

锻造

多向锻造和退火处理对锡青铜合金力学性能的影响

牛成麟^{1,2}, 雷志新¹, 韦春华^{1,2}, 严伟林^{1,2}

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004;

2. 广西大学 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 为探索强塑性匹配良好的锡青铜合金的制造方法, 制备了粗晶、多向锻造、多向锻造及退火 3 种锡青铜合金试样, 采用金相显微观察、显微硬度测试、单向拉伸试验、扫描电子显微镜形貌观察等手段研究了 3 种试样的金相组织、硬度、拉伸性能和拉伸断口形貌。结果发现, 粗晶锡青铜合金经过多向锻造后, 晶粒明显细化, 经过后续退火处理后, 晶粒轻微长大。多向锻造及退火锡青铜合金试样的硬度、抗拉强度、伸长率均介于其余两种试样之间, 其强塑积分别为粗晶锡青铜合金试样和多向锻造锡青铜合金试样的 114% 和 195%, 拉伸断口呈韧性断裂特征。结果表明, 采用多向锻造及退火工艺可获得良好强塑性匹配的锡青铜合金。

关键词: 锡青铜合金; 多向锻造; 退火; 强塑积; 晶粒细化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.002

中图分类号: TG319; TG166.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 07-0009-04

Influence of multi-directional forging and annealing on mechanical properties for tin bronze alloy

Niu Chenglin¹, Lei Zhixin¹, Wei Chunhua^{1,2}, Yan Weilin^{1,2}

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metals and Featured Materials, MOE Key Laboratory of New Processing Technology for Non-ferrous Metals and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to explore the manufacturing method of tin bronze alloy with good strength and plasticity, three kinds of tin bronze alloy samples of coarse grain, multi-directional forging and multi-directional forging and annealing were prepared, and their microstructures, hardnesses, tensile properties and tensile fracture morphologies were tested by means of metallographic observation, microhardness test, unidirectional tensile test and scanning electron microscope morphology observation. The results show that the grains of coarse grain tin bronze alloy are obviously refined after multi-directional forging, and the grains grow slightly after the subsequent annealing treatment. The hardness, tensile strength and elongation of tin bronze alloy samples by multi-directional forging and annealing are between those of the other two samples. However, their products of strength and elongation are about 114% and 195% of the coarse grain and multi-directional forging tin bronze alloy samples, respectively, and the tensile fracture morphologies show ductile fracture characteristics. Thus, the process of multi-directional forging and subsequent annealing process can produce the tin bronze alloy with good strength and plasticity.

Key words: tin bronze alloy; multi-directional forging; annealing; product of strength and elongation; grain refinement

锡青铜合金被广泛应用于齿轮、蜗轮、滑动轴承和衬套的制造, 科学技术的快速发展对锡青铜合金的综合力学性能提出了更高要求。大塑性变形 (Severe Plastic Deformation, SPD) 工艺可以大幅度

减小晶粒尺寸, 提高材料的硬度和强度, 例如累积轧制 (Accumulative Rolling Bonding, ARB)^[1]、高压扭转 (High-Pressure Torsion, HPT)^[2]、等径角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP)^[3] 和多向锻造 (Multi-directional Forging, MF)^[4-5] 等。陆惠生^[6] 在 420~520 °C 温度下锻造 ZQSn10-1 锡磷青铜, 发现锻造使组织均匀, 减少了缺陷, 提高了耐磨性。杨秀龙^[7] 探讨了 3 种不同 Sn 含量的锡磷青铜锻造工艺, 发现在 780~586 °C 温度下锻造是可行的。Gupta R 等^[4] 通过室温多向锻造高铅锡青铜合

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51561003)

