

半固态 CuSn10P1 合金中温压缩流变应力曲线修正及组织演变

刘章兴¹ 周荣锋^{1,2} 熊文韬¹ 何子龙¹ 刘 涛¹ 李永坤²
(1.昆明理工大学材料科学与工程学院; 2.昆明理工大学城市学院)

摘 要 对半固态 CuSn10P1 合金进行中温单向压缩变形行为研究,分析合金在温度为 350、410 ℃,应变速率为 0.1~10 s⁻¹时温升效应对应力-应变曲线的影响,将试验数据进行温度修正后建立真应力-真应变曲线。结果表明,高应变速率变形条件下温升效应对流变应力影响显著。对 350 ℃、应变速率为 10 s⁻¹的合金变形行为进行应变分布模拟与组织演变观察,在压缩变形过程中试样中心区域为最易变形区且晶粒内产生大量变形孪晶,孪晶数量随应变量的增大明显增多。

关键词 半固态;中温压缩;温度修正

中图分类号 TG146.1⁺1;TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.016 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Correction of Flow Stress Curve and Microstructure Evolution of Semi-solid CuSn10P1 Alloy under Mesothermal Compression

Liu Zhangxing¹, Zhou Rongfeng^{1,2}, Xiong Wentao¹, He Zilong¹, Liu Tao¹, Li Yongkun²
(1.Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology;
2.City College, Kunming University of Science and Technology)

Abstract: The uniaxial compression deformation behavior of semi-solid CuSn10P1 alloy at medium temperature was investigated. The influence of temperature rise effect on the stress-strain curve of the alloy at 350 ℃ and 410 ℃ and strain rates of 0.1~10 s⁻¹ was analyzed. The true stress-strain curve was established after the temperature correction of the experimental data. The results reveal that the temperature rise effect has a significant effect on the flow stress in condition of high strain rate deformation. The strain distribution simulation and microstructure evolution observation were carried out on the deformation behavior of the alloy at 350 ℃ and strain rate of 10 s⁻¹. During the compression deformation, the central region of the specimen is the most deformable and a large number of deformation twins are generated in the grain, of which the number is increased significantly with the increase of strain.

Key Words: Semi-solid, Medium Temperature Compression, Temperature Correction

锡青铜因铸造收缩率小而被广泛用于生产形状复杂、轮廓清晰、气密性要求低的铸件^[1~3]。Sn 含量低于 5% (质量分数,下同)的铜锡合金,具有良好的加工性能,广泛应用于电连接器中^[4]。Sn 含量接近 10% 的 Cu-Sn 合金在平衡冷却过程中避免形成硬脆 δ-Cu₄₁Sn₁₁ 相的上限^[5]。Sn 含量为 10% 的铜锡合金具有高强度和高延展性以及在高盐水中的高耐腐蚀性,因而广泛应用于航空和机械制造行业,如船用零件和高精度轴承^[6,7]。

由于高性能机械零件的生产往往需要在不同温度

进行塑性加工,因此研究 Cu-Sn 合金的中温压缩变形行为和组织演变具有重要意义。HUI J 等^[8]在不同温度范围内对铸造 Cu-Sn 合金进行了高温等温压缩试验,发现铜合金的变形机制主要包括滑移和孪晶。WANG Q P 等^[9]在 450 ℃和 0.01~1 s⁻¹的给定应变速率下,对半固态 CuSn10P1 合金进行热压缩试验,发现其再结晶机制以亚晶合并旋转的连续动态再结晶机制为主。然而,关于热压缩方面的工作往往忽略变形过程温升效应。在热压缩测试试验中,设备对动态温度的收集与处理存在滞后性,不能实时控制试样温度,导致试

收稿日期:2021-07-12;修改稿收到日期:2021-08-08
第一作者简介:刘章兴,男,1994 年出生,硕士研究生,昆明(650093),E-mail:1173121158@qq.com
通信作者:周荣锋,男,1969 年出生,教授,昆明(650093),E-mail:zhoufchina@hotmail.com
引用格式:刘章兴,周荣锋,熊文韬,等.半固态 CuSn10P1 合金中温压缩流变应力曲线修正及组织演变[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 529-1 532.
LIU Z X, ZHOU R F, XIONG W T, et al. Correction of flow stress curve and microstructure evolution of semi-solid CuSn10P1 alloy under mesothermal compression[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 529-1 532.

