

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.03.002

电刷材料 Ag-Pd-Cu-X 合金的热变行为分析

王 勇¹, 胡建旗¹, 徐永红², 章 应², 谈春林¹, 陈 蓉²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆川仪金属功能材料分公司, 重庆 400702)

摘 要:在变形温度 650~950 °C, 应变速率 0.001~0.1 s⁻¹ 的条件下, 采用 Gleeble-1500 热模拟实验机对 Ag-Pd-Cu-X 合金进行了热模拟压缩实验, 分析了合金微观组织及流变应力变化规律, 建立了合金的热变形本构方程。结果表明: 当变形温度由 650 °C 升高到 750 °C 以后, 合金的热变形软化机制由动态回复为主转向以动态再结晶为主, 流变应力呈现出明显的逐渐降低趋势。合金在变形温度 750~950 °C 的热变形激活能为 210.369 kJ/mol。利用所建立的本构方程计算得到的预测值与实验值吻合良好, 证明了所建立本构方程的正确性。

关键词: AP-2 合金; 热压缩变形; 流变应力; 热变形激活能; 本构方程

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)03-010-06

Study on hot compression deformation behavior of a brush alloy Ag-Pd-Cu-X

WANG Yong¹, HU Jianqi¹, XU Yonghong², ZHANG Ying², TAN Chunlin¹, CHEN Rong²

(1. School of Material Science and Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Chuanyi Metallic Functional Materials
Co., Ltd., Chongqing 400702, China)

Abstract: Hot compression deformation of Ag-Pd-Cu-X alloy is performed on Gleeble-1500 thermal simulator with strain rates of 0.001~0.1 s⁻¹ and temperature at 650~950 °C. Variations of flow stress and microstructure are investigated. The flow stress constitutive equation of Ag-Pd-Cu-X alloy is established. The results indicate that the dominant softening mechanism shift from dynamic recovery to the dynamic recrystallization with the compression temperature increases from 650 °C to 750 °C, the flow stress exhibits a gradual downward trend. While the alloy deforms at 750~950 °C, and the activation energy is 210.369 kJ/mol. The stress values predicted by the constitutive equation demonstrate well agreement with the experimental results.

Key words: AP-2 alloy; hot compression deformation; flow stress; deformation activation energy; constitutive equation

微型继电器、换向器和微型电位器中使用的电刷需要拥有低而稳定的接触电阻以保证电流能稳定而持续流通, 较高的硬度以满足弹性接点力学性能的需求, 较高的耐磨损性能以适应滑动电接触的工

作环境, 从而对电刷材料提出了较高的要求。AgPd 系列合金以其优良的电学性能、力学性能以及抗氧化、耐腐蚀性能被广泛用作微机电刷的工作层, 同时, 为了节约贵金属, 并保证电刷的弹性性质, AgPd

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAE06B06)

作者简介: 王勇(1968-), 男, 重庆大学副教授, 主要从事电接触材料、粉末冶金及金属生物材料等研究, (E-mail) yongwangcqu_1968@163.com。

工作层通常是复合在铜合金基带上使用^[1-4]。

传统的 AgPd 系合金只含有两种贵金属组元,其价格高昂,而且由于 Ag 与 Pd 无限互溶,没有过剩相析出,所以其强化手段有限。徐永红等^[5]开发出的新型 Ag-Pd-Cu-X 合金,在原有 AgPd50 合金的基础上,引入 Cu 等元素取代部分 Pd,一方面降低材料成本,另一方面利用合金元素的析出来获得沉淀强化效应,改善合金的耐磨性。该合金在微电机中已经取得良好的使用效果^[6]。

利用合金在高温外力作用下所遵循的本构关系研究合金的热变形行为是一种比较成熟和可靠的研究方法,被广泛应用于各类合金的热变形行为研究中^[7-10,13-20]。许灿辉等^[8]采用双曲正弦确定了 Ag-SnO₂ 复合材料的热变形激活能,建立了以 Zener-Hollomon 参数描述的高温塑性变形本构模型,该本构模型有良好的预测能力。Peng 等^[9]调用 Arrhenius 本构关系,通过线性回归与多项式拟合建立了变参数嵌入的 TC4-DT 合金流变应力关系,该本构关系能很好地拟合合金的流变应力变化过程。Wang 等^[20]建立了 Q235A 钢的本构关系,并对其动态再结晶过程进行了动力学探讨。在 Ag-Pd-Cu-X 合金的生产过程中,要经历多次热轧加工,而目前对该合金的热变形行为及其相关组织演化并无明确认识。因此笔者利用热模拟试验机对合金进行不同温度和不同变形速率的热压缩变形,建立本构关系,考察其热变形特性,为优化合金热加工工艺,改善合金性能提供理论指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

