

CuSn10P1 合金薄壁轴套挤压铸造组织均匀性及性能研究

杨琼^{1, 2}, 周荣锋^{2, 3}, 李永坤³

(1. 云南机电职业技术学院, 云南昆明 650203; 2. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南昆明 650093;

3. 昆明理工大学城市学院, 云南昆明 650093)

摘要: 分别采用液态挤压铸造和半固态流变挤压铸造成形CuSn10P1合金薄壁轴套, 对轴套组织均匀性和拉伸力学性能进行了研究。结果表明, 半固态挤压铸造CuSn10P1合金轴套组织中物相尺寸和形态分布均匀性显著提高; 半固态铸造组织显著细化和球化, 基体相内部锡元素固溶度得到显著提高; δ 和Cu₃P脆性物相分布于高锡含量的细小 α 相之间; 半固态挤压铸造薄壁轴套的抗拉强度和伸长率较液态挤压铸造轴套分别提高了26%和318%。

关键词: CuSn10P1合金; 薄壁轴套; 半固态流变挤压铸造; 细晶强化; 固溶强化

作者简介:

杨琼(1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为半固态成形。E-mail: 1395567993@qq.com

通讯作者:

周荣锋(1969-), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zhourfchina@hotmail.com

中图分类号: TG14; TG15

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

01-0061-06

基金项目:

国家自然科学基金(51765026); 云南省教育厅科学研究基金项目(2019J0449)。

收稿日期:

2022-07-03 收到初稿,

2022-09-05 收到修订稿。

半固态技术被誉为21世纪最有发展前景的绿色制造技术之一^[1], 是一种介于液态、固态成形的技术, 能平稳地充满型腔, 同时具有热冲击小、成形力低、铸件致密性高等特点, 它包括触变成形和流变成形^[2-5]。半固态流变挤压是典型的流变成形工艺, 可以直接从金属半固态状态加工成形, 减少二次加热半固态浆料的过程。Lee等^[6-7]运用铜钙合金半固态浆料成型研究合金凝固组织特征及导电性。Youn等^[8]运用Cu-Ag合金半固态直接成型感应电动机器件。Yan等^[9]进行了关于黄铜(HPb59-1)的半固态成形工艺研究。Wang^[10]利用硅碳增强铜基复合材料并进行了半固态锻造成形工艺的研究。Cao等^[11-12]运用旋锻工艺制备锡青铜(C5191)半固态浆料, 研究发现半固态试样的强度高于枝晶组织的铸态铜, 并且刚度和强度随着微观晶粒尺寸的减小而增加。Li等^[13]运用封闭冷却斜坡法制备铜合金半固态浆料, 研究发现在斜坡长度为300 mm时, 半固态组织试样性能较好。Wang等^[14-15]制备铜合金半固态坯料采用的工艺是轧制与重熔, 并进行单向压缩研究了其组织演变规律和变形行为。

CuSn10P1合金作为常用锡青铜, 因其具有良好的弹性、耐磨性和耐腐蚀性等优点而被广泛地用来制造轴套、齿轮、阀及涡轮等零件^[16-18]。但其凝固温度范围较宽, 同时其锡元素熔点较低, 传统砂型铸造、金属型铸造、离心铸造由于粗大树枝晶的形成, 以及低熔点锡元素容易发生晶间偏析, 使铸件内部容易产生缩松、缩孔等缺陷, 表现为塑性较低, 甚至出现晶间脆性^[19-20]。如何改善铜锡合金中锡元素的晶间偏析和逆偏析, 进而提高铜锡产品的综合性能, 是铜锡合金在实际工业中得到广泛应用必须解决的关键问题之一。目前通过工艺控制对铸件凝固过程中锡元素偏析的研究, Liu^[21]等运用两相区连铸(TZCC)技术(自主研发), 研究了Cu-Sn4.7合金板表面质量与两相区连铸工艺参数的关系, 以及工艺参数对表面质量的影响, 并分析了运用TZCC制备Cu-Sn4.7合金板的组织和力学性能; Song^[22]等运用重力铸造和挤压铸造, 研究了锡青铜(Cu-10Sn-4Ni-3Pb)的偏析显微组织; Zhai^[23]等通过施加超声处理可以阻碍铜锡合金(Cu-70%Sn)凝固过程中液态合金出现体积过冷, 从而快速促进 ϵ 相(Cu₃Sn)形核, 使晶粒得到细化, 通过对Cu-70%Sn合金进行超声处理后, 其抗压强度提高了4.8倍, 同时显微硬度提高了1.45倍; Kumoto^[24]等研究冷却速率对Cu-10%Sn显微组织及锡偏析的影响, 发现随着冷却速率的增加, 显微组织的二次枝晶

