

基于SIMA法的ZCuSn10P1铜合金半固态锻造成形研究

党文君 程元芬 谢宛莹

(中核四〇四有限公司,兰州 732850)

摘要 采用应变诱导熔化激活法进行了ZCuSn10P1的铜合金半固态成形试验,研究了预变形量、成形压力、保温温度等工艺参数对半固态组织、性能及形貌的影响。结果表明,当坯料的预变形量为15%、保温时间为30 min,半固态保温温度为960~980 ℃时,制备的半球形工件平均显微硬度高、晶粒尺寸小、半固态固相颗粒的圆整度高,且锻件实际与设计尺寸偏差较小,成形品质较好。

关键词 铜合金;SIMA法;半固态成形;组织性能

中图分类号 TG249.2⁺6;TG146.1⁺1

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240199

Semi-solid Forging Forming of ZCuSn10P1 Copper Alloy Based on SIMA Method

DANG Wenjun, CHENG Yuanfen, XIE Wanyun

(The 404 Co., Ltd., CNNC, Lanzhou 732850)

Abstract: Semi-solid forming experiments of ZCuSn10P1 copper alloy were carried out by stress-induced melt activation method, and effects of pre-deformation, forming pressure, holding temperature and other process parameters on microstructure, properties and morphology of semi-solid copper alloy were investigated. The results reveal that with pre-deformation of 15%, holding time of 30 min, and holding temperature of 960~980 ℃, the fabricated semi-spherical workpieces exhibit high average microhardness and small grain size with high roundness of semi-solid particles. Moreover, the less deviation between actual and designed size of forging indicates desirable quality.

Key Words: Cu Alloy, SIMA Method, Semi-solid Forming, Microstructure and Performance

半固态成形工艺是一种近净成形工艺^[1-2],具有液态加工和固态加工的综合优势,能一次成形形状复杂且性能要求较高的零件,并且能够延长模具寿命,提高合金的力学性能并减少微观偏析^[3],是很有前景的材料成形加工方法^[4-5]。半固态金属制备工艺有机械搅拌法(MS)、电磁搅拌法(ES)、应变诱导熔化激活法(SIMA)、超声振动法(UV)、喷射成形法(SF)和粉末冶金法(PM)等^[6-10]。其中,应变诱导熔化激活法(SIMA)工艺简单、不污染坯料,且无需特殊设备就能制备出均匀的非枝晶组织,是极具潜力的可大规模工业应用的技术之一^[11]。SIMA法是将常规铸锭经过挤压、轧制等变形工艺先使坯料获得足够的冷变形,使组织获得足够的变形能,然后加热到固液相区间,并保温一段时间,获得液相包裹着近球形固相晶粒的半固态组织,再进行半固态锻造成形制备工件^[12-13]。采用SIMA法制备半固态坯料过程中最重要的3个工艺参数是预变形量、保温温度和保温时间。针对不同的合金体系,有效控制SIMA法的工艺参数,可获得良好的

半固态坯料组织^[14]。

目前SIMA法的研究主要针对低熔点的铝合金和镁合金^[15-17],对于铜合金等较高熔点合金的半固态成形研究相对较少。胡海莲等^[18]进行了SIMA法制备铜合金半固态组织的压缩试验,研究了预变形量和压缩变形条件对半固态坯料真应力-应变曲线及其组织的影响,发现铜合金在半固态温度区间压缩变形时,存在3个典型压缩变形区域,各个变形区能够发生液相流动,小部分难变形区内的液相流到大变形区,大部分大变形区内的液相流到自由变形区。WANG J等^[19]采用冷轧-重熔的应变诱导熔化激活法制备半固态ZCuSn10铜合金坯料,对其半固态组织进行了分析,发现采用轧制重熔工艺制备的铜合金半固态组织均匀、晶粒细小,固体颗粒球化程度较好。随着预变形程度和重熔温度的提高,以及液相率的增加,半固态组织中的固体颗粒变小、圆整度变高,预变形过程对晶粒细化和球化起着至关重要的作用。孙震等^[20]研究了预退火温度对半固态铜合金坯料的组织演变及力学性能的影响,发现预

收稿日期:2024-05-11;修订日期:2024-07-10

第一作者简介:党文君,男,1994年出生,工程师,E-mail:dwj601@126.com

通信作者:程元芬,女,1991年出生,工程师,E-mail: 1030260829@qq.com

引用格式:党文君,程元芬,谢宛莹. 基于SIMA法的ZCuSn10P1铜合金半固态锻造成形研究[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(6):914-919.