作者简介: 牛成麟 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1316606850@qq.com

通信作者: 韦春华 (1984-), 男, 博士, 讲师

E-mail: weichunhua@gxu.edu.cn

金,发现晶粒尺寸由 240 nm 细化至 90 nm,材料的显微硬度和抗压强度提高至原来的 2.0~2.5 倍。Popov V V 等^[2]采用高压扭转方法制备了晶粒尺寸为 180 nm 的锡青铜合金,并指出锡含量的增加有助于提高超细晶组织的退火稳定性。Popov V V 等^[8]还研究了锡青铜合金经过动态径角挤压后的组织演变,发现剧烈的塑性变形导致孪晶机制被激活,降低了回复和再结晶发生的概率,与纯铜相比,锡青铜合金获得了更高的强化能力。Gadallah E A 等^[3]对铸造锡青铜合金进行了等径角挤压加工,结果发现,随着变形道次的增加,晶粒显著细化,脆性析出相破碎,材料的抗拉强度可提高至铸造合金的 213%,伸长率先降低后略提高,但仍大幅低于铸造合金。Hui J 等^[9]研究了 620~720 ℃ 热挤压过程中锡青铜合金晶粒和晶界的微观结构变化,结果表明,晶粒尺寸随着温度的升高而增大,塑性变形由动态再结晶和孪晶协调的混合机制控制;随着温度的持续升高,亚晶粒和变形晶粒将过度生长,再结晶晶粒的生长受到抑制,细晶粒强化能力下降,导致强度和伸长率持续下降。

上述国内外研究现状表明,通过多向锻造、高压扭转、等径角挤压、热挤压等塑性变形加工方法能够有效地细化锡青铜合金晶粒,使材料的强度大幅度提高,但是伸长率的显著下降会导致材料不能获得优良的综合力学性能。因此,本文对退火态锡青铜合金进行多向锻造及退火处理,探讨强塑性匹配良好的锡青铜合金的制备方法。

1 实验材料及方法

实验材料采用热挤压锡青铜合金,合金的成分(%,质量分数)为:5.3Sn, 2.8Zn, 0.11P, 0.01Ni, 0.01Fe, 0.004Al, 0.002Pb, Cu 余量。将合金块放入箱式电阻炉进行 600 ℃ 保温,2 h 后随炉冷却至室温,将其切成 15 mm×15 mm×25 mm 大小的粗晶试样。采用液压机对粗晶试样进行锻造,应变速率约为 10 s⁻¹,试样每下压一次的变形量为 20%,试样在 x、y、z 方向各下压一次计为 1 道次,共锻造 3 道次得到多向锻造试样。为避免试样在锻造过程中开裂,每道次前需将试样进行 300 ℃ 预热,第 1、2 和 3 道次前的保温时间分别为 30、10 和 10 min。将多向锻造试样放入 250 ℃ 的电阻炉中保温 2.5 h 后随炉冷却,得到多向锻造及退火试样。在光学显微镜下对 3 种试样进行金相组织观察。利用 AVH-5L 型显微硬度

计进行硬度测试,加载载荷为 2.942 N,保压时间为 15 s。拉伸试样为犬骨状,标距长度为 5 mm,标距段宽度为 2 mm,厚度为 1 mm。在 Instron 8801 力学实验机上进行单向拉伸实验,拉伸速度为 1 mm·min⁻¹。采用日立 S-3400N 型扫描电子显微镜进行拉伸试样断口形貌的观察。

2 实验结果及分析

图 1 为不同状态下锡青铜合金试样的金相组织图片。从图 1a 中可以看出,粗晶锡青铜合金试样具有典型的再结晶组织,晶粒较为粗大,尺寸约为 (27±13) μm,晶粒内可见少量退火孪晶^[10]。经过多向锻造后,锡青铜合金晶粒细化明显,晶粒尺寸约为 (11±4) μm,晶粒中可见大量平行层束,如图 1b 所示,这些平行层束结构为变形孪晶^[8,11]。多向锻造试样再经过退火处理后,晶粒较多向锻造锡青铜合金试样轻微长大,晶粒尺寸约为 (12±5) μm,晶内平行层束同样清晰可见,如图 1c 所示。