臂得到明显细化并且晶间偏析程度得到改善。

CuSn10P1合金中锡元素半径较铜原子半径大^[20-25]，同时其固溶到基体中将显著提高合金的层错能^[25-26]，如果铸造过程中能够使得锡元素足够固溶到基体相中，锡元素的强化及其低层错能作用将得到显著发挥，合金的强度和塑性将得到显著改善^[20, 25-27]。

本文从提高锡元素固溶度的角度出发，采用熔体约束流动诱导形核半固态浆料制备技术，并结合薄壁轴套挤压铸造金属型的快速冷却效果，实现CuSn10P1合金晶粒的细化和球化，同时实现锡元素在基体相中尽可能固溶，达到CuSn10P1合金强化和韧化的目的。

1 试验材料与方法

试验采用的CuSn10P1合金为市场采购的 $\Phi 300$ mm商用连铸棒料，成分见表1。用STA449F3同步热分析仪(DSC)进行差热分析测得合金凝固温度区间为830~1 021 $^{\circ}\text{C}$ ，固液温度区间间隔为189 $^{\circ}\text{C}$ ^[28]。

表1 CuSn10P1合金成分表

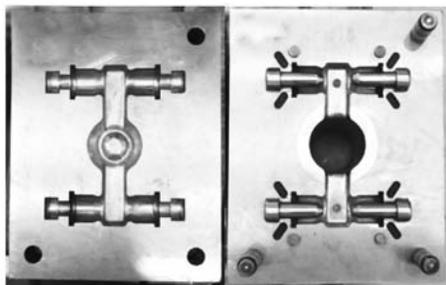
Table 1 Chemical composition of CuSn10P1 alloy $w_B/\%$

Cu	Sn	P	其他
89.20	9.92	0.76	0.12

截取6.5 kg左右的CuSn10P1合金放入中频感应炉内熔炼，温度达到1 200 $^{\circ}\text{C}$ 后进行除气除渣净化工艺处理，然后静置空冷至1 080 $^{\circ}\text{C}$ ，分别进行液态挤压铸造和半固态流变挤压铸造。

挤压铸造采用徐州开元世纪重型锻压有限公司生产的KY32-200K型底注式液压机完成。液压机由200 t上油缸和160 t下油缸分别提供合模力和充型力。

挤压铸造上、下模具实物如图1所示，挤压铸造获得壁厚为3.5 mm的带法兰薄壁轴套如图2所示，法兰外径和高度分别为 $\Phi 48$ mm和 $\Phi 8$ mm，轴套外径和内径分别为 $\Phi 38$ mm和 $\Phi 31$ mm，轴套总长为43 mm。挤压铸造过程中，金属熔体(液态金属或半固态浆料)首先浇



(a) 上模具 (b) 下模具

图1 挤压铸造上模具和下模具实物图

Fig. 1 Upper die and lower die for squeeze casting experiment

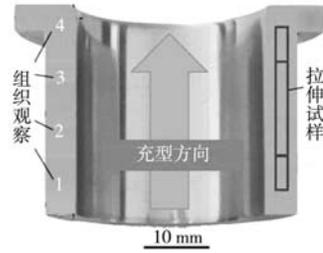
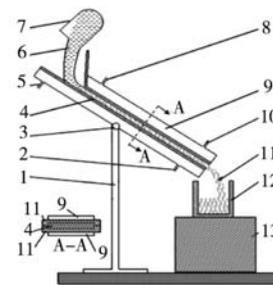


