材料与成形性能

Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金塑性变形特性

张彦敏[1,2]，王永健[1,2]，陈赛[1,2]，甘春雷[3]，王云飞[4]，宋克兴[1]

(1.河南科技大学 材料科学与工程学院，河南 洛阳 471023；
2.河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室，河南 洛阳 471023；
3.广东省材料与加工研究所，广州 510650；
4.中国一拖集团有限公司工艺材料研究所，河南 洛阳 471003）

摘要：目的 研究 Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金高温压缩塑性变形特性。**方法** 在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上，在变形温度为 550, 650, 750, 850, 950 ℃，应变速率为 0.01, 0.1, 1, 5, 10 s^{-1}，变形量均为 50%的条件下，对 Cu-Al_2O_3(0.68%)铜合金进行热压缩变形试验。**结果** 获得了不同热变形条件下的真应力应变曲线，建立了基于双曲正弦本构关系 Arrhenius 流动应力模型的本构方程，及基于动态材料模型(DMM)的热加工图。**结论** Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金高温压缩时，合金的热变形存在应变强化和稳态流变 2 个基本阶段，主要软化机制为动态再结晶。该合金的最佳变形区域温度为 900～950 ℃，应变速率为 0.2～2.8 s^{-1}。

关键词： Cu-Al_2O_3(0.68%)合金；塑性变形；本构方程；热加工图
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.018
中图分类号： TG301 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2017)05-0128-06

Plastic Deformation Characteristics of Cu-Al_2O_3(0.68%) Dispersion Strengthened Copper Alloy

ZHANG Yan-min[1,2], *WANG Yong-jian*[1,2], *CHEN Sai*[1,2], *GAN Chun-lei*[3], *WANG Yun-fei*[4], *SONG Ke-xing*[1]

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2.Henan Key Laboratory of Non-Ferrous Metals Science & Processing Technology, Luoyang 471023, China;
3.Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China;
4.Technology and Material Research Institute, YTO Group Corporation, Luoyang 471003, China)

ABSTRACT: The paper aims to research plastic deformation characteristics of Cu-Al_2O_3(0.68%) dispersion strengthened copper alloy at high temperature. The hot compressive deformation test of Cu-Al_2O_3(0.68%) copper alloy with 50% of deformation was carried out on a Gleeble-1500D thermal simulator at 550, 650, 750, 850, 950 ℃ of deformation temperature and 0.01, 0.1, 1, 5, 10 s^{-1} of strain rate. The true stress-strain curves under different thermal deformation conditions were obtained. The constitutive equations of the Arrhenius flow stress model based on the hyperbolic sine constitutive relation and the thermal machining diagram based on the dynamic material model (DMM) were established. There are two basic stages in thermal deformation of Cu-Al_2O_3(0.68%) dispersion strengthened copper alloy during high temperature compression: strain hardening and steady state rheology. The main softening mechanism is dynamic recrystallization. The optimum deformation zone temperature of the alloy is 900~950 ℃. Its strain rate is 0.2~2.808 s^{-1}.

KEY WORDS: Cu-Al_2O_3(0.68%) alloy; plastic deformation; constitutive equation; thermal machining diagram

收稿日期： 2017-08-04
基金项目： 国家重点研发计划（2016YFB0300400）；河南省科技攻关计划（国际科技合作）（162102410025）；河南省高校科技创新团队支持计划（14IRTSTHN007）
作者简介： 张彦敏（1970—），女，博士，教授，主要从事高性能铜合金研发及数值模拟。

高强高导铜合金是一类导电导热性能优良且综合力学性能良好的结构-功能材料，既具有高强度和良好的塑性，又继承了纯铜优良的导电性，广泛应用于电阻焊电极、连铸机结晶器、高速铁路接触线、热核实验反应堆冷却墙壁、微波管结构和导电部件、电磁炮轨道、航空航天插接件连接线和高压开关触头等领域，对重大工程项目的实施具有重要意义[1—5]。研究结果表明，通过粉末冶金的方法在铜基体中引入细小且均匀分布的增强相 Al_2O_3 颗粒，不但可以提高强度，而且具有良好的抗高温软化、抗电弧侵蚀、高导电率和抗磨损能力，是目前理想的高强高导铜合金材料[6]。一直以来对 Al_2O_3/Cu 弥散强化铜合金的研究主要集中在材料成分组元设计及优化、热处理工艺等方面，对合金的塑性加工成形的研究相对较少，这严重阻碍和制约着该合金的推广及应用。