图 2 为不同状态下锡青铜合金试样的抗拉强度、伸长率和强塑积柱状图。从图 2 中可见,粗晶锡青铜合金试样的抗拉强度最低,伸长率最高,强塑积大小居中;多向锻造锡青铜合金试样的抗拉强度最高,而伸长率和强塑积最低;多向锻造及退火锡青铜合金试样的抗拉强度和伸长率分别为 560 MPa 和 34.4%,介于粗晶与多向锻造两种锡青铜合金试样之间,而强塑积最高,分别达到粗晶和多向锻造锡青铜合金试样的 114%和 195%。粗晶、多向锻造、多向锻造及退火 3 种锡青铜合金试样的硬度测量结果分别为 (101±2)、(196±5)、(186±3.8) HV,与抗拉强度的变化规律一致。

不同状态下锡青铜合金试样的拉伸断口形貌如图 3 所示,粗晶、多向锻造、多向锻造及退火 3 种锡青铜合金试样的断口形貌均由尺寸大小不一的韧窝组成,在大韧窝的周围密集分布着许多小韧窝,属于典型的韧性断裂特征。粗晶锡青铜合金试样的韧窝尺寸和深度最大(图 3a),多向锻造及退火锡青铜合金试样的韧窝尺寸和深度次之(图 3c),多向锻造锡青铜合金试样的韧窝尺寸和深度最小(图 3b),说明粗晶锡青铜合金试样的塑性最佳,多向锻造锡青铜合金试样的塑性最差,而多向锻造及退火锡青铜合金试样的塑性介于粗晶与多向锻造两种锡青铜合金试样之间,与 3 种试样的伸长率的变化规律一致。

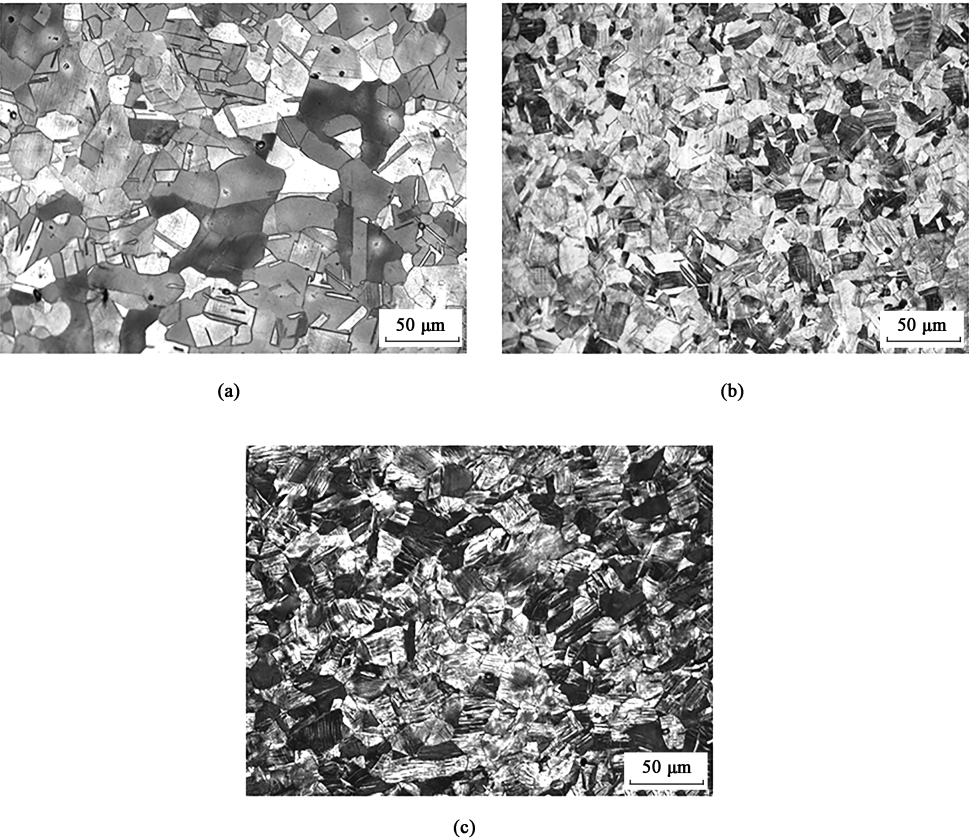


图 1 不同状态下锡青铜合金试样的金相组织图片
(a) 粗晶 (b) 多向锻造 (c) 多向锻造及退火

Fig. 1 Metallographic pictures of tin bronze alloy samples under different conditions