验采集数据与实际数据存在偏差。因此,不可忽略温升效应对热压缩流变应力的影响。李昌民等^[10]根据高流变应力 Arrhenius 型的本构关系,估算了温变对 Inconel 718 高温合金流变应力的补偿;尚丽梅等^[11]采用 Newton 插值多项式的计算方法求 Maraging250 钢热变形各温度对应的应力值,对流变应力进行温度修正。本课题对半固态 CuSn10P1 合金进行单向等温恒定应变速率压缩试验,分析合金中温变形过程中升温效应对流变应力-应变曲线的影响以及显微组织的演变规律,以期对相关中温加工工艺的制定提供参考。

1 试验材料及工艺

采用熔体约束流动诱导形核通道法^[12]制备半固态 CuSn10P1 合金,待金属液基本凝固后进行水淬,其具体化学成分(质量分数)为 10.22% 的 Sn、0.71% 的 P、0.17% 的其他元素组成,余量为 Cu。图 1 为原始半固态 CuSn10P1 合金的显微组织。可以看出,初始组织由近球状晶结构组成,晶间组织($\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$)相分布在球状初生 Cu 相间隙中。

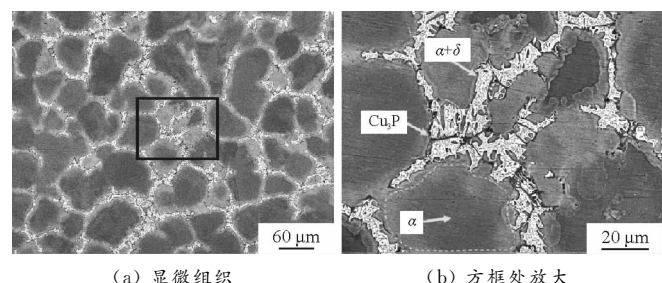


图 1 半固态 CuSn10P1 合金原始显微组织

Fig.1 Original microstructure of semi-solid CuSn10P1 alloy

将制备的半固态 CuSn10P1 合金材料加工成尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 试样,使用 Gleeble-1500D 热模拟试验机进行单向等温压缩试验。试验工艺见图 2,以 50°C/s 将试样分别加热至 $350\sim 440^\circ\text{C}$ 下保温 30 s,并以 $0.1, 1, 5$ 和 10 s^{-1} 的应变速率压缩致真应变 $\epsilon=0.6$,压缩结束立即进行水淬处理,以保持变形的高温显微结构。中温压缩试验完成后,沿试样纵向剖开,采用 5% 的 FeCl_3 水溶液进行金相腐蚀。在试验中使用 SEM 观察不同应变量条件下的显微组织形貌,观测位置见图 3。

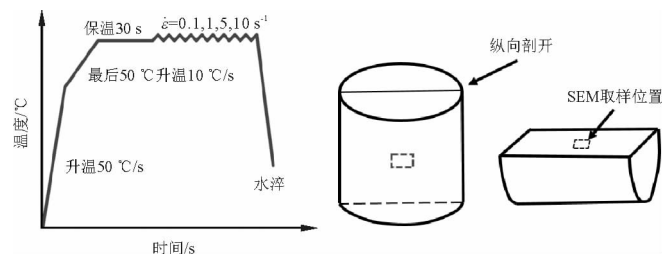


图 2 热压变形工艺
Fig.2 Hot pressing deformation process

图 3 显微组织观测位置示意图
Fig.3 Diagram of microstructure observation position

为了表征组织的演变过程,将 350°C 、应变速率为 10 s^{-1} 的试验应力-应变曲线导入 Deform-3D 软件,模拟压缩过程获得不同应变下的应变分布。