图2 挤压铸造薄壁轴套熔体充型方向、轴套组织观察位置和片状拉伸试样取样位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of melt filling direction, microstructure observation position and tensile sample sampling position of thin walled shaft sleeve

注到下模具中心位置的料筒中；然后合模，在安装于下油缸冲头的作用下，熔体从料筒经过横浇道、内浇道进入型腔，完成薄壁轴套的底注式挤压铸造成形。挤压铸造模具预热温度为475 $^{\circ}\text{C}$ 、成形比压为150 MPa、挤压充型速度为18 mm/s。

半固态浆料制备采用熔体约束流动诱导形核通道装置(图3)处理实现，熔体约束流动诱导形核通道长度300 mm、倾斜角度为45 $^{\circ}$ ，待温度降到1 080 $^{\circ}\text{C}$ 时将金属浇入通道入口，在通道(截面尺寸5 mm \times 100 mm \times 400 mm)约束作用下，熔体在通道流动过程中受上下表面的冷却作用快速过冷形核，出口获得半固态浆料，浆料经预热900 $^{\circ}\text{C}$ 左右的石墨坩埚收集后，快速浇注至模具料筒内进行半固态流变挤压铸造。



1.支架 2、10.冷却水入口 3.通道角度调节 4.冷却通道内表面；5、8.冷却水出口 6.金属液 7.坩埚 9.冷却装置 11.半固态浆料 12.浆料收集坩埚 13.垫块

图3 熔体约束流动诱导形核技术制备半固态浆料装置

Fig. 3 Device for preparing semi-solid slurry by melt confined flow induced nucleation technology

沿轴向将挤压铸造薄壁轴套切开(图2)，沿充型方向分别截取四个金相组织观察试样和2 mm厚的拉伸试样。采用质量分数5%的 $\text{FeCl}_3\text{-C}_2\text{H}_6\text{O}$ (酒精)溶液侵蚀金相试样，采用光学显微镜和扫描电镜观察金相组织。常温下进行单向拉伸性能试验，拉伸速度为2 mm/min，使用的实验设备为万能试验机(10 t液压力)，所取拉伸试样形状及位置见图2，采用扫描电镜

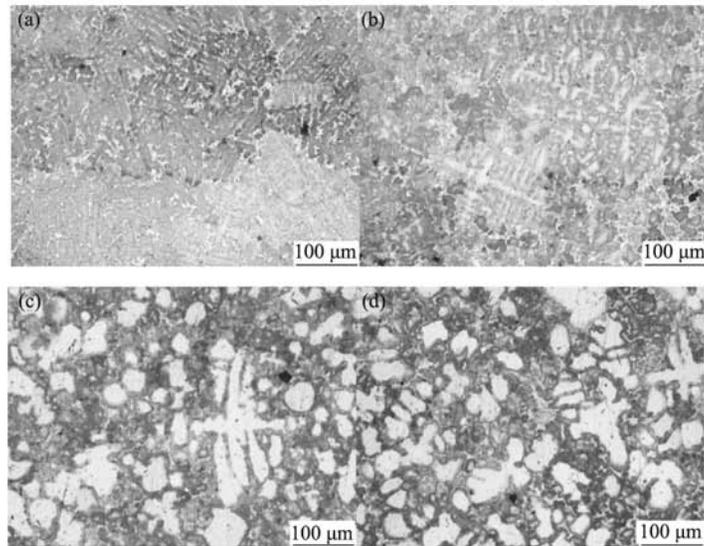
(Hitachi日立S-3400N)进行拉伸试样断口形貌观察及断裂方式的分析。

2 试验结果与分析

2.1 流变挤压铸造铜锡合金组织演变

平衡条件下, CuSn10P1合金凝固组织由粗大树枝状初生 α 相、晶间分布的高锡 δ 相和 Cu_3P 物相组成^[29]。其中 Cu_3P 和 δ 与 α 相以三元共晶的形式存在,而 δ 又由高温 β 相经过共析分解与 α 相组成共析组织。理论上 δ 相在350℃也会发生共析分解形成 ϵ 相,但通常由于温度较低不会发生分解而保留至室温,最终形成三元 $\alpha + \delta + \text{Cu}_3\text{P}$ 以片状形式交替分布于初生 α 相树枝晶间。

