396 \ln Z - 6.041$, 则临界应变预测模型可以表示为 $\epsilon_c = 2.38 \times 10^{-3} Z^{0.1396}$ 。该模型表明变形温度和应变速率对 30%Cr-Cu 复合材料动态再结晶临界应变影响较明显, 温度越高, 应变速率越低, 动态再结晶越易发生。

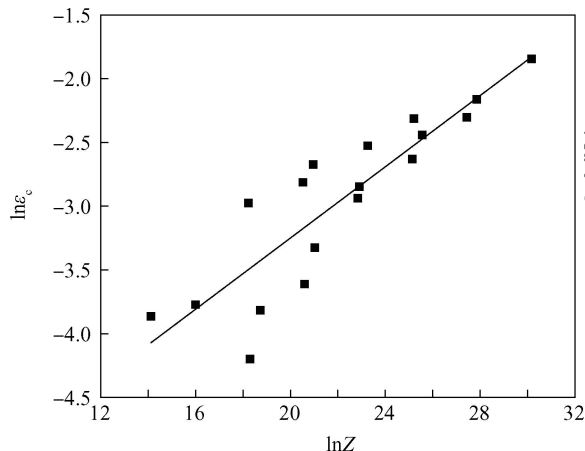


图10 30%Cr-Cu 复合材料临界应变 ϵ_c 与 Zener-Hollomon 参数之间的关系

Fig. 10 Relationship between critical strain and Zener-parameter of the 30%Cr-Cu composites

3 结论

(1) 采用放电等离子法制备的 30%Cr-Cu 复合材料的组织分布均匀, 结构较致密, 综合性能良好, 增强相颗粒弥散分布与 Cu 基体上。

(2) 30%Cr-Cu 复合材料的真应力-真应变曲线以动态再结晶型为主, 峰值应力随变形温度的降低或应变速率的升高而增加; 高温热压缩时的热变形激活能为 213.840 kJ/mol, 建立该材料的流变应力本构方程为

$$\dot{\epsilon} = e^{19.452} [\sinh(0.0146\sigma)]^{5.711} \exp \left[-\frac{213.840}{8.314T} \right]$$

(3) 30%Cr-Cu 复合材料流变曲线具有明显的动态再结晶特征。加工硬化率 θ 与真应变 ϵ 所构建的 $\ln \theta - \epsilon$ 曲线出现拐点, 并且在 $-\partial(\ln \theta) / \partial \epsilon - \epsilon$ 曲线上出现最小值, 该值处所对应的应变即为动态再结晶临界应变。在本试验条件下, 30%Cr-Cu 复合材料动态再结晶临界应变随应变速率的增加而增加, 随变形温度的升高而降低, 临界应变预测模型函数关系式可以表示为 $\epsilon_c = 2.38 \times 10^{-3} Z^{0.1396}$ 。

参考文献:

- [1] 冼爱平. 大功率真空开关铜铬触头材料[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 731-740.
XIAN Aiping. Cu-Cr contact materials for high power vacuum interrupters[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 731-740 (in Chinese).
- [2] 杨涛林, 陈跃. 颗粒增强金属基复合材料的研究进展[J]. 铸造技术, 2006, 27(8): 871-873.
YANG Taolin, CHEN Yue. Development in the research on particle-reinforced metal matrix composites[J]. Foundry Technology, 2006, 27(8): 871-873 (in Chinese).
- [3] 李震彪, 张逸成. 真空触头材料的性能分析比较[J]. 低压电器, 1998(3): 15-25.
LI Zhenbiao, ZHANG Yicheng. Analysis and comparisons for properties of vacuum contact materials[J]. Low Voltage Apparatus, 1998(3): 15-25 (in Chinese).
- [4] 蒲少玲, 乔志佳, 牟洋, 等. 机械合金化-放电等离子烧结 Al_2Cu 颗粒增强 Al 基复合材料的制备[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1244-1249.
PU Shaoling, QIAO Zhijia, MOU Yang, et al. Preparation of Al_2Cu /Al composites by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1244-1249 (in Chinese).
- [5] 张珊珊, 崔洪之, 赫庆坤, 等. 等离子加热反应合成 TiB_2 - TiC - Fe_2Ti 复合材料[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 556-562.
ZHANG Shanshan, CUI Hongzhi, HE Qingkun, et al.