DANG W J, CHENG Y F, XIE W Y. Semi-solid forging forming of ZCuSn10P1 copper alloy based on SIMA method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 914-919.

退火温度影响半固态坯料的晶粒尺寸,随着退火温度升高,铜合金内的 Sn 逐渐由晶间液相向晶粒内部扩散,一定程度上改善了 Sn 元素的偏析。任丽君等^[21]以铜磷钎料为研究对象,通过 SIMA 法制备半固态铜磷钎料,发现预变形量越大,在热处理时液相析出的越快,半固态组织更容易发生球化。

本研究以 ZCuSn10P1 铜合金为对象,自主设计了一套半球形的成形模具,在液压机上开展半固态成形试验,研究预变形量、成形压力及保温温度对半固态组织、性能及形貌的影响,旨在为铜合金半固态成形工艺提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 材料选择

试验合金为 ZCuSn10P1,其化学成分见表 1。该合金的 Sn 含量约为 10%,密度约为 8.75 g/cm³。图 1 为 Cu-Sn 二元合金相图及 DSC 曲线。可以看出,Cu-Sn 合金液相线温度(T_L)约为 1 040 ℃、固相线温度(T_S)约为 900 ℃,适宜的半固态加工温度为 900~1 000 ℃。

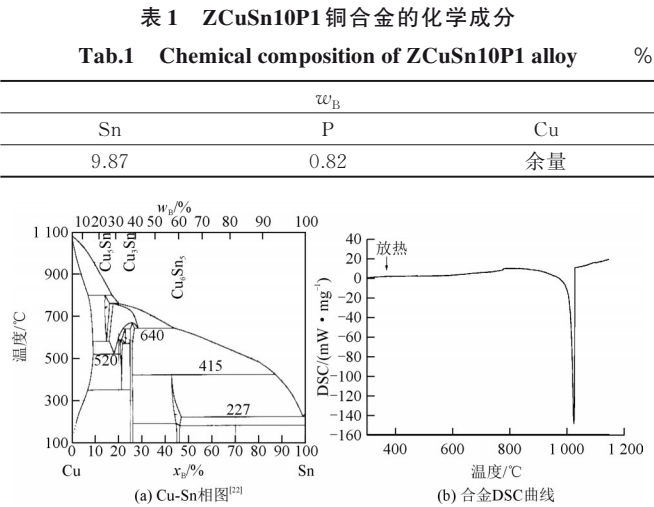


图 1 Cu-Sn 二元合金相图及 DSC 曲线

Fig.1 Phase diagram and DSC curve of Cu-Sn binary alloy

1.2 工艺路线

根据 ZCuSn10P1 铜合金半固态锻造成形工艺路线,分为以下几个步骤:①使用 1 000 kN 四柱液压机对铜合金铸坯进行预压缩变形,预压缩变形量控制在 15%~30%;②使用 LE 6/11 型马弗炉对预压缩变形后铜合金铸坯进行热处理,热处理温度为 920~1 000 ℃,热处理时间为 30~50 min,获得所需的半固态坯料;③使用液压机对半固态坯料进行触变锻造成形,锻造成形压力为 150~450 MPa,锻造速度为 1~5 mm/s,获得