挤压铸造条件下,液态金属在金属模具的快速冷却作用下,充型初期粗大树枝状初生 α 相显著变成细长树枝状,三元 $\alpha + \delta + \text{Cu}_3\text{P}$ 片状组织断续分布于细小树枝晶间(图4a);随着充型过程的进行,金属熔体经过尺寸较为宽大的横浇道,初生树枝状 α 相枝晶臂一定程度上发生长大,且在较为狭小的内浇道和型腔壁的剪切作用下,部分较长枝晶臂破碎成短枝晶臂,而三元片状组织变得较为粗大(图4b);随着充型过程继续进行,枝晶臂在狭小型腔中进一步被破碎,在型腔壁冷却过冷作用下发生一定程度长大,形成了蔷薇状的短枝晶;同时剩余液相由于锡元素含量较高,部分直接形核形成较为细小高固溶铜相;最终晶间三元片状组织数量减小,零星分布于初生 α 相和高固溶铜相之间(图4c和4d)。



(a)、(b)、(c)、(d)分别对应图2中的1、2、3、4位置

图4 液态挤压铸造CuSn10P1合金薄壁轴套沿充型方向不同位置的金相组织

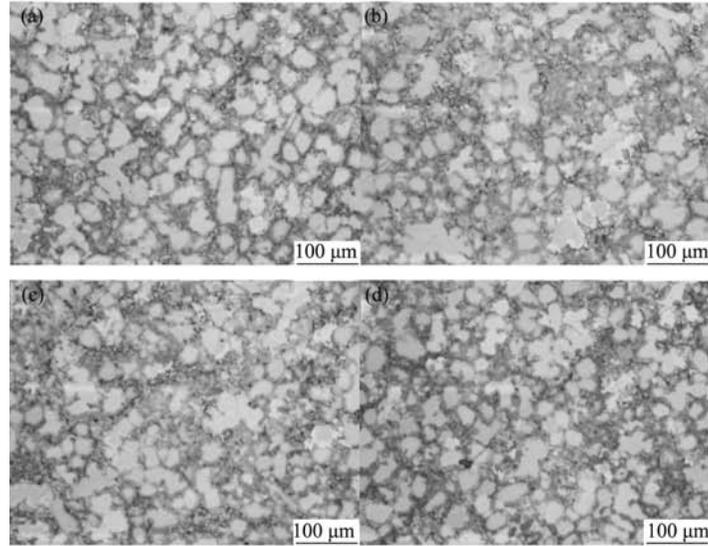
Fig. 4 Microstructure of CuSn10P1 alloy thin walled shaft sleeve at different positions along filling direction during liquid squeeze casting

CuSn10P1合金液态条件下进行挤压铸造,较平衡条件或砂型铸造条件下,晶粒能够得到显著细化。但是对于薄壁轴套的液态挤压铸造,在充型方向上组织分布极为不均匀,初生相、晶间三元片状组织的尺寸、形态都表现出巨大的差异。

半固态流变挤压铸造组织(图5)与液态挤压铸造表现得显著不同。首先,组织中初生 α 相没有出现异常长大的情况,大部分为近等轴状,尺寸约为50~60 μm ;其次,晶间细小高锡 α 相均围绕近球状初生相形核长大,尺寸约为5~8 μm ;第三,大部分三元片状组织变得更加细小,弥散分布于细小高锡 α 相之间。半固态挤压铸造轴套整个截面组织中尺寸、形态分布变得非常均匀。