材料的热变形流变应力是表征金属材料在高温条件下热加工性能优劣的基本性能之一，能够反映出金属材料高温变形规律及变形机制。通过热模拟方法获得材料在不同变形温度、不同应变速率条件下的真应力真应变数据，求得相应流变应力本构方程及特定应变热加工图，对合理制定加工工艺和充分挖掘材料性能具有重要参考价值。周晓华等[7]对高温下几种铜合金流变应力进行了研究试验，并分析了 4 种铜合金在高温热压缩状态下的流变应力，讨论了应变速率、变形温度以及变形量 3 个不同因素对流变应力的影响规律，并分析得到了拟合精度较高的流变应力本构方程；杨斌等[8]研究讨论了高温下易切削 Cu-Se-Bi 合金材料的高温热变形行为；何霞等[9]研究了 Cu-0.23Be-0.84Co 合金的热变形行为，然而目前对于粉末冶金方法制备的 Cu-Al_2O_3(0.68%)合金的热塑性变形行为特性的研究还不曾报道。

文中以内氧化原位自生 Al_2O_3/Cu 弥散强化铜合金为研究对象，在热模拟机上进行不同温度、不同应变速率参数的等温压缩试验，通过研究该合金热压缩变形过程中的流变应力，建立材料的本构方程和热加工图。分析相应应变下的热加工图，得到该合金在热加工图中不同区域高温变形特征，为制定该合金热加工工艺参数和优化设计提供理论依据。

1　试验

试验材料为 Al_2O_3/Cu 弥散强化铜合金，Al_2O_3 的质量分数为 0.68%，该合金材料在实验室通过内氧化工艺制备，材料状态为拉拔态棒材，规格为 Φ15 mm×500 mm，机加工为热压缩试样，规格为 Φ8 mm×12 mm，在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上进行热压缩变形试验。

变形温度、应变速率和变形量为热压缩变形试验参数，具体工艺参数为：变形温度为 550, 650, 750, 850, 950 ℃，应变速率为 0.01, 0.1, 1, 5, 10 s^{-1}，变形量均为 50%。试验时，在试样上下端面的小凹槽里分别涂抹石墨润滑剂，以避免产生不均匀变形，热电偶丝放置到圆柱形试样侧面的孔中，准确测量试验温度。

以 10 ℃/s 的加热速度将试样加热到变形温度，保温 120 s，使试样各部分温度均匀，然后在该温度下以不同应变速率进行热压缩变形试验。由试验机自带的计算机自动采集真应力-真应变。

2　结果与分析

2.1　真应力–真应变曲线

在不同温度和不同应变速率条件下，Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金热压缩变形试验得到的真应力应变曲线见图 1。可以看出，该合金的热变形行为存在应变强化和稳态变形 2 个阶段。随着应变的增加，应力值先近乎直线上升，后又趋于平稳。在变形温度 550 ℃（较低）和应变速率 10 s^{-1}（较高）的情况下，应力应变曲线先快速上升后又趋于平稳，曲线拐角处没有出现明显的应力峰值，没有出现剧烈软化趋势，表现出典型的动态回复特征；在变形温度 950 ℃（较高）和应变速率 0.01 s^{-1}（降低）的情况下，应力应变曲线呈现出先迅速上升到极值后缓慢下降，最后趋于平稳的趋势，说明发生了动态再结晶。同一温度条件，流变应力呈现出随着应变速率的增大而不断增大的趋势，并且应变速率越大，流变应力由峰值应力下降至稳态流变应力的幅度越小。变形温度 550 ℃、应变速率为 0.01~10 s^{-1} 时，峰值应力分别为 167.35, 200.11, 232.09, 243.87, 249.37 MPa，稳态时流变应力分别为 106.50, 153.81, 189.45, 203.61, 208.25 MPa，相应应变速率下，流变应力由峰值应力降至稳态流变应力，分别下降 60.85, 46.3, 42.64, 40.26, 41.12 MPa。