2 试验结果及分析

2.1 压缩过程应力-应变曲线的修正方法

进行热压缩试验时,只有试样均匀变形压缩后试样中部才无鼓肚现象,采集的变形抗力才能反映试样塑性变形的整体情况。但是现实中压缩试样腰部出现鼓肚现象,因此为了衡量压缩数据的有效性,提出鼓胀系数 B ^[13],即:

$$B = \frac{L_0 d_0^2}{L_f d_f^2} \quad (1)$$

式中, B 为鼓胀系数; L_0, d_0 分别为原始试样的高度和直径; L_f, d_f 分别为变形后试样的高度和平均直径。

有研究认为,当 $B \geq 0.9$ 时,压缩试验数据是有效的,反之则对数据予以修正^[14]。变形后试样的鼓胀系数均大于 0.9,因此此次试验数据有效,不需要进行修正。

试样在热压缩试验中由于热效应从而导致局部温度升高,为了减少温度对应力数值的影响,需对试验数据进行温度修正,温度变化值 ΔT ^[15] 可取为:

$$\Delta T = \frac{0.95 \delta \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon}{\rho c} \quad (2)$$

式中, ΔT 为温度变化值, $^\circ\text{C}$; ρ 为密度, g/cm^3 , CuSn10P1 合金取 8.9 g/cm^3 ; c 为比热容, $\text{J/(g} \cdot \text{K)}$, CuSn10P1 合金取 $0.39 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$; 0.95 为机械能转化成热能效率; δ 为绝热校正系数,真应变 ϵ 为 0.1、1、5、10 时分别取 0.5、0.75、0.845、1。

应力、应变速率及温度关系如下^[16]:

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A \exp(\beta \sigma) \quad (3)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; R 为气体常数; Q 为变形激活能; A 和 β 为常数。

对式(3)两边取对数:

$$\sigma = \frac{Q}{R\beta} \frac{1}{T} + \frac{\ln \dot{\epsilon} - \ln A}{\beta} \quad (4)$$

假设 T_0 为试验设定变形温度; T_1 为试验实时温度, $\Delta T = T_1 - T_0$; T_m 为熔点; σ_0 为变形温度为 T_0 时的应力; σ_1 为实际测量接收的应力, σ_m 为温度 T_m 时的应力,可得:

$$\frac{\sigma_0 - \sigma_m}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_m}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m}} = \frac{T_1}{T_0} \rightarrow \sigma_0 = \frac{T_1}{T_0} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_m - T_1}\right) \sigma_1 \quad (5)$$

式中, ΔT 值与 $T_m - T_1$ 的值相比, ΔT 相对比较小, 因此在熔点值难以测量条件下, 可采用如下公式近似估算温度对流变应力的影响:

$$\sigma_0 \approx \frac{T_1}{T_0} \sigma_1 \tag{6}$$

2.2 修正结果

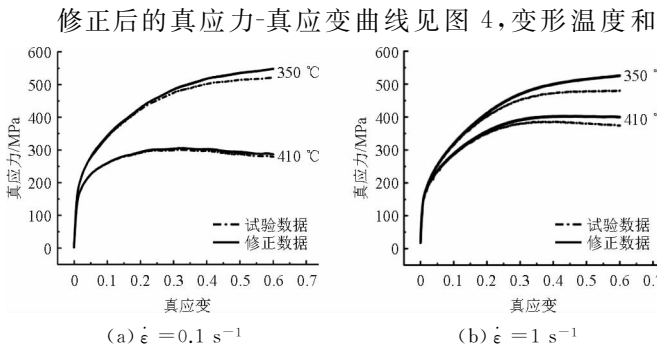


图 4 不同应变速率下半固态 CuSn10P1 合金的真应力-真应变曲线及其修正
Fig.4 The true stress-strain curves of semi-solid CuSn10P1 alloy at different strain rates and its modification