热模拟实验用 Ag-Pd-Cu-X 合金取自重庆川仪金属功能材料分公司,名义化学成分见表 1。材料经真空熔炼得到铸锭,去皮,均匀化退火后,锻造开坯,并轧制加工成 $\phi 10$ mm 的圆条。然后加工成 $\phi 10$ mm \times 12 mm 的圆柱型压缩试样。

表 1 Ag-Pd-Cu-X 合金的化学成分

质量分数	$w(\text{Ag})$	$w(\text{Pd})$	$w(\text{Cu})$	其他
含量	51	43	5	Bal.

1.2 热模拟实验

轴向压缩实验在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行,为了防止试样在加热过程中,热量向压头传递,压缩时在试样和压头之间垫放钼片以达到隔

热效果,并在试样和钼片之间均匀地涂覆一层润滑剂(石墨+机油),以避免出现腰鼓、侧翻等由于摩擦造成的不均匀变形现象。试样从室温以 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 的升温速率上升到变形温度(变形温度分别为: $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $950\text{ }^\circ\text{C}$),保温 1 min。再分别以 0.001 s^{-1} 、 0.01 s^{-1} 和 0.1 s^{-1} 的应变速率进行压缩变形,总变形量为 0.693(真应变)。压缩变形结束后,将试样迅速水冷至室温以保留高温变形组织。然后沿压缩轴向切开,对试样剖面进行金相组织观察。

2 实验结果和讨论

2.1 热变形后的显微组织

图 1 是合金变形后金相组织。

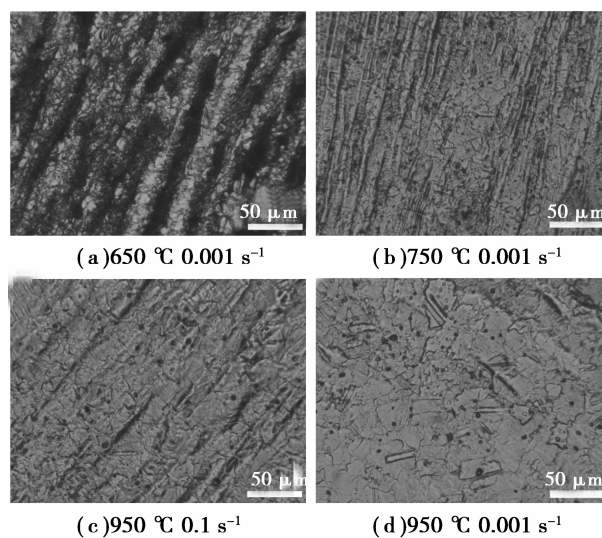


图 1 不同变形温度、应变速率条件下热压缩后的 AP-2 的金相组织

当合金在 $650\text{ }^\circ\text{C}$, 以 0.001 s^{-1} 进行压缩后,晶粒沿压缩方向被挤压变形而成为条状,此时,合金主要发生动态回复;其中黑色条纹组织主要是由于合金中富 Cu 相的析出造成的,具体原因笔者将另文讨论。相同变形速率下,当温度升高到 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 后,变形组织中出现尺寸稍大的再结晶晶粒,并可观察到晶粒内有孪晶存在,金属流变特征依然清晰可见。可见随着温度上升,合金在热变形过程更容易发生动态再结晶和生成孪晶亚结构^[8]。当变形温度达到 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 时(图 1(c)和(d)),在 0.1 s^{-1} 的应变速率下压缩后,可以观察到尺寸较大的再结晶晶粒。由于变形速率快,动态再结晶未能充分进行,所以金属流变痕迹还有残留;而在 0.001 s^{-1} 的应变速率下进行热压缩后,流变特征基本消失,而且由于再结晶晶粒有充分的时间长大,所以对比应变速率为 0.1 s^{-1} 时,