不同变形条件下，Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金峰值应力变化情况曲线见图 2。可以看出，应变速率相同时，峰值应力呈现出随着变形温度的升高不断降低的趋势，应变速率为 0.1 s^{-1}、温度为 550~950 ℃ 时，峰值应力分别为 200.10, 166.73, 133.67, 99.56, 66.18 MPa；变形温度相同时，峰值应力随着应变速率的升高而不断增大，还发现如果应变速率越大，其峰值应力增大的幅度会越小，变形温度为 650 ℃，应变速率为 0.01~10 s^{-1} 时，峰值应力分别为 128.94, 166.73, 196.05, 209.30, 217.71 MPa，相邻应变速率之间的峰值应力分别增大 37.79, 29.32, 13.25, 8.41 MPa。

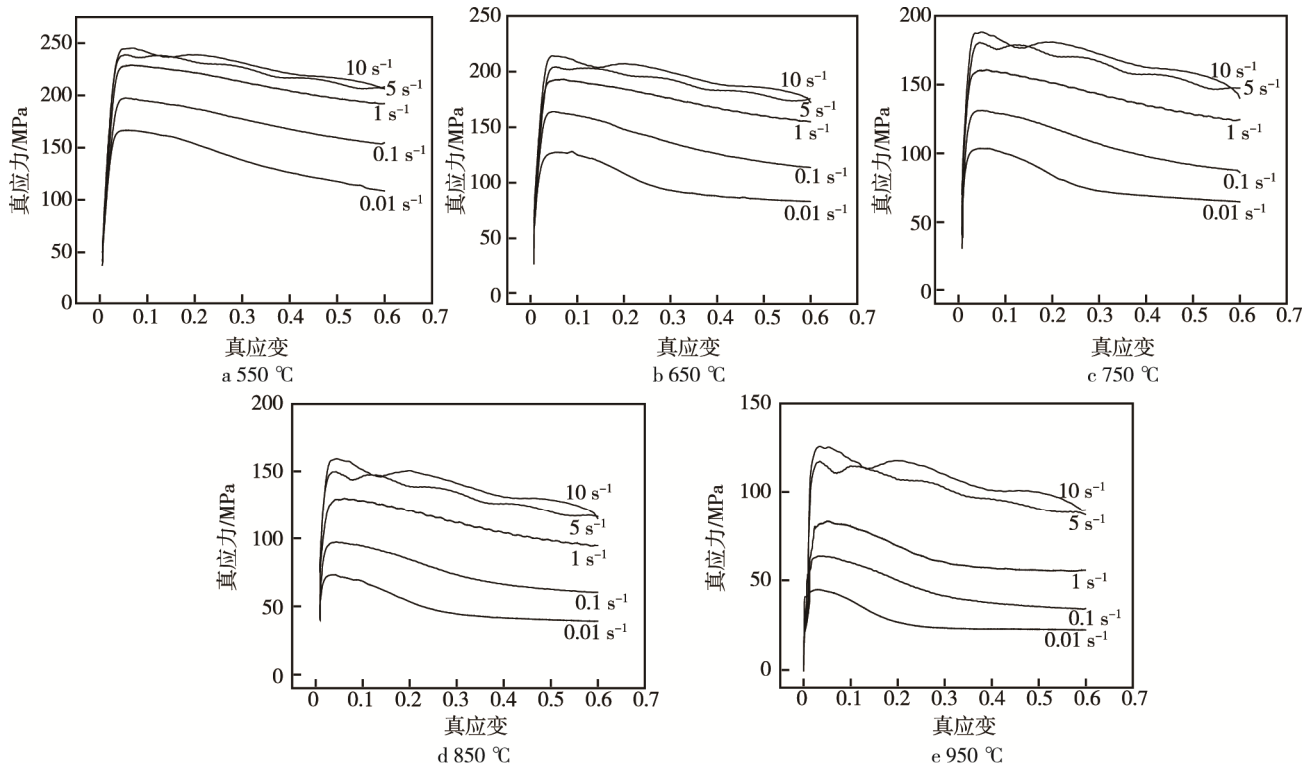


图 1 Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金不同应变速率下真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curve under different strain rates of Cu-Al_2O_3(0.68%) dispersion-strengthened copper alloy