热效应^[17], 使得修正曲线位于原始测试曲线之上。

2.3 数值模拟结果与分析

图 5 分别为半固态 CuSn10P1 合金在 350 °C, 应变速率为 10 s^{-1} , 不同变形程度时的应变分布云图。可以看出, 试样中心应变程度最大, 中心区域为最易变形区, 随着变形程度的增加中心处应变程度明显增大。试样

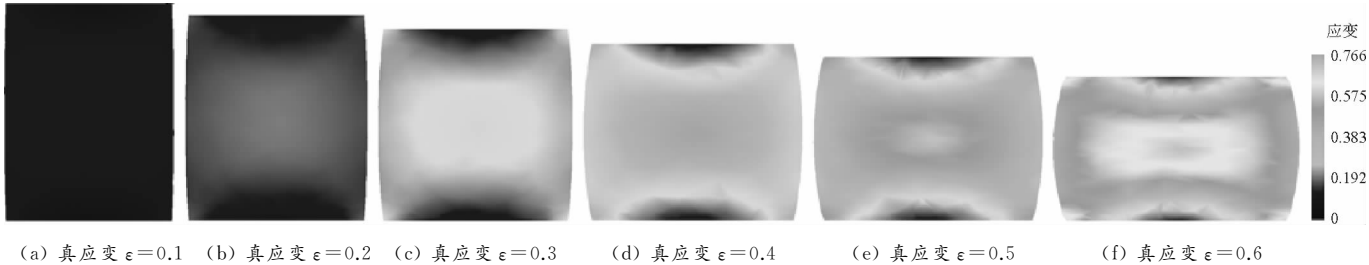


图 5 半固态 CuSn10P1 合金铜在不同程度压缩变形时的应变分布云图
Fig.5 The strain distribution nephogram of semi-solid CuSn10P1 alloy under compression deformation to different degrees

方向单一且变形程度大, 故试样组织观察部位选定中心易变形区域。

应变速率一定时, 经修正后的曲线与原始曲线之间的距离随应变速率的增加或变形温度的下降而增大(见图 4 中修正曲线对应的流变应力差值, 该值为试验值与修正值之差的绝对值), 表明应变速率增加, 温升效应对流变应力的影响程度随之增加。修正曲线均在原始测试曲线上方, 这可能是由于材料在高应变速率下易发生绝热剪切、塑性流动失稳等现象, 从而材料产生较大的变形

的上端与下端部位在变形过程中应变程度最小, 为刚性区, 随着应变量的增加刚性区面积明显缩小但却一直存在。试样的左端与右端部位为难变形区, 应变程度介于刚性区与最易变形区之间。由于鼓肚效应, 难变形区组织在变形过程中主要受切应力作用, 而中心易变形区组织在变形过程中主要受单向压应力作用, 中心组织受力