半固态锻造成形的零部件;④对铜合金半固态锻造成形零部件的表面进行处理,去除氧化皮等,获得外观良好的锻造零部件。

根据零件尺寸及模具尺寸,锻件尺寸为 $\phi 25$ mm 的半球,经计算,确定采用外形尺寸为 $\phi 36.8$ mm $\times$ 38 mm 的 ZCuSn10P1 铸坯为原料,使用 Primotech 金相显微镜分析合金的铸态组织,见图 2。可以看出,合金铸坯组织呈典型的枝晶形貌特征。

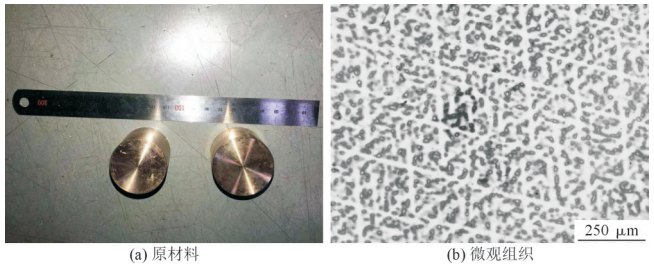


图 2 铜合金原料及铸态显微组织

Fig.2 Raw materials and as-cast microstructure of copper alloy

2 试验结果及分析

2.1 预变形量及成形压力对触变锻造的影响

ZCuSn10P1 铜合金的预压缩变形、热处理及锻造工艺参数见表 2。其中试样 1 为无冷变形处理的铸态坯料直接锻造成形的试样,锻造压力为 200 MPa,试样 2 和试样 3 为预压缩后加热获得半固态坯料后锻造成形的试样,锻造压力为 250、300 MPa。试样的外观形貌见图 3。可以看出,试样成形完整,但由于高温加热,在锻件试样表面有一层黑色的氧化物。

表 2 铜合金触变锻造成形工艺参数

Tab.2 Process parameters of thixo-forging forming of copper alloy

试样编号	预压缩量/%	变形后尺寸/mm	加热温度/℃	保温时间/min	成形压力/MPa
1	—	$\phi 40 \times 32.2$	900	30	200
2	16.5	$\phi 40 \times 32.2$	900	30	250
3	16.5	$\phi 40 \times 32.2$	900	30	300

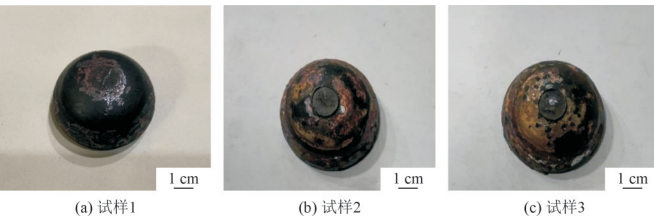


图 3 铜合金半固态成形锻件试样

Fig.3 Semi-solid forming forging specimens of Cu alloy

将试样 1~3 从中间纵向剖开,分别取上、中、下部位,使用 HV-1000 显微维氏硬度计测试其硬度,见图 4。

对每个试样不同部位进行显微硬度测试,每个部位测试不少于7个点,取平均值,结果见图5。可以看出,试样1的上、中、下部位的硬度(HV)分布变化较大,97.1~122.2,也从侧面反映锻件的变形和内部组织可能也不均匀。试样2和试样3的上、中、下部位的硬度(HV)变化较小,范围分别为90.4~106.5、96.1~102.2,也表明半固态锻造获得的锻件变形较为均匀,其内部组织也较为均匀。