晶粒明显粗化,同时可以观察到大量孪晶。由此可见,在相同温度下,应变速率越低,动态再结晶进行得越充分,而且晶粒更容易长大,并产生大量孪晶组织。

2.2 真应力-真应变曲线

Ag-Pd-Cu-X 合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线如图 2 所示。

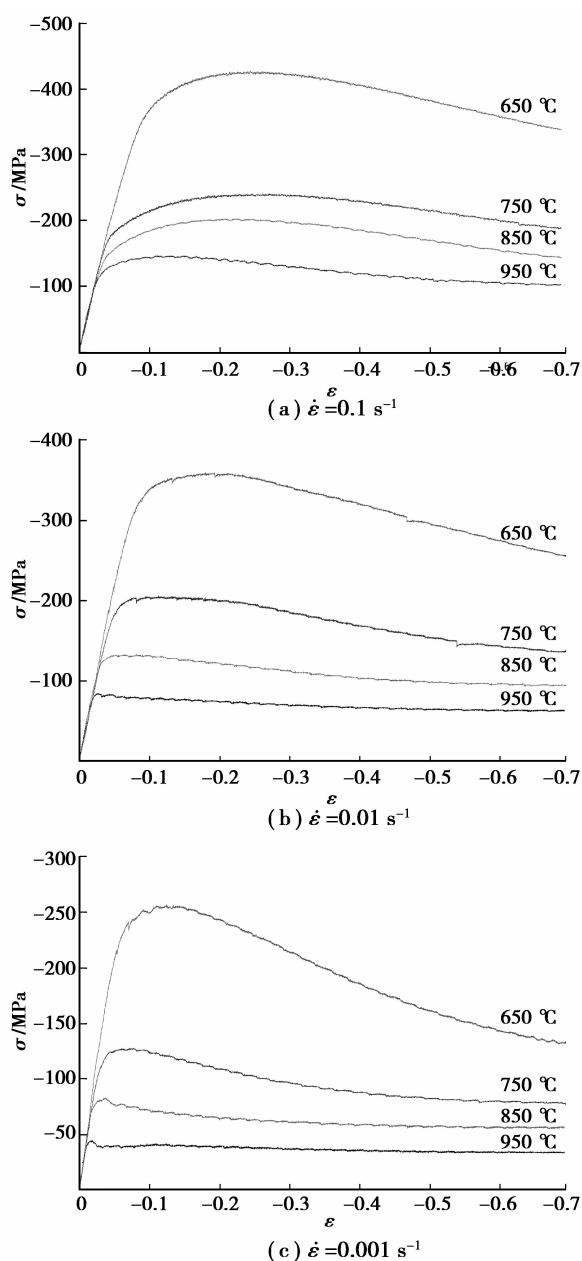


图 2 AP-2 合金真应力-真应变曲线

曲线整体呈现出较为明显的稳态流变特征。热压缩变形过程中合金的流变应力是由材料变形产生的应变硬化和动态回复及动态再结晶引起的软化效应之间互相“博弈”所共同决定的。在变形初期,即在弹性变形阶段,应力随应变的增加而急剧上升。当应力超过屈服强度之后,材料发生塑性变形。在

达到峰值应力之前,由于材料发生形变,产生大量位错和位错缠结,阻碍位错运动,增大变形阻力;虽然也发生动态回复和动态再结晶,但其软化效应不足以抵消应变硬化效果,所以应力仍然随应变增加而上升。到达峰值应力之后,加工硬化效应与动态回复、动态再结晶造成的软化作用之间达到平衡,应力逐渐下降并趋于平缓。

图 2 显示了 AP-2 合金在不同条件下的真应力-真应变曲线。对比分析图 2(a)、(b)和(c)可知,同一应变速率下,流变应力随变形温度的升高而降低;同一变形温度下,流变应力随应变速率的上升而增大;合金到达峰值应力所对应的应变变量也随着温度上升或应变速率的下降而减小。这是由于:变形温度升高一方面会造成原子热振动增强,导致原子间作用力减弱,变形阻力减小;另一方面高温能提供更多的能量和提高晶界的迁移率,从而使再结晶的形核和晶粒长大更容易进行,使其软化作用增强。应变速率越小则会让合金在热压缩变形过程中有充分的时间进行动态再结晶,也能使软化作用增强^[7-13],这从合金微观组织上也能得到证实(见图 1)。