- TiB₂-TiC-Fe₂Ti composite synthesized by plasma heating reation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 556-562 (in Chinese).
- [6] 武建军, 张运, 李国彬, 等. Al₂O₃/Cu 复合材料的热塑性变形及动态再结晶[J]. *复合材料学报*, 2000, 17(2): 106-110. WU Jianjun, ZHANG Yun, LI Guobin, et al. Plastic deformation and recrystallization of Al₂O₃/Cu composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2000, 17(2): 106-110 (in Chinese).
- [7] 欧阳德来, 鲁世强, 黄旭, 等. TA15 钛合金 β 区变形动态再结晶的临界条件[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(8): 1539-1544. OUYANG Delai, LU Shiqiang, HUANG Xu, et al. Critical conditions of dynamic recrystallization during deformation of β area in TA15 titanium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(8): 1539-1544 (in Chinese).
- [8] 钟铁峰, 刘国天, 周小平, 等. 金属基复合材料热弹性塑变分渐近细观力学模型[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(7): 1500-1506. ZHONG Yifeng, LIU Guotian, ZHOU Xiaoping, et al. Variational asymptotic micromechanical model for thermoplastic behavior of metal matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(7): 1500-1506 (in Chinese).
- [9] POLLAK E I, JONAS J J. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(5): 684-691.
- [10] POLLAK E I, JONAS J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(1): 127-136.
- [11] 杨志强, 刘勇, 田保红, 等. TiC/Cu-Al₂O₃ 复合材料动态再结晶临界条件[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(4): 963-969. YANG Zhiqiang, LIU Yong, TIAN Baohong, et al. Critical conditions of dynamic recrystallization of TiC/Cu-Al₂O₃ composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(4): 963-969 (in Chinese).
- [12] 张鹏, 李富国. SiC 颗粒增强 Al 基复合材料的动态再结晶模型[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(7): 1166-1170. ZHANG Peng, LI Fuguo. Dynamic recrystallization model of SiC particle reinforce aluminum matrix composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(7): 1166-1170 (in Chinese).
- [13] 申利权, 杨旗, 靳丽, 等. AZ31B 镁合金在高应变速率下的热压缩变形行为和微观组织演变[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(9): 2195-2204. SHEN Liquan, YANG Qi, JIN Li, et al. Deformation behavior and microstructure transformation of AZ31B Mg alloy under high strain rate compression[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(9): 2195-2204 (in Chinese).
- [14] 柴哲, 张毅, 李瑞卿, 等. Cu-Cr-Zr-Y 合金动态再结晶及微观组织演化[J]. *功能材料*, 2016, 47(1): 1102-1105. CHAI Zhe, ZHANG Yi, LI Ruiqing, et al. Dynamic recrystallization behavior and microstructure evolution of Cu-Cr-Zr-Y alloy[J]. *Journal of Functional Materials*, 2016, 47(1): 1102-1105 (in Chinese).
- [15] 蔡志伟, 陈拂晓, 郭俊卿. AZ41 M 镁合金动态再结晶临界条件[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(9): 1167-1171. CAI Zhiwei, CHEN Fuxiao, GUO Junqing. Critical conditions of dynamic recrystallization for AZ41 M magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(9): 1167-1171 (in Chinese).
- [16] GAROFALO F. An empirical relation refining the stress dependence of minimum creep rate in metals[J]. *Trans Metall Soc AIME*, 1963, 227(2): 351-355.
- [17] SELLARS C M, Mcgeart W J. On the mechanism of hot deformation[J]. *Acta Metall*, 1966, 14: 1136-1138.
- [18] TALEGHANI M A J, NAVAS E M R, SALEHI M, et al. Hot deformation behaviour and flow stress prediction of 7075 aluminium alloy powder compacts during compression at elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 534: 624-629.
- [19] 杨志强, 刘勇, 田保红, 等. TiC(30%)/Cu-Al₂O₃ 复合材料热变形及动态再结晶[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(1): 117-124. YANG Zhiqiang, LIU Yong, TIAN Baohong, et al. Hot deformation and dynamic recrystallization of TiC(30vol%)/Cu-Al₂O₃ composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(1): 117-124 (in Chinese).
- [20] 廖舒伦, 张立文, 岳重祥, 等. GCr15 热变形行为与流变应力模型的研究[J]. *材料工程*, 2008(4): 8-14. LIAO Shulun, ZHANG Liwen, YUE Chongxiang, et al. Research on thermal deformation behavior and model of flow stress of GCr15 steel[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(4): 8-14 (in Chinese).
- [21] 孙亚丽, 谢敬佩, 郝世明, 等. 30%SiCp/2024 复合材料动态再结晶临界条件[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(9): 7-13. SUN Yali, XIE Jingpei, HAO Shiming, et al. Critical conditions of dynamic recrystallization of 30%SiCp/2024 composite[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(9): 7-13 (in Chinese).
- [22] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling[J]. *Metal Science*, 1979, 13(3): 187-194.