图6为试样1~3不同部位的显微组织。可以看出,未经过预压缩变形直接由铸坯锻造成形的试样1,其平

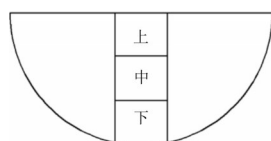


图4 锻件硬度及微观组织取样部位示意图

Fig.4 Schematic diagram of forging hardness and microstructure sampling position

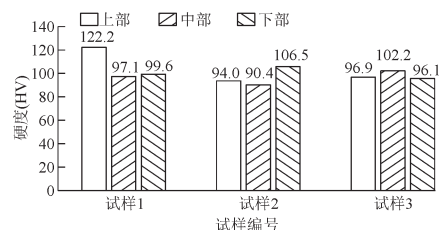


图5 锻件不同部位显微硬度

Fig.5 Microhardness of forging at different regions

均晶粒尺寸较大,为200~250 μm ,且从上部到下部的微观组织分布较不均匀,最大晶粒尺寸超过500 μm 。同时可以发现,其晶粒形状为明显多边形,晶界处的第二相数量和分布较少。试样2和试样3平均晶粒尺寸显著减小,约为150 μm ,同时,整个锻件从上部到下部的晶粒分布更均匀,最大晶粒尺寸仅为300 μm ,晶粒形状趋向更加圆整,呈现出半固态组织的特性。同时,在晶粒之间的晶界部位,可以发现有更多的共晶第二相存在,这也是半固态组织的显著特征。