2.3 本构方程的建立

热压缩变形过程中,合金的流变应力受变形温度和应变速率的影响。其热加工变形过程类似于高温蠕变,都受热激活控制。Sellars 和 Tegart 提出了一种包括变形激活能 Q 和温度 T 在内的双曲正弦形式修正的 Arrhenius 关系式,能较好地描述这种热激活稳态变形行为^[14-15]:

$$f(\sigma) = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sin \alpha \sigma]^n, \quad (1)$$

在低应力水平时,式(1)可化简为

$$f(\sigma) = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sin \alpha \sigma]^n = A_1 \sigma^{n'}, \quad (2)$$

在高应力水平时,式(1)可化简为

$$f(\sigma) = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sin \alpha \sigma]^n = A_2 \exp(\beta \sigma). \quad (3)$$

式中: $A, A_1, A_2, \alpha, \beta, n, n'$ 均为材料参数,且 $\alpha = \beta/n'$; R 为气体常数: $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度,单位 K; Q 为热变形激活能,它表示材料在高温塑性变形时,发生热运动的一个激活域值,反应材料热变形的难易程度,是表征材料热变形的重要参数,单位 J/mol。

Zener 和 Hollomon 提出并实验验证了应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 T 的关系可用温度补偿的变形速率因子 Zener-Hollomon (Z) 表示^[16-18]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right). \quad (4)$$

通常材料热压缩变形的流变应力模型可以通过联立式(1)(2)(3)(4)来描述。对式(1)(2)(3)的两边分别求对数,则有:

$$\ln \dot{\epsilon} = \frac{Q}{RT} = \ln A + n \ln[\sin h(\alpha\sigma)], \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n' \ln \sigma, \quad (6)$$

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + \beta\sigma. \quad (7)$$

由式(5)可知,当温度一定时:

$$n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sin h(\alpha\sigma)]} \right]_T. \quad (8)$$

当应变速率一定时:

$$\frac{Q}{Rn} = \left[\frac{\partial \ln[\sin h(\alpha\sigma)]}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_{\dot{\epsilon}} = b. \quad (9)$$

在一定的变形温度和变形速率下,对式(5)分别求 $\dot{\epsilon}$ 和 T 的偏微分,可以得到热变激活能

$$Q = R \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sin h(\alpha\sigma)]} \right]_T \cdot \left[\frac{\partial \ln[\sin h(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} = Rnb. \quad (10)$$

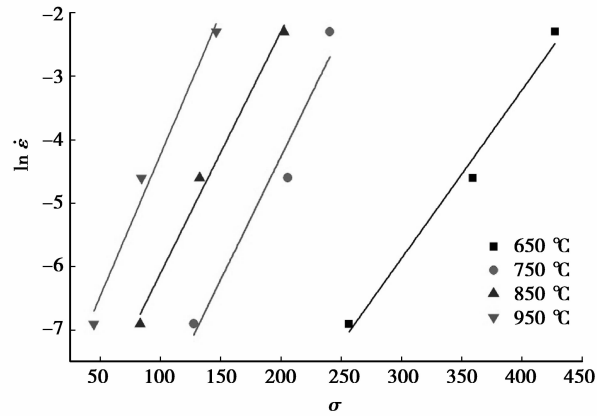
联立式(1)和式(4),可以得到 Arrhenius 关系的 Z 参数的关系为

$$\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}} = \sin h(\alpha\sigma). \quad (11)$$