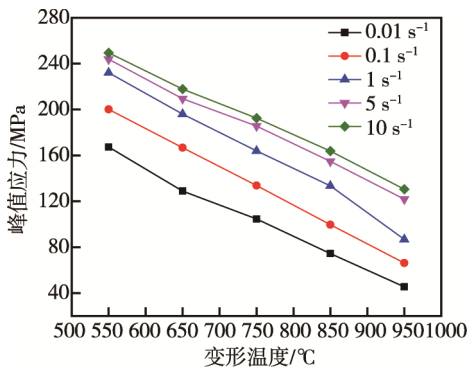


图 2 不同热变形条件下 Cu-Al_2O_3(0.68%)合金峰值应力

Fig.2 Peak stress of Cu-Al_2O_3(0.68%) copper alloy under different thermal deformation conditions

在变形温度一定，应变速率增大时，相应峰值屈服应力随着应变速率的增大而增大，合金的形变量在单位时间内显著增大，这将导致材料内部位错密度增大，动态回复或动态再结晶软化效应没来得及充分进行，此时加工硬化效应占据塑性变形的主导地位，造成合金的峰值应力增大。当应变速率相同，热压缩变形温度增加时，材料内部热激活效应变得愈加显著，材料内部位错的滑移速度增加，原子活动能力增强，位错的攀移更容易发生，导致位错密度降低，动态回复或动态再结晶产生的软化效应将部分抵消加工硬化产生的效果，因此，材料的峰值应力降低。

2.2 本构方程的构建

采用双曲正弦本构关系 Arrhenius 流动应力模型描述金属材料高温流变应力 σ 与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 以及热变形温度 T 之间的关系，流动应力方程见式(1)[10]。

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

式中：$\dot{\varepsilon}$ 为应变速率(s^{-1})；A 为结构因子(s^{-1})；n 为应力指数；T 为变形温度(K)；α 为应力水平参数(mm^2/N)；R 为气体摩尔常数，R=8.314 J/(mol·K)；σ 为流变应力(MPa)；Q 为热变形激活能(kJ/mol)。

研究表明[11]，低应力水平时，对式(1)中的 $\sinh(\alpha\sigma)$ 进行泰勒级数变换展开后，流变应力和应变速率的关系可以近似用式(2)的指数函数关系式表达。

$$\dot{\varepsilon}=A_1\sigma^{n_1}\exp(-Q/RT) \tag{2}$$

高应力水平时，流变应力与应变速率的关系见式(3)。

$$\dot{\varepsilon}=A_2\exp(\beta\sigma)\exp(-Q/RT) \tag{3}$$

式中：A_1, A_2, n_1, β 均为常数。其中 $A_1=A/2^{n_1}$ $A_2=A\alpha^{n_1}$，应力水平参数 $\alpha=\beta/n_1$。

对式(2)和(3)两边同时取对数，可得：

$$\ln\dot{\varepsilon}=\ln A_1+n_1\ln\sigma-Q/(RT) \tag{4}$$

$$\ln\dot{\varepsilon}=\ln A_2+\beta\sigma-Q/(RT) \tag{5}$$

由式(4)和(5)可知，当变形温度一定时，n_1 是曲线 $\ln\sigma$-$\ln\dot{\varepsilon}$ 斜率的倒数，而 β 是曲线 σ-$\ln\dot{\varepsilon}$ 斜率的倒

数，通过分别求解 $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 和 σ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 两曲线的斜率值，可以得到常数 n_1 和常数 β 值，再由式 $\alpha=\beta/n_1$ 可求得应力水平参数 α。

Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金 $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 关系曲线和 σ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 关系曲线分别见图 3 和图 4。采用线性回归方法分别求得不同温度下 $\ln\sigma$-$\ln\dot{\varepsilon}$ 关系曲线和 $\ln\sigma$-$\ln\dot{\varepsilon}$ 关系曲线的斜率值，进而可分别求出 n_1 和 β 的平均值，即 $n_1=11.57$，$\beta=0.08\ \mathrm{mm^2/N}$，计算出应力水平参数 $\alpha=\beta/n_1=0.0069\ \mathrm{mm^2/N}$。