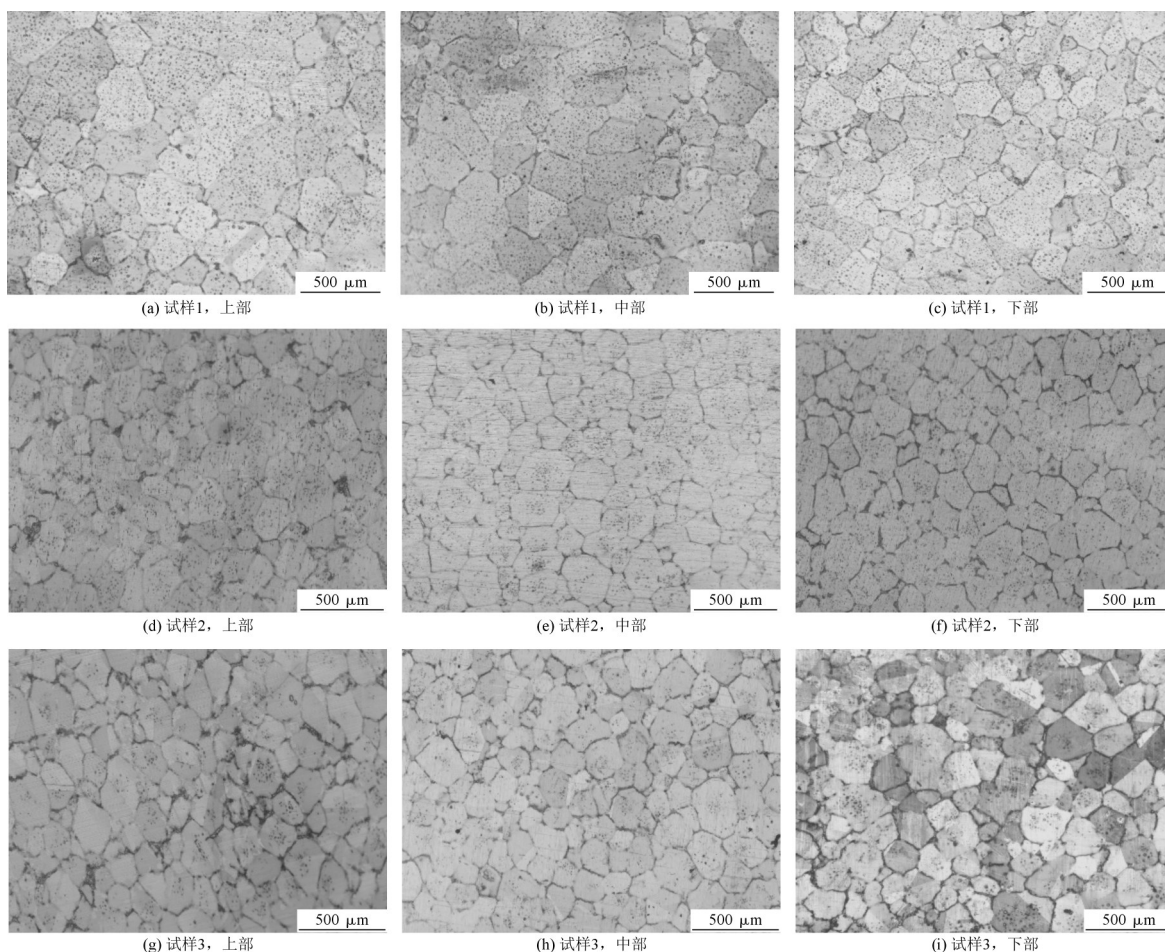


图6 试样1~3不同部位的组织

Fig.6 Structure of specimen 1~3 at different regions

由于本批次试验的热处理温度为900 $^{\circ}\text{C}$,温度较低,仅高于固相线温度30 $^{\circ}\text{C}$ 左右,因此,所得到的半固态组织中的固相含量高而共晶的液相含量很低。后续

试验中,为达到更高的液相率(比如液相含量为30%~50%),降低半固态组织中的固相含量,可提高半固态坯料的热处理温度。

此外,更高的半固态触变锻造比压可获得更加细小和均匀的半固态组织。试样 3 的锻造压力为 300 MPa,比试样 2 的高,可见试样 3 的整体微观晶粒组织更加均匀,晶粒尺寸也有细化的趋势。因此后续试验中,在设备和模具等条件允许的情况下,适当提高锻造压力也有益于获得更加细小均匀的半固态锻件微观组织。

2.2 保温温度对半固态组织形貌的影响

采用 $\phi 36.8\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ 的 ZCuSn10P1 铸坯作为原料进行试验,预压缩变形量为 15.3%,压缩后尺寸为 $\phi 40\text{ mm} \times 32.2\text{ mm}$ 。根据 DSC 曲线测定的半固态区间,设置了 5 个不同的保温温度,分别为 920、940、960、980 和 1 000 $^{\circ}\text{C}$,分别记为试样 4~8。保温 30 min,成形压力为 250 MPa。在预变形量不变的条件下,研究保温温度对触变锻造组织、性能的影响。

各试样金相组织分别见图 7。可见晶粒呈现球形,周围由液相包裹,为典型的半固态组织。晶粒内部出现了液岛,这是由于破碎的枝晶臂的合并将低熔点的共析体包裹,在随后的保温过程中,低熔点的共析体溶化在晶粒的内部形成细小液岛。横向对比每个试样的上部、中部以及下部的微观组织发现,中部和下部晶粒较为圆整,而上部晶粒呈现出一定的取向,这是由于坯料在锻造成形过程中,中部和下部的晶粒受到各方向的力的作用,变形均匀,而上部的晶粒主要受到垂直向下的力作用,晶粒沿水平面被拉长。试样 4 由于保温温度较低,晶粒分离不彻底,当温度升高至 980 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,试样 7 和试样 8 的晶粒完整,晶粒与晶粒之间没有连接。液相率在 920 $^{\circ}\text{C}$ 到 980 $^{\circ}\text{C}$ 过程中变化不大,但在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时,能够看出液相率明显增大,这是因为温度越接近液相线温度,液相率越高的缘故。