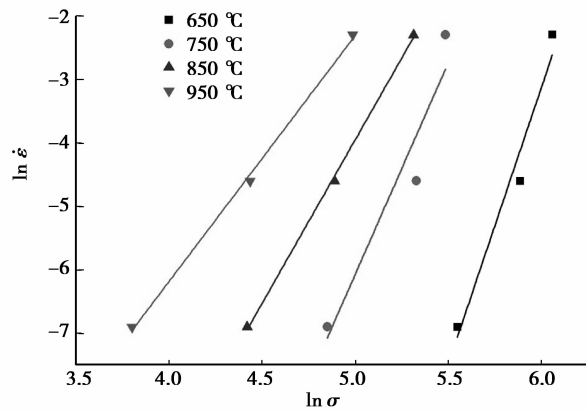
由式(11),合金在高温变形下的流变应力方程可以表达为

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (12)$$

根据式(6)(7),当温度恒定时, β 和 n' 分别为 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 的斜率。由于稳态流变应力受实验精度影响较大,且峰值应力与稳态流变应力通常呈相同变化趋势。故取 σ 为峰值应力 σ_p ,并进行线性回归,如图 3。从图 2 的真应力-真应变曲线可以看出,合金变形温度从 650 °C 升高到 750 °C 时,流变应力明显降低,而后随温度的升高降幅减小。结合显微组织分析可知,热变形温度从 650 °C 升高到 750 °C 以后,其软化机制从以动态回复为主转变为以动态再结晶为主。因此必然造成两个温度段的热变形激活能相差较大,采用相同的回归处理会导致较大的误差^[19]。同时考虑到实际生产中热加工便利的需要,该合金的热加工常在 750 °C 以上进行。这里取温度区间 750 °C ~ 950 °C 的实验结果,计算合金的本构方程。



(a) $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线

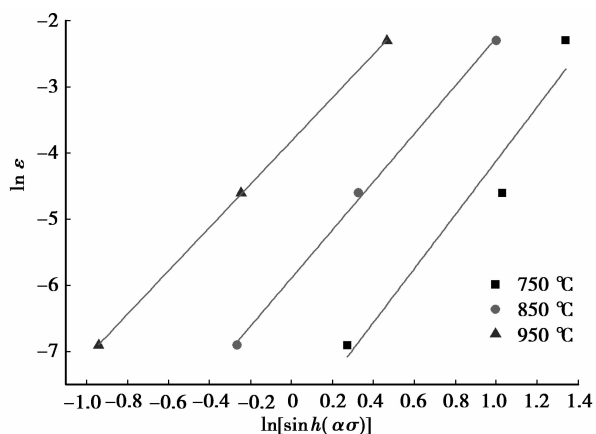


(b) $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线

图 3 合金应变速率和峰值应力的关系

取图 2(a)中变形温度为 750 °C 和 850 °C 两条直线斜率的均值,得 $\beta=0.038 48$;取图 2(b)中变形温度为 850 °C 和 950 °C 两条直线斜率的均值,得 $n'=4.518 33$;故 $\alpha=\beta/n'=0.008 52$ 。

由式(10), n 和 b 分别为曲线 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sin h(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln[\sin h(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 斜率。绘制曲线,并进行线性回归处理,如图 4。计算 n 、 b 的平均值,分别得到 $n=3.660 75$; $b=6.977 56$;将 n 、 b 的值代入式(10)中可以计算得到: $Q=212.366 \text{ kJ/mol}$ 。



(a) $\ln[\sin h(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线

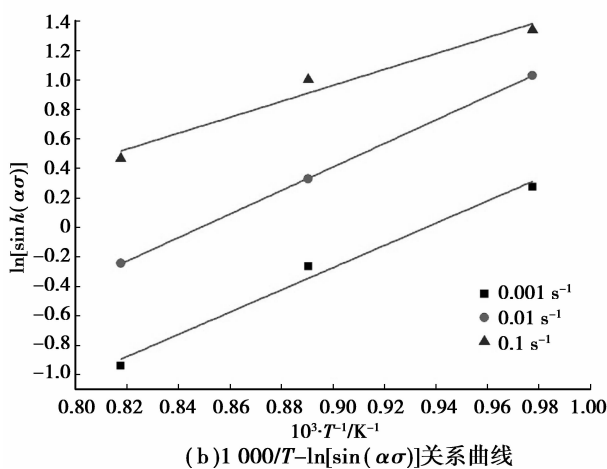
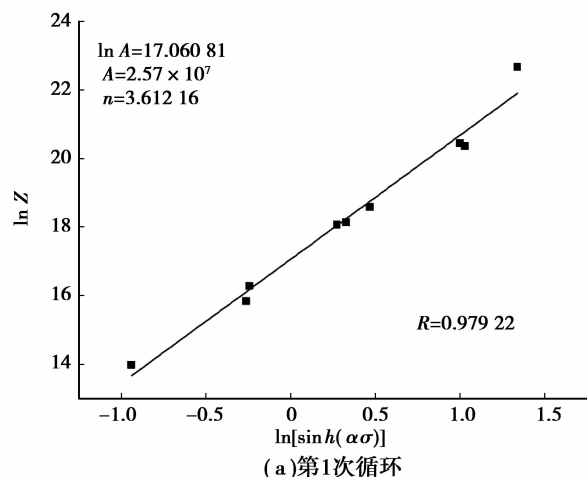