半固态挤压铸造薄壁轴套中初生 α 相没有出现

液态挤压铸造中的异常长大现象,形成较为均匀组织的原因,与半固态浆料制备过程形成的半固态组织有关。研究表明^[9-10],金属熔体流经约束通道过程中,熔体从进入通道到出口之间只有约0.25 s,温降约90℃,冷速达到360℃/s,过冷度约为30℃,且通道缝隙厚度仅为5 mm,厚度方向熔体内温度分布较为均匀。熔体瞬时过冷情况下,熔体内初生相急剧大量形核并长大。一方面,因初生相急剧形核,浆料中形成大量近球状初生 α 相;另一方面,急剧形核长大的初生相,其界面快速向液相内部推进,在其界面附近液相区形成高锡区,高锡区反过来阻碍初生相进一步长大。因此,半固态浆料充型过程中,轴套壁各处初生相尺寸较为均匀;剩余高锡液相在后续充型过程中,由于金属型的作用,熔体达到相应过冷,直接形核,在近球



(a)、(b)、(c)、(d) 分别对应图2中的1、2、3、4位置

图5 半固态流变挤压铸造CuSn10P1合金薄壁轴套沿充型方向不同位置的金相组织,

Fig. 5 Microstructure of CuSn10P1 alloy thin walled shaft sleeve at different positions along filling direction during semi-solid rheo squeeze casting

状初生相周围形成细小高锡 α 相。

2.2 流变挤压铸造铜锡合金锡元素的固溶、合金抗拉强度和伸长率

采用扫描电镜EDS分析半固态挤压铸造薄壁轴套内部组织中的元素分布,结果如图6。可以发现,初生 α 相心部(图6点1)内部锡元素含量较低,为1.79%;初生 α 相边缘锡元素含量达到9.06%(图6点2),由于初生相的快速长大,锡元素在其内部形成了正偏析;剩余液相在充型过程中直接形核长大成5~8 μm 的高锡 α 相,锡元素含量高达12.52%(图6点3)。

液态挤压铸造组织中大部分 α 相为粗大枝晶状,其中锡元素固溶度较低,三元片状脆性化合物 δ 和 Cu_3P 尺寸较大,且分布于晶间,成为较为脆弱的界面,导致拉伸过程中沿晶断裂几率增大(图7a)。而半固态挤压铸造组织中 α 晶粒得到很大程度的细化和

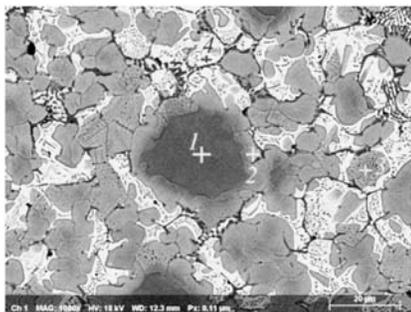


图6 半固态挤压铸造薄壁轴套内部组织中元素分布的EDS分析
Fig. 6 EDS analysis of element distribution in microstructure of thin walled shaft sleeve by semi solid rheo squeeze casting

表2 半固态挤压铸造薄壁轴套内部组织中元素含量
Table 2 Element content in microstructure of thin walled shaft sleeve by semisolid rheo-squeeze casting $w_B/\%$

位置	Cu	Sn	P
点1	94.01	1.79	0
点2	90.94	9.06	0
点3	87.38	12.52	0
点4	69.02	30.84	0.14

球化,同时出现很多5~8 μm 的高锡细小 α 相,锡元素在 α 相内固溶度较高,因此其强度和伸长率得到显著提升,其拉伸断口内部出现显著的韧性断裂的韧窝(图7b)。