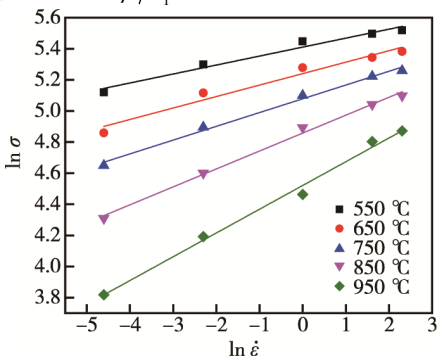


图 3　$\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 曲线

Fig.3　$\ln\sigma$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ curves

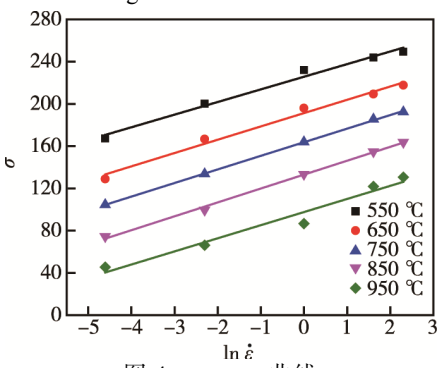


图 4　σ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 曲线

Fig.4　σ - $\ln\dot{\varepsilon}$ curves

由 Zener-Hollomon 参数（Z 参数）来表示[12]材料的流变应力与热变形条件之间的关系：

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp[Q/RT] \tag{6}$$

由式(1)和(6)可求得：

$$Z=A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{7}$$

对式(6)和(7)两边同时取对数，整理可得：

$$\ln\dot{\varepsilon}=\ln A+n\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-Q/(RT) \tag{8}$$

当变形温度一定时，式(8)两边同时对变形温度 T 求导，可得：

$$n=\left\{\frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}\right\}_T \tag{9}$$

当应变速率一定时，式(8)两边同时对应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 求导，可得：

$$\frac{Q}{Rn}=\left\{\frac{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}\right\}_{\dot{\varepsilon}} \tag{10}$$

由式(9)和(10)可得：

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

如图 5 和图 6 所示，分别求解 $\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$-$\ln\dot{\varepsilon}$ 和 $\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$-$1/T$ 两曲线的斜率值，可以得到应力指数 n 和 Q/Rn 值，进而求出热激活能 Q 值。经过计算得到应力指数 $n=8.45$，$Q/Rn=2.94$，热激活能 Q=206.54 kJ/mol。

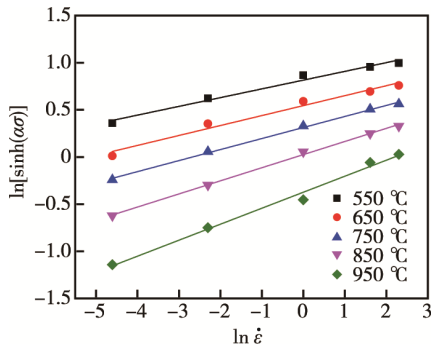


图 5　$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ 曲线

Fig.5　$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ - $\ln\dot{\varepsilon}$ curve

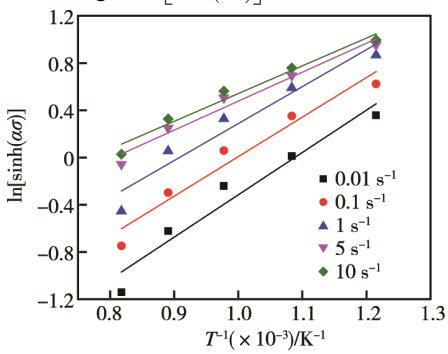


图 6　$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ -$1/T$ 曲线

Fig.6　$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ -$1/T$ curve

对式(7)两边同时取对数，整理可得：

$$\ln Z=\ln A+n\ln[\sinh(\alpha\sigma)] \tag{11}$$

将不同变形温度下的应变速率和所求得的热激活能 Q 代入式(6)，可以得到不同条件下的 Z 值，见表 1。并运用作图法得到的 $\ln Z$-$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ 关系曲线，见图 7。由式(11)可知，$\ln A$ 为 $\ln Z$-$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ 关系曲线的截距。