图 4 应变速率、变形温度与峰值应力之间的函数关系拟合曲线

为了令所建立的本构方程更加真实、可靠,对求得的材料参数进行修正。联立式(1)和式(4),并对两边取对数得到 $\ln Z$ 和 $\ln[\sin h(\alpha\sigma)]$ 的关系式:

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n \ln [\sin h(\alpha\sigma)]. \quad (13)$$

将热变激活能 Q 和峰值应力 σ_p 代入式(13),作 $\ln Z - \ln[\sin h(\alpha\sigma)]$ 曲线,并进行线性回归处理,可以得到更加准确的 n 值。如图 5(a),呈现出良好的线性相关性,其直线截距 $\ln A = 17.06081$, 则 $A = 2.57 \times 10^7$; 直线斜率 $n = 3.61216$ 。将此 n 值代入 $\alpha = \beta/n$, 可以求得新的 α 值,再按照前面的步骤又可以求出新的 n, Q 和 A 值。如此循环计算,求得的材料常数更为可靠^[18]。经过 5 次循环后,其线性相关性得到显著提高,图 5(b)为第 5 次循环后 $\ln Z$ 和 $\ln[\sin h(\alpha\sigma)]$ 的线性关系,其相关系数已达到 0.9858,证明采用 Arrhenius 关系的 Z 参数能够很好地描述该合金在高温热压缩时的流变应力。5 次循环求得的材料常数 α, n, Q 和 A 值分别列于表 2。



(a)第1次循环

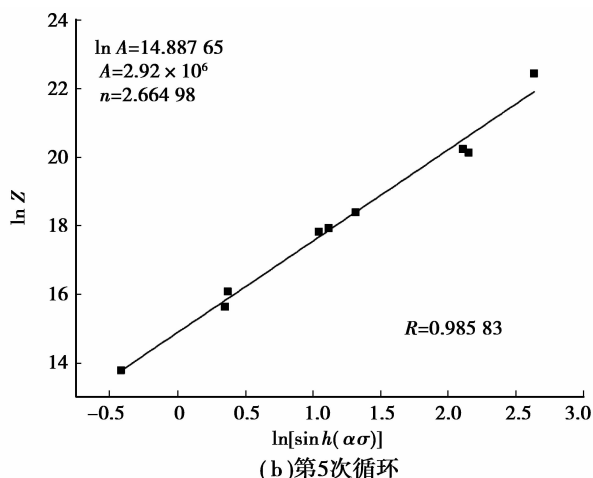


图 5 不同循环次数 $\ln Z$ 和 $\ln[\sin h(\alpha\sigma)]$ 的关系曲线

表 2 5 次循环计算的材料常数值

循环次数	材料常数			
	α	n	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$	A
1	0.00852	3.61216	212.366	2.57×10^7
2	0.01065	3.19313	211.238	8.36×10^6
3	0.01205	2.94528	210.766	4.90×10^6
4	0.01306	2.78147	210.519	3.58×10^6
5	0.01383	2.66498	210.369	2.92×10^6

将修正后的热力学参数代入式(12),则可以得到 Ag-Pd-Cu-X 合金热变形流变应力的本构方程:

$$\sigma = \frac{1}{0.01383} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{2.92 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{2.66498}} + \left[\left(\frac{Z}{2.92 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{2.66498}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\},$$

$$\text{其中 } z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{2.1 \times 10^5}{RT}\right). \quad (14)$$