2.4 热变形组织的演化及分析

图 6 和图 7 为半固态 CuSn10P1 合金试样在 350

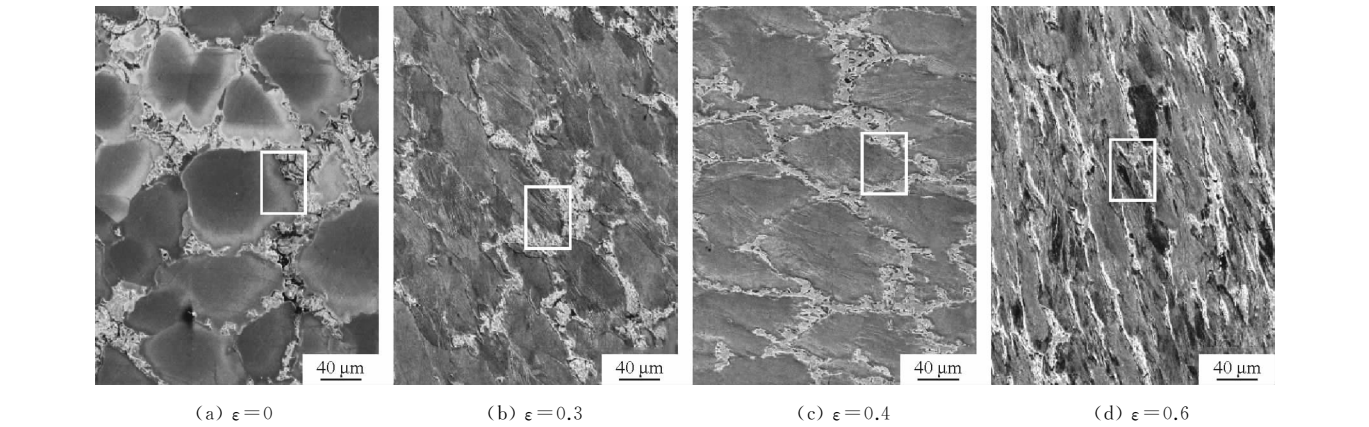
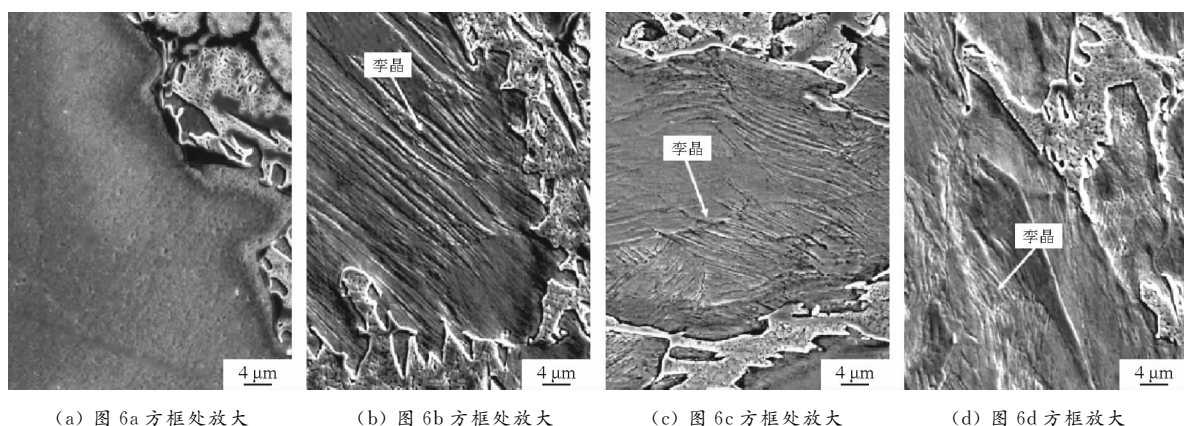


图 6 半固态 CuSn10P1 合金在 350 °C、 10 s^{-1} 变形条件下不同应变时的显微组织
Fig.6 Microstructure of semi-solid CuSn10P1 alloy deformed at 350 °C for 10 s^{-1} under different strains



(a) 图 6a 方框处放大

(b) 图 6b 方框处放大

(c) 图 6c 方框处放大

(d) 图 6d 方框处放大

图 7 半固态 CuSn10P1 合金在 350 °C、10 s⁻¹ 变形条件下不同应变下的组织放大图Fig.7 Microstructure of semi-solid CuSn10P1 alloy deformed at 350 °C for 10 s⁻¹ under different strains (enlarge)

℃、10 s⁻¹ 不同真应变下的热压缩显微组织。未变形时,晶粒为近球状结构且基体中并未发现孪晶组织;当真应变为 0.3 时晶粒呈椭球结构,由于压缩变形过程中滑移在晶界受阻而产生孪晶组织,孪晶平行向晶粒内扩;当真应变为 0.4 时,孪晶扭折程度增大并产生交叉孪晶;当真应变为 0.6 时,晶粒严重变形为扁平结构,孪晶扭折程度增大并产生大量交叉孪晶。由于未变形晶粒中未出现孪晶,随着应变量的增加,晶粒内孪晶数量明显增加并产生交叉,表明孪晶由变形产生,属于变形孪晶而非退火孪晶。在变形过程中孪晶界因其独特的共格界面关系起到非常重要的强化作用,在形变过程中高密度的孪晶界面能够有效阻碍位错滑移^[18],使位错滑移难以穿过孪晶界,使材料强度和塑性同步提高。