表 1　不同热变形条件下的 Z 值

Tab.1 The values of Z under different hot deformation conditions

变形温度/℃	应变速率/s^{-1}				
	0.01	0.1	1	5	10
550	1.29×10^{11}	1.29×10^{12}	1.29×10^{13}	6.45×10^{13}	1.29×10^{14}
650	4.89×10^{9}	4.89×10^{10}	4.89×10^{11}	2.45×10^{12}	4.89×10^{12}
750	3.52×10^{8}	3.52×10^{8}	3.52×10^{10}	1.76×10^{11}	3.52×10^{11}
850	4.05×10^{7}	4.05×10^{8}	4.05×10^{9}	2.03×10^{10}	4.05×10^{10}
950	6.63×10^{6}	6.63×10^{7}	6.63×10^{8}	3.32×10^{9}	6.63×10^{9}

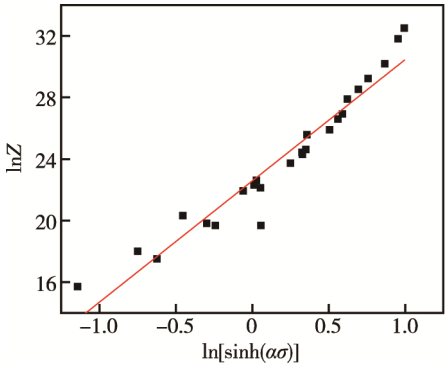


图 7 $\ln Z$-$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ 曲线

Fig.7 $\ln Z$-$\ln\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]$ curve

综上所述，通过线性回归方法可以求出材料的结构因子 $A=6.73\times109\ \mathrm{s}^{-1}$。可得到 Cu-$Al_2O_3$(0.68%)弥散强化铜合金的高温本构方程为 $\dot{\varepsilon}=6.73\times10^9[\sinh(0.0069\sigma)]^{8.45}\cdot\exp[-206.54/RT]$。

2.3 Cu–Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金热加工图的建立

动态材料学模型(DMM)基本原理认为，材料在塑性变形中可以看作是一个能量耗散体，外界输入的总能量 P 由材料塑性变形时所消耗的能量 G 和形变时因组织变化而散失的能量 J 组成，即：

$$P=\sigma\dot{\varepsilon}=G+J=\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma\mathrm{d}\dot{\varepsilon}+\int_0^{\sigma}\dot{\varepsilon}\mathrm{d}\sigma \tag{12}$$

其中 G 和 J 又可分别表示为：

$$G=\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma\mathrm{d}\dot{\varepsilon} \tag{13}$$

$$J=\int_0^{\sigma}\dot{\varepsilon}\mathrm{d}\sigma \tag{14}$$

G 和 J 的比例关系由材料的应变速率敏感因子 m 决定，m 定义为 J 和 G 的瞬间变化率，根据式(12)则有：

$$m=\frac{\partial J}{\partial G}=\frac{\dot{\varepsilon}\partial\sigma}{\sigma\partial\dot{\varepsilon}}=\left(\frac{\partial(\ln\sigma)}{\partial(\ln\dot{\varepsilon})}\right)_{T,\varepsilon} \tag{15}$$

通常认为，应变速率敏感因子 m 在一定变形温度和应变条件下为常数，但会随着变形温度和应变的变化呈非线性变化。当 m 为 1 时，认定材料处于理想线性功率耗散状态，此时耗散协量 J 达到最大值 J_{max}：

$$J=J_{\max}=\frac{P}{2}=\frac{\sigma\dot{\varepsilon}}{2} \tag{16}$$

功率耗散系数 η 为微观组织结构演化所耗散的能量与线性耗散能量的比值，是一个关于变形温度、应变速率以及应变量的三元变量。在恒定应变量的条件下，作变形温度和应变速率的关系图，即可得到材料的功率耗散图。

$$\eta=\frac{J}{J_{\max}}=\frac{2m}{m+1} \tag{17}$$

一般来说，功率耗散系数越高，表明材料加工性能越好，但是材料加工不稳定的局部区域也有可能具有比较高的能量耗散值[13]，因此，确定材料加工工艺参数，需要考虑加工不稳定区域的功率耗散值所带来的影响。Ziegler 在 DMM 模型理论中提出了加工失稳区判据[14]，见式(18)。

$$\xi(\dot{\varepsilon})=\frac{\partial\ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial\ln\dot{\varepsilon}}+m<0 \tag{18}$$