为了检验式(14)稳态流变应力本构方程的准确性,将不同变形条件下峰值应力的计算值和实验测量值作对比分析,如图 6。

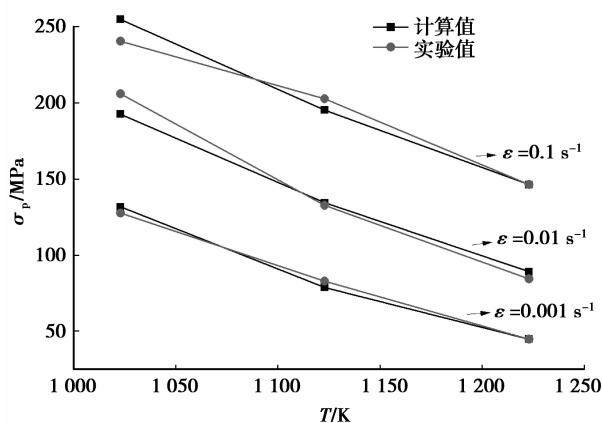


图 6 不同变形条件下峰值应力的计算值与实验数据值比较

可以看出计算得到的峰值应力和实验数据吻合良好,其最大相对误差仅为 5.9%,说明所建立的 Ag-Pd-Cu-X 合金的热变形本构方程对本实验条件下合金的流变应力具有很好的预测能力,可以为 Ag-Pd-Cu-X 合金热加工工艺的制定提供理论依据。

4 结 论

1) Ag-Pd-Cu-X 合金的热压缩过程呈较为明显的稳态流变特征。同一应变速率下,流变应力随变形温度的升高而降低;同一变形温度下,流变应力随应变速率的上升而增大。合金热变形温度从 650 °C 升高到 750 °C 以后,其软化机制从以动态回复为主转变为以动态再结晶为主,流变应力呈现出明显的逐渐降低趋势。变形温度越高,应变速率越低,合金越容易发生动态再结晶和生成孪晶亚结构。

2) 在变形温度 750 °C ~ 950 °C,应变速率为 0.1 s⁻¹、0.01 s⁻¹ 和 0.001 s⁻¹ 的压缩变形条件下,采用包含 Arrhenius 关系和 Z 参数的双曲正弦函数可以很好地描述 Ag-Pd-Cu-X 合金高温压缩变形时的流变应力行为,计算得到该条件下热变形激活为 210.369 kJ/mol,并建立了其流变应力本构方程。

参考文献:

[1] 李银娥,马光,王轶,等. 钯银铜金铂合金的研究[J]. 稀有金属,2006,30(Sup2):28-30.
LI Yine, MA Guang, WANG Yi, et al. Study on Pd-Ag-Cu-Au-Pt alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006,30(Sup2):28-30.

[2] Zhang Y, Liu P, Tian B H, et al. Hot deformation behavior and processing map of Cu-Ni-Si-P alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013,23(8):2341-2347.

[3] 范金铎,李勇军,吕保国,等. 新型弱电触点材料:微异型复合触点带[J]. 机电元件,2001,21(3):21-26.
FAN Jinduo, LI Yongjun, LÜ Baoguo, et al. New type of clad contact material-micro-contact profile [J]. Electromechanical Component, 2001,21(3):21-26.

[4] 杨贤军,刘安利,赵明华,等. AgPd/BZn 复合材料贵金属表面控制技术[J]. 微特电机,2011,39(10):73-75.
YANG Xianjun, LIU Aanli, ZHAO Minghua, et al. Surface control technique for precious metals in AgPd / BZn - based composites [J]. Small & Special Electrical Machines, 2011,39(10):73-75.

[5] 徐永红,匡纲要,章应,等. 具有高耐磨性的钯银系电接触材料[P]. 中国:2011100923855,2011-04-13.

[6] 匡纲要,徐永红,王勇. 新型电刷材料 AP-2 的应用研究[J]. 微电机,2013,46(2):71-75.
KUANG Gangyao, XU Yonhhong, WANG Yong. Practical study of novel AP-2 alloy used for brush [J]. micromotors, 2013,46(2):71-75.

[7] Ca J R, Liu Z D, Cheng S C, et al. Constitutive equation models of hot - compressed T 122 heat resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(6):53-58.

[8] 许灿辉,易丹青,曹适意,等. Ag-SnO₂ 复合材料的热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, (9): 2091-2098.
XU Canhui, YI Danqing, CAO Shiyi, et al. Hot compression behavior of Ag - SnO₂ composite material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011(9):2091-2098.

[9] Peng X N, Guo H Z, Shi Z G, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of TC4-DT alloy incorporating strain, strain rate and temperature[J]. Materials and Design, 2013, 50: 198-206.

[10] He A, Chen L, Hu S, et al. Constitutive analysis to predict high temperature flow stress in 20CrMo continuous casting billet [J]. Materials and Design, 2013,46:54-60.

[11] 范永革,汪凌云,黄光胜,等. 变形镁合金高温变形流变应力分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2003,26(2):9-11.
FAN Yongge, WANG Lingyun, HUANG Guangsheng, et al. Analysis of flow stress of AZ 31 B wrought magnesium at elevated temperatures [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(2):9-11.