(a) Coarse grain (b) Multi-directional forging (c) Multi-directional forging and annealing

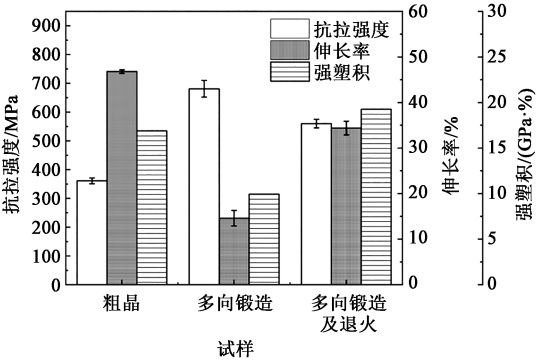


图 2 不同状态下锡青铜合金试样的抗拉强度、伸长率和强塑积变化

Fig. 2 Changes of tensile strength, elongation and product of strength and elongation for tin bronze alloy samples under different conditions

铜合金相比于纯铜具有较低的层错能，控制塑性变形和显微组织细化的主要机制包括位错分裂、孪晶碎裂、孪晶交叉和剪切变形带^[12]。多向锻造前，锡青铜合金组织为等轴粗晶组织；在多向锻造过程中，晶粒的累积应变增大，在位错、孪晶、剪切变形带的共同作用下，粗晶粒破碎为细晶粒；多向锻

造后，锡青铜合金在细晶强化和高密度位错作用下，具有较高的强度但塑性较差。经过后续退火处理，锡青铜合金发生回复，位错密度降低，部分晶粒发生再结晶而长大，多向锻造产生的残余应力也得到释放。因此，与多向锻造锡青铜合金试样相比，多向锻造及退火锡青铜合金试样的抗拉强度仅下降 18%，而伸长率提高了 136%，呈现良好的强塑性匹配。

3 结论

- (1) 粗晶锡青铜合金经过多向锻造后，晶粒细化至约 11 μm，再经过后续退火处理后，晶粒轻微长大。
- (2) 多向锻造及退火锡青铜合金试样的硬度、抗拉强度、伸长率分别为 186 HV、560 MPa、34.4%，均介于粗晶和多向锻造锡青铜合金试样之间；其强塑积为粗晶和多向锻造锡青铜合金试样的 114% 和 195%，呈现良好的强塑性匹配。
- (3) 粗晶、多向锻造、多向锻造及退火 3 种锡青铜合金试样的断口均呈现韧性断裂特征，多向锻