通过热压缩试验获得 Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金不同变形温度和应变速率下的流变应力值，可作出不同应变下的热加工图，即通过 3 次样条函数拟合 $\ln\sigma$ 与 $\ln\dot{\varepsilon}$ 的关系曲线，根据式(15)分别计算出各个变形温度条件下的应变速率敏感指数 m，然后再通过式(17)计算功率耗散系数 η，之后在 T-$\ln\dot{\varepsilon}$ 平面内绘制功率耗散系数 η 的等值轮廓曲线图，这样就可得到功率耗散图。

按式(18)的流变失稳判据，计算可得各个变形温度与应变速率下的 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 值，以变形温度和应变速率为变量作出能耗等值线图，非稳态流变处于 $\xi(\dot{\varepsilon})<0$ 的区域，该能耗等值线图称为流变失稳图[15]。流变失稳图直观地描述了材料在热加工过程中微观组织的不稳定区域。将功率耗散图和流变失稳图相互叠加得到该合金的热加工图。Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金变形量为 0.3 和 0.6 的热加工图见图 8，其中能量耗散率 η 值以等值线上的数值代表，流变失稳区以阴影部分表示，非阴影区域为稳态流变区。

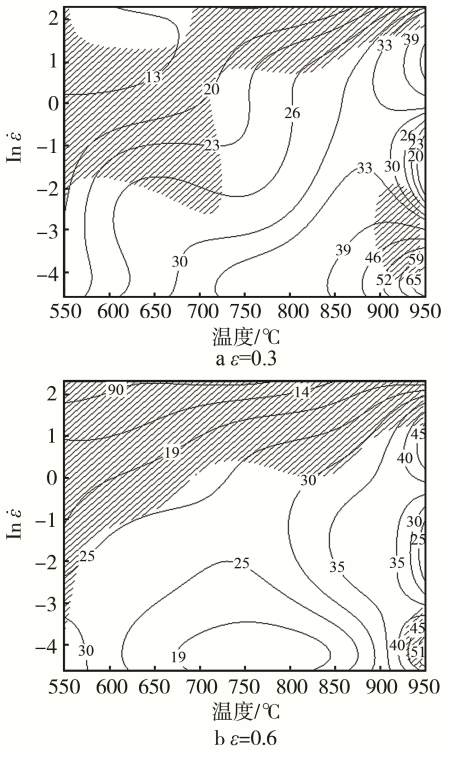


图 8 不同应变下 Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散铜合金热加工图

Fig.8 Thermal processing of Cu-Al_2O_3(0.68%) dispersion copper alloy under different strain

由图 8 可知，较高的变形温度及较低的应变速率时，功率消耗系数较高；热变形流变失稳区域均处于较低温、较高应变速率区域，即热加工图的左上部分，但是在高温低应变速率时，均存在小区域的高温塑变失稳区（图 8a 和图 8b 的右下角区域）。随着变形量的增加，失稳区面积逐渐扩大，逐步向高温区域扩展，且在高应变速率范围内集中分布，这是因为变形过程中产生的热量难以在较短变形时间内及时排出，导致流变失稳发生。在这些区域，功率耗散效率下降很快，表明相应热加工性能急剧恶化，因此 Cu-Al_2O_3(0.68%)合金应尽量避免这些区域进行热加工。由热加工图可知，应变量 0.3 时最佳变形区温度为 900 ~ 950 ℃，应变速率为 0.146 ~ 4.285 s^{-1}，该区域功率耗散效率达到 39%；应变 0.6 时最佳变形区温度为 900 ~ 950 ℃，应变速率为 0.193 ~ 2.808 s^{-1}，此区域功率耗散效率部分达到 45%。

3　结论

1) Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金高温压缩时，合金的热变形存在应变强化和稳态变形 2 个基本阶段。变形温度一定，应变速率增大时，峰值屈服应力随应变速率的增大而增加；应变速率保持不变，热变形温度增加，合金峰值应力降低。

2) 建立了 Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金流变应力本构方程：

$$\dot{\varepsilon} = 6.73\times10^{9}[\sinh(0.0069\sigma)]^{8.45}\cdot\exp[-206.54/RT]$$

3) 建立了 Cu-Al_2O_3(0.68%)弥散强化铜合金在应变为 0.3 和 0.6 时的热加工图，Cu-Al_2O_3(0.68%)合金在应变为 0.3 时，最佳变形区温度为 900 ~ 950 ℃，应变速率为 0.146 ~ 4.285 s^{-1}；应变为 0.6 时，最佳变形区温度为 900 ~ 950 ℃，应变速率为 0.193 ~ 2.808 s^{-1}。

参考文献：

[1] 袁孚胜, 钟海燕. 引线框架铜合金材料的研究现状及发展趋势[J]. 有色合金设计与研究, 2015, 36(2): 36—38.
YUAN Fu-sheng, ZHONG Hai-yan. Research Status and Development Trend of Lead Frame Copper Alloy Materials[J]. Design and Research of Nonferrous Alloys, 2015, 36(2): 36—38.