[12] 黄光杰,程虎. 3104 铝合金流变应力行为[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(1):70-72.
HUANG Guangjie, CHENG Hu. Flow stress behavior of 3104 aluminum alloy [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007,30(1):70-72.

[13] 余琨,蔡志勇,王晓艳,等. 热轧 AZ31 镁合金板材高温塑性变形行为[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010, 41(5):1749-1755.
YU Kun, CAI Zhiyong, WANG Xiaoyan, et al. Hot plastic deformation of hot - rolled AZ 31 Mg alloy plane[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010,41(5):1749-1755.

911-925.

- [7] 石国春. 关于序列二次规划(SQP)算法求解非线性规划问题的研究[D]. 兰州:兰州大学硕士学位论文, 2009.
- [8] 江爱朋, 邵之江, 方学毅, 等. 基于有限存储的简约空间序列二次规划算法研究[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(5):108-114.
JIANG Aipeng, SHAO Zhijiang, FANG Xueyi, et al. Study on reduced space SQP algorithm based on limited memory method [J]. Journal of Circuits and System, 2007, 12(5):108-114.
- [9] Zienkiewicz O C, Cambell J C. Shape optimization and Sequential linear programming in optimum structural design [M]. New York: Tohn Wiley, 1973.
- [10] 汪学阳, 王华君, 王华昌, 等. 基于 FEM 的热锻模磨损分析与寿命预测[J]. 润滑与密封, 2008, 33(5):49-53.
WANG Xueyang, WANG Huajun, WANG Huachang, et al. Prediction of hot forging die service life based on finite element method [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(5):49-53.
- [11] Wahl R, Schneider J, Gumbsch P. Influence of the real geometry of the protrusions in micro textured surfaces on frictional behavior [J]. Tribology Letters, 2012, 47(3):447-453.
- [12] 赵一平. 提高热锻模生产中的模具使用寿命[J]. 锻压技术, 2000, 25(6):43-47.
ZHAO Yiping. Increasing service life of die for hot die forging [J]. Forging & Stamping Technology, 2000, 25(6):43-47.
- [13] 邹琳, 夏巨谔, 胡国安. 挤压模具型腔轮廓曲线优化拟合分析[J]. 锻压技术, 2002, 27(6):51-54.
ZOU Lin, XIA Juzhan, HU Guoan. Die profile optimization in extrusion processes [J]. Forging & Stamping Technology, 2002, 27(6):51-54.
- [14] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1/2/3): 43-48.
- [15] Cláudio R, Sliva A D, Pintaude G. Uncertainty analysis on the wear coefficient of Archard model [J]. Tribology International, 2008, 41(6):473-481.
- [16] Abachi S, Akkok M, Gokler M I. Wear analysis of hot forging dies [J]. Tribology International, 2010, 43(1/2):467-473.

(编辑 张 苹)

(上接第 15 页)

- [14] 刘勇, 孙永伟, 田宝红, 等. 20% Mo/Cu-Al₂O₃ 复合材料的强化机理及热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3):750-755.
LIU Yong, SUN Yongwei, TIAN Baohong, et al. Strengthening mechanism and hot deformation behavior of 20% Mo/Cu-Al₂O₃ composite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3):750-755.
- [15] Zhang L, Xue S B, Gao L L, et al. Creep behavior of SnAgCu solders with rare earth Ce doping [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 20(3):412-417.
- [16] Cai J, Li F G, Liu T Y, et al. Constitutive equations for elevated temperature flow stress of Ti-6Al-4V alloy considering the effect of strain [J]. Materials & Design, 2011, 32(3):1144-1151.
- [17] Wu B, Li M Q, Ma D W. The flow behavior and constitutive equations in isothermal compression of 7050 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 542:79-87.
- [18] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon the plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Geophysics, 1944, 15(1):22-32.
- [19] Xu L, Dai G Z, Huang X M. Foundation and application of Al-Zn-Mg-Cu alloy flow stress constitutive equation in friction screw press die forging. [J]. Materials and Design 2013, 47:465-472.
- [20] Wang J, Xiao H, Xie H B, et al. Study on hot deformation behavior of carbon structural steel with flow stress [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012(539):294-300.

(编辑 张 苹)