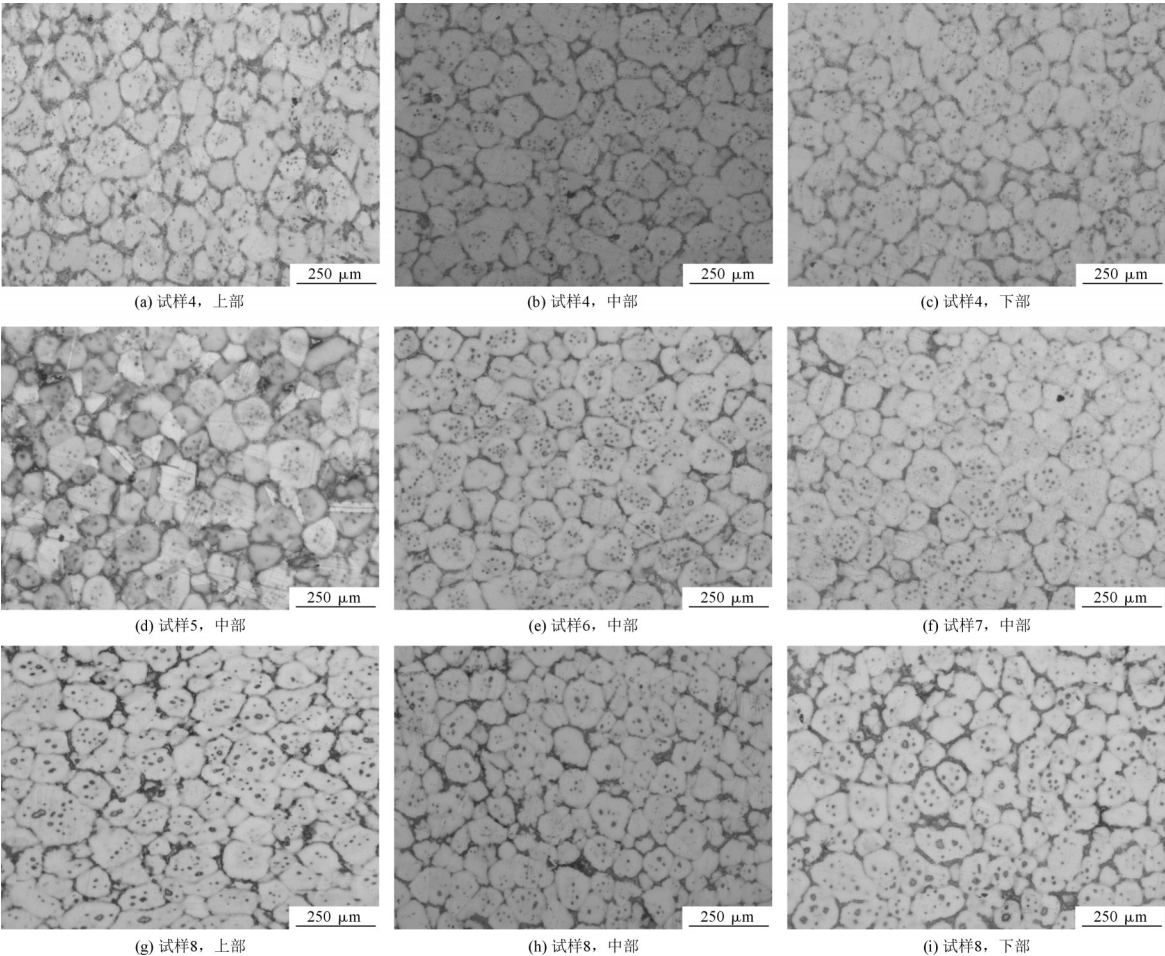


图 7 试样 4~8 不同部位的组织
Fig.7 Structure of specimen 4~8 at different regions

对保温 900 $^{\circ}\text{C}$ 变形后的试样进行扫描电镜分析,见图 8,面扫描数据对应 ZCuSn10P1 成分分析,表明经过

多道程序后,材料的成分变化不大,也未引入其他的杂质,Sn 以第二相的形式聚集在晶界处。

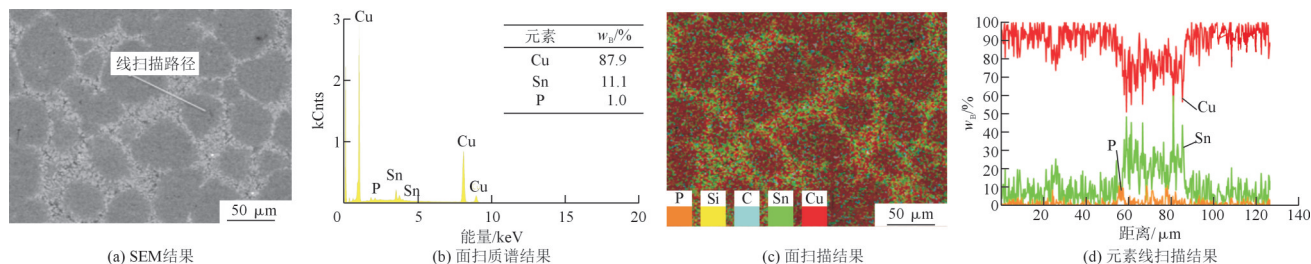


图 8 900 °C 保温变形后的试样 EDS 分析

Fig.8 Surface scanning analysis of specimens after deformation at 900 °C

2.3 保温温度对组织性能的影响

半固态组织中晶粒尺寸变化见图 9。可以看出,随着保温温度的升高,晶粒尺寸显现出先降低后增高的趋势,当保温温度为 960 °C 时,锻件的晶粒达到最小值 88.1 μm ,当保温温度继续提高至 980 和 1 000 °C 时,晶粒尺寸增大至 94.4 μm 和 102.8 μm ,晶粒长大趋势十分明显。

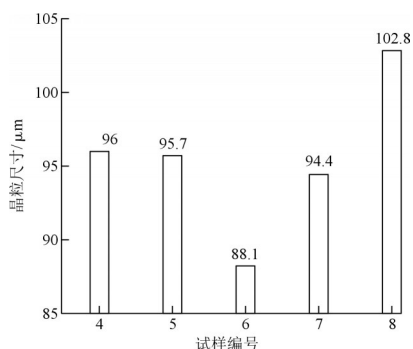


图 9 不同保温温度条件下半固态组织的晶粒尺寸

Fig.9 Grain sizes of semi-solid structures at different holding temperatures

综上,在预变形量、保温温度不变的情况下,ZCuSn10P1 合金半固态触变锻造组织的晶粒尺寸与保温温度密切相关,随着保温温度升高,晶粒尺寸有长大的趋势。