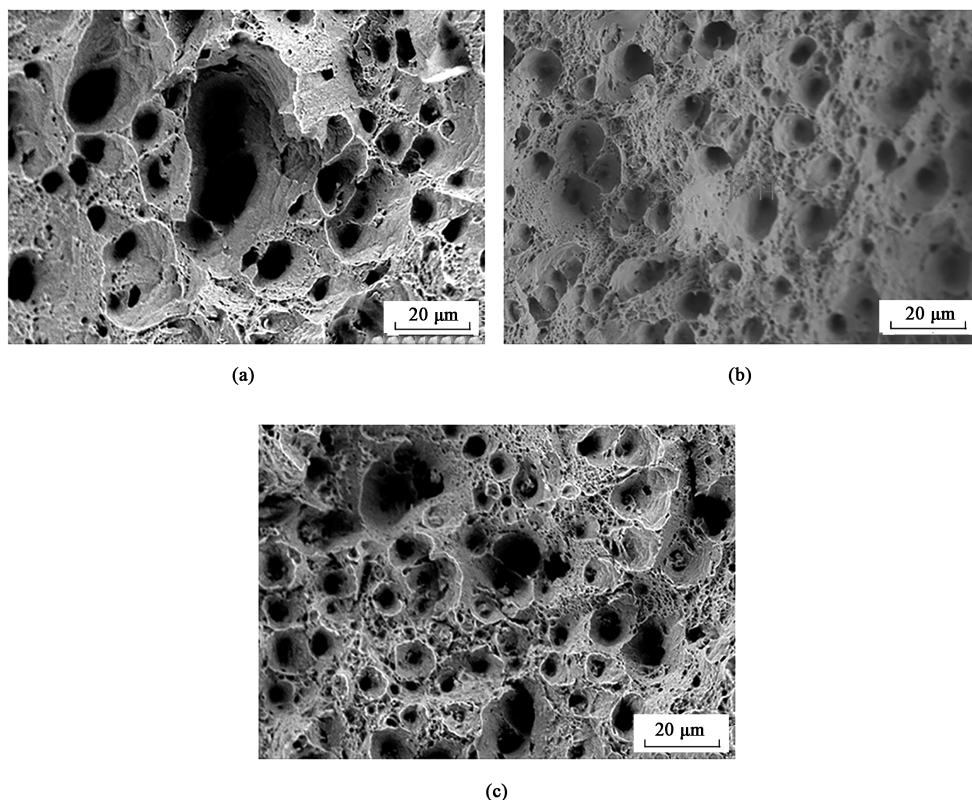


图3 不同状态下锡青铜合金试样的拉伸断口形貌
(a) 粗晶 (b) 多向锻造 (c) 多向锻造及退火

Fig. 3 Tensile fracture morphologies of tin bronze alloy samples under different conditions
(a) Coarse grain (b) Multi-directional forging (c) Multi-directional forging and annealing

造及退火锡青铜合金试样的韧窝尺寸和深度介于其余两种试样之间。

参考文献:

- [1] Wang J L, Shi Q N, Qian T C, et al. Recrystallized microstructural evolution of UFG copper prepared by asymmetrical accumulative rolling-bonding process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (4): 559-563.
- [2] Popov V V, Popova E N, Stolbovsky A V, et al. Evolution of the structure of Cu-1%Sn bronze under high pressure torsion and subsequent annealing [J]. Physics of Metals and Metallography, 2018, 119 (4): 358-367.
- [3] Gadallah E A, Ghanem M A, Abd El-Hamid M, et al. Effect of tin content and ECAP passes on the mechanical properties of Cu/Sn alloys [J]. American Journal of Science and Technology, 2014, 1 (2): 60-68.
- [4] Gupta R, Srivastava S, Kumar N K, et al. High leaded tin bronze processing during multi-directional forging: Effect on microstructure and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 654: 282-291.
- [5] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [J]. Progress in Materials Science, 2000, 45 (2): 103-189.
- [6] 陆惠生. ZQSn10-1 锡磷青铜的锻造 [J]. 锻压机械, 1981, (1): 32.
- [7] 杨秀龙. 几种锡青铜的锻造工艺探讨 [J]. 航天工艺, 1992, (2): 9-11.
- [8] Popov V V, Stolbovsky A V, Popova E N, et al. Evolution of the structure of tin bronze under dynamic channel-angular pressing [J]. Physics of Metals and Metallography, 2017, 118 (9): 864-871.
- [9] Hui J, Feng Z X, Wang P, et al. Microstructural evolution analysis of grains and tensile properties of tin bronze in hot extrusion at different temperatures [J]. Materials at High Temperatures, 2019, 36 (1): 68-75.
- [10] Mahajan S, Pande C S, Imam M A, et al. Formation of annealing twins in F. C. C. crystals [J]. Acta Materialia, 1997, 45 (6): 2633-2638.
- [11] Li Y S, Tao N R, Lu K. Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures [J]. Acta Materialia, 2008, 56 (2): 230-241.
- [12] Liu G, Gu J, Ni S, et al. Microstructural evolution of Cu-Al alloys subjected to multi-axial compression [J]. Materials Characterization, 2015, 103: 107-119.