[2] 帅歌旺, 周平建, 刘建彬. 电阻焊电极的研究进展与发展趋势[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2015, 29(4): 59—62.
SHUAI Ge-wang, ZHOU Ping-jian, LIU Jian-bin. Research Progress and Trends in Resistance Spot Welding Electrode[J]. Journal of Materials Processing Technology A: Summary Articles, 2015, 29(4): 59—62.

[3] 帅歌旺, 张萌. 高强度高导电铜合金及铜基复合材料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(9): 534—537.
SHUAI Ge-wang, ZHANG Meng. Progress in High-strength and High-conductivity Copper Alloys and Copper Base Composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2005, 25(9): 534—537.

[4] 陈业高, 王力强, 尹建成, 等. Zn-10Al-2Cu 合金高温热压缩流变行为研究[J]. 材料导报, 2016(S1): 483—486.
CHEN Ye-gao, WANG Li-qiang, YIN Jian-cheng, et al. Flow Behavior of Zn-10Al-2Cu Alloy During Hot Compression at Elevated Temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology[J]. 2016(S1): 483—486.

[5] 李美霞, 郭志猛, 赵奇特. 氧化铝弥散强化铜的研究进展及其应用[J]. 粉末冶金工业, 2008, 18(1): 36—40.
LI Mei-xia, GUO Zhi-meng, ZHAO Qi-te. Progress in and Applications of Copper-base Alloys[J]. Powder Metallurgy Industry, 2008, 18(1): 36—40.

[6] AIKIN R M. The Mechanical Properties of In-situ Composites[J]. Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 1997, 49(8): 35—39.

[7] 周晓华, 柳瑞清. 高温下几种铜合金流动应力的研究[J]. 上海有色金属, 2003, 32(1): 21—23.
ZHOU Xiao-hua, LIU Rui-qing. High Temperature Flow Stresses of Several Copper Alloys[J]. Nonferrous Metals Processing, 2003, 32(1): 21—23.

[8] 杨斌, 张丽娜, 谢建新. 易切削 Cu-Se-Bi 合金的高温塑性变形行为[J]. 特种制造及有色合金, 2008, 28(3): 235—238.
YANG Bin, ZHANG Li-na, XIE Jian-xin. Hot Deformation Behavior of Free-cutting Cu-Se-Bi Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(3): 235—238.

[9] 何霞, 张彦敏, 宋克兴, 等. Cu-0.23Be-0.84Co 合金热变形行为[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(2): 105—110.
HE Xia, ZHANG Yan-min, SONG Ke-xing, et al. Cu-0.23Be-0.84Co Alloy Thermal Deformation Behavior[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(2): 105—110.

[10] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the Mechanism of Hot Deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9): 1136—1138.

[11] PUHCI E, STAIA M. High-temperature Deformation of Commercial-purity Aluminum[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1998, 29(9): 2345—2359.

[12] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22—32.

[13] 姜忠良, 吴严, 陈秀云, 等. 热处理细化 δ / γ 双相不锈钢晶粒的研究[J]. 材料工程, 2002(5): 30—33.
JIANG Zhong-liang, WU Yan, CHEN Xiu-yun, et al. Grain Refinement of δ/γ Duplex Stainless Steel by Heat Treatment[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(5): 30—33.

[14] CABRERA J M, MATEO A, LLANES L, et al. Hot Deformation of Duplex Stainless Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143(36): 32l—325.

[15] 李展志, 李慧中, 王海军, 等. 6069 铝合金的热变形行为和加工图[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(2): 155—161.
LI Zhan-zhi, LI Hui-zhong, WANG Hai-jun, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of 6069 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(2): 155—161.