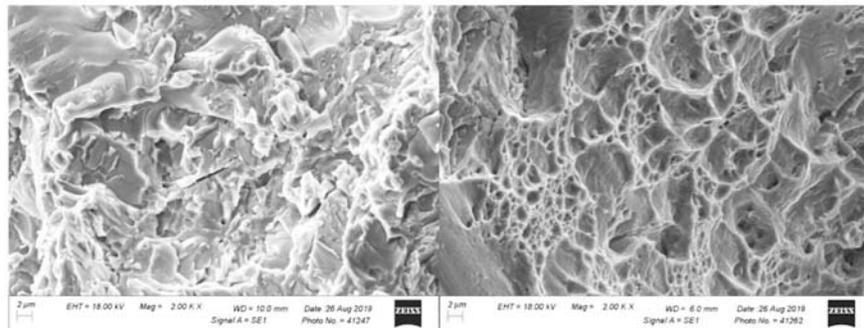
半固态挤压铸造条件下,CuSn10P1合金轴套内部的晶粒尺寸显著细化和球化,同时锡元素在 α 相中的固溶度提高,其力学性能显著提高。在常温下,拉伸速度为2 mm/min,制备的薄壁轴套抗拉强度和伸长率分别达到451.0 MPa和32.6%,较液态挤压铸造薄壁轴套抗拉强度(357.03 MPa)和伸长率(7.8%)分别提高26%和318%。

3 结论

(1) 与液态挤压铸造相比,半固态挤压铸造薄壁轴套组织中物相尺寸和形态分布均匀性显著提高。

(2) 半固态挤压铸造形成的固液界面附近高锡液相显著抑制初生相的长大,充型过程剩余高锡液相二次形核,获得细小高锡 α 相。

(3) 由于半固态成形过程中合金晶粒的细化和球



(a) 液态挤压铸造

(b) 半固态挤压铸造

图7 液态挤压铸造和半固态挤压铸造薄壁轴套拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of thin walled shaft sleeve in liquid squeeze casting and semi-solid squeeze casting

化, 以及锡元素在基体相中的固溶度得到显著提高, 使伸长率的提升非常显著。薄壁轴套的抗拉强度和伸长率得到显著提升, 特别是伸

参考文献:

- [1] 赵祖德, 罗守靖. 轻合金半固态成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 6-7.
- [2] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state [J]. Metall Trans A, 1991, 22 (5): 957.
- [3] 孙兵, 张英波, 权高峰, 等. AZ80镁合金半固态等温处理过程中的组织演变 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45 (2): 404-408.
- [4] SREERAMAMURTHY ANKEM, HAROLD MARGOLIN, CHARLES A Greene, et al. Mechanical properties of alloys consisting of two ductile phases [J]. Progress in Materials Science, 2005: 632-709.
- [5] 刘静, 王平. 6061铝合金半固态模锻成形的DEFORM-3D模拟与验证 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (10): 2455-2458.
- [6] SANGYONG LEE, SANGYUL LEE. Application of pvd coatings for improvement of die performance in copper semi-solid processing [J]. Solid State Phenomena, 2006, 117-117: 84-87.
- [7] 肖寒, 段志科, 李乃拥. 触变挤压铜合金的力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (2): 531-537.
- [8] JEONG Il youn, YOUNG Jig kim. Application of semi-solid process for production of the induction motor squirrel cage [J]. Solid State Phenomena, 2006: 730-733.
- [9] YANH, ZHOUB. Thixotropic deformation behavior of semi-solid AZ61 magnesium alloy during compression process [J]. Materials Science and Engineering; B, 2006, 132 (1): 179-182.
- [10] WANG J, PHILLION AB, LUG M. Development of a visco-plastic constitutive modeling for thixoforming of AA6061 in semi-solid state [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 609 (9): 290-295.
- [11] CAO Miao, WANG Zhao, ZHANG Qi. Microstructure-dependent mechanical properties of semi-solid copper alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 715: 413-420.
- [12] CAO Miao, ZHANG Qi, ZHANG Yisheng. Effects of plastic energy on thixotropic microstructure of C5191 alloys during SIMA process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 721: 220-228.
- [13] LI Yongkun, ZHOU Rongfeng, LI Lu. Microstructure and properties of semi-solid ZCuSn10p1 alloy processed with an enclosed cooling slope channel [J]. Metals, 2018, 8 (4): 275-275.
- [14] 王佳, 肖寒, 吴龙彪. 轧制-重熔SIMA法制备ZCuSn10合金半固态坯料 [J]. 金属学报, 2014, 50 (5): 567-574.
- [15] WANG Jia, XIAO Han, WU Long-biao, et al. Deformation characteristic of semi-solid ZCuSn10 copper alloy during isothermal compression [J]. Rare Metals, 2016, 35 (8): 620-626.
- [16] CUVALCI H, CELIK H S. Investigation of the abrasive wear behaviour of ZA-27 alloy and CuSn10 bronze [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46 (14): 4850-4857.
- [17] ÜNLÜ B S, ATIK E. Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489 (1): 262-268.
- [18] 王聪聪, 贾成厂, 申承秀, 等. 球形化处理铜锡粉末制备 CuSn10 含油轴承 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18 (4): 572-578.
- [19] AFSHARI E, GHAMBARI M, ABDOLMALEK H. Production of CuSn10 bronze powder from machining chips using jet milling [J]. The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 663–672.
- [20] SCUDINOS, UNTERDORFERC, PRASHANTHKG, et al. Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze [J]. Materials Letters, 2015, 156: 202–204.
- [21] LIU X F, LUO J H, WANG X C. Surface quality, microstructure and mechanical properties of Cu–Sn alloy plate prepared by two-phase zone continuous casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (6) : 1901–1910.
- [22] SONG K, ZHOU Y, ZHAO P, et al. Cu-10Sn-4Ni-3Pb alloy prepared by crystallization under pressure: An experimental study [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26 (2) : 199–205.
- [23] ZHAI W, HONG Z Y, WEN X L, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of peritectic Cu–Sn alloy solidified within ultrasonic field [J]. Materials and Design, 2015, 72 (1) : 43–50.
- [24] KUMOTO E A, ALHADEFF R O, MARTORANO M A. Microsegregation and dendrite arm coarsening in tin bronze [J]. Metal Science Journal, 2013, 18 (9) : 1001–1006.
- [25] YANGJY, KIMGH, KIMWJ. High-strain-rate solute drag creep in a Cu-22%Sn alloy (Cu₁₇Sn₃) with near peritectic composition [J]. Materials Characterization, 2020, 164: 110325.
- [26] CAIT, LIKQ, ZHANG Z J, et al. Predicting the variation of stacking fault energy for binary Cu alloys by first-principles calculations [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 53: 61–65.
- [27] MAOZ, ZHANG DZ, JIANGJ, et al. Processing optimisation, mechanical properties and microstructural evolution during selective laser melting of Cu-15Sn high-tin bronze 2018, 721 (4) : 125–134.
- [28] LI YK, ZHOURE, LIL, et al. Microstructure and properties of semi-solid ZCuSn10P1 alloy processed with an enclosed cooling slope channel [J]. Metals, 2018, 8 (4) : doi: 10.3390/met8040275.
- [29] LIYK, LIL, GENGBY, et al. Microstructure characteristics and strengthening mechanism of semisolid CuSn10P1 alloys [J]. Materials Characterization, 2021, 172: 110898.

Study on Microstructure Uniformity and Properties of CuSn10P1 Alloy Thin Walled Shaft Sleeve by Squeeze Casting

YANG Qiong^{1,2}, ZHOU Rong-feng^{2,3}, LI Yong-kun³

(1. Yunnan College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, Yunnan, China; 2. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 3. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract:

The thin-walled shaft sleeves of CuSn10P1 alloy were formed by the liquid squeeze casting and semi-solid rheo squeeze casting, respectively. Their microstructure uniformity and tensile properties were comparatively investigated. The results show that the uniformity of phase size and morphology distribution in semi-solid casting CuSn10P1 alloy shaft sleeve is significantly improved; the microstructure of semi-solid casting CuSn10P1 alloy shaft sleeve is significantly refined and spheroidized, and the solid solubility of Sn element in the matrix phase is significantly improved; δ and Cu₃P brittle phases are distributed between the fine α phases with high Sn element content; the tensile strength and elongation of thin-walled shaft sleeve made by semi-solid squeeze casting are higher than those by liquid squeeze casting. The results show that the tensile strength and elongation are increased by 26% and 318%, respectively.

Key words: CuSn10P1 alloy; thin-walled shaft sleeve; semi-solid rheo squeeze casting; fine grain strengthening; solid solution strengthening