3 结 论

(1)半固态 CuSn10P1 合金在中温压缩变形过程中流变应力受温升效应影响,在一定的变形温度下,温升效应随应变速率的升高而增大。在低温高应变速率条件下变形,温升效应对流变应力影响显著。

(2)由应变云图可知,单向压缩 CuSn10P1 合金试样内部组织中心区域为最易变形区,最易变形区的面积与变形程度随应变程度的增加而增大。

(3)随应变程度的增加,晶粒由近球状组织向扁平状结构演变,晶粒内产生大量变形孪晶,随应变量的增加,晶粒内孪晶数量明显增加。

参 考 文 献

- [1] TURHAN H. Adhesive wear resistance of Cu-Sn-Zn-Pb bronze with additions of Fe, Mn and P[J]. Materials Letters, 2005, 59(12): 1 463-1 469.
- [2] FIGUEIREDO J C D, LINS V D C, DE B V M. Surface characterization of a corroded bronze-leaded alloy in a salt spray cabinet[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(17): 7 104-7 107.
- [3] 张好强,赵頔,李勇帅,等.大型套筒类锡青铜铸件的离心铸造[J].特种铸造及有色合金,2018,38(6): 642-645.
- [4] WALSH F C, LOWC T J. A review of developments in the electro-

- deposition of tin[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 288: 79-94.
- [5] FÜRSTAUER S, LI D, CUPID D, et al. The Cu-Sn phase diagram, Part I: New experimental results[J]. Intermetallics, 2013, 34: 142-147.
- [6] ŠATOVIĆ D, DESNICA V, FAZINIĆ S, et al. Studies of bronze corrosion phenomena by EBS and complementary techniques[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, 2019, B461: 154-158.
- [7] SCUDINO S, UNTERDOERFER C, PRASHANTH K, et al. Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze[J]. Materials Letters, 2015, 156(10): 202-204.
- [8] HUI J, FENG Z X, FAN W X, et al. Microstructures and mechanical properties of Cu-Sn alloy subjected to elevated-temperature heat deformation[J]. Materials Research Express, 2018, 5(4): 046 511.
- [9] WANG Q P, ZHOU R F, LI Y K, et al. Characteristics of dynamic recrystallization in semi-solid CuSn10P1 alloy during hot deformation[J]. Materials Characterization, 2019, 159: 109 996.
- [10] 李昌民,谭元标,赵飞.Inconel 718 高温合金流变曲线修正及热加工图[J].稀有金属,2020,44(6): 585-596.
- [11] 尚丽梅,王春旭,韩顺,等.基于摩擦-温度双修正的 Maraging250 钢热变形行为及热加工图[J].金属热处理,2021,46(5): 111-117.
- [12] LI Y K, LI L, GENG B Y, et al. Microstructure characteristics and strengthening mechanism of semisolid CuSn10P1 alloys-ScienceDirect[J]. Materials Characterization, 2021,172: 1-11.
- [13] ROEBUCK B, LORD J D, BROOKS M, et al. Measurement of flow stress in hot axisymmetric compression tests[J]. Mater. High Temp., 2006, 23(2): 59-83.
- [14] 赵俊伟.大型支承辊锻件锻造工艺与模拟技术研究[D].河南洛阳:河南科技大学,2009.
- [15] 刘鑫刚,詹亮亮,张楠,等.AF1410 高强度钢热变形行为研究[J].塑性工程学报,2018,23(2): 115-120.
- [16] 彭宁琦,唐广波,刘正东.热压缩流变应力曲线的修正方法[J].热加工工艺,2012,41(17): 12-15.
- [17] 何坤,傅定发,高文理.5083 铝合金的高温压缩变形行为[J].热加工工艺,2019,48(17): 23-26.
- [18] YANG C, SONG N, LIAO X Z, et al. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation[J]. Materials Science and Engineering, 2018, R133: 1-59.

(编辑:刘晨辉)