利用 ImagePro 软件计算得到的不同保温温度下,ZCuSn10P1 合金形状因子变化见图 10。可见随着保温温度的提高,合金半固态固相颗粒的形状因子显现出先增高后降低的趋势,980 °C 时形状因子达到最高值 0.93。结果表明,各温度下形状因子有规律但是差别不

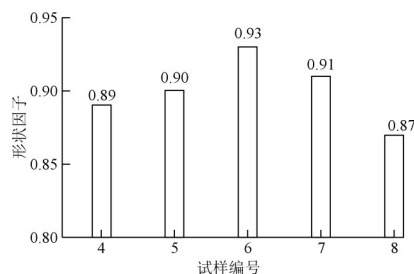


图 10 不同保温温度条件下半固态组织的形状因子

Fig.10 Shape factors of semi-solid structures at different holding temperatures

大,保温温度是半固态固相颗粒形状因子的次要影响因素。

2.4 锻件外观及三维扫描分析

使用三维激光扫描系统 HandySCAN700 对获得的半球形触变成形锻件进行三维扫描,重构锻件外形尺寸。锻件与最终成形件模型的 3D 比较见图 11,颜色越接近红色代表锻件尺寸相较成形件模型尺寸越大,颜色越接近蓝色代表锻件尺寸相较成形件模型尺寸越小(基于原图为彩色描述),可见锻件最高处红色最为明显。从顶部到底部,颜色逐渐由红变绿,代表锻件实际尺寸与模型尺寸偏差逐渐变小,成形品质越来越好,顶部 A001 处尺寸偏差为 1.692 1 mm,往底部延伸,偏差逐渐下降,从 A001 处的 1.692 1 mm 降到 A002 处的 0.855 1 mm,再降到 A003 处的 0.770 9 mm,再降到 A004 处的 0.140 4 mm。可以明显看出,越接近锻件底部,锻件尺寸相较模型偏差越小。锻件的圆度为 0.174 8 mm,即最大半径处与最小半径处相差 0.174 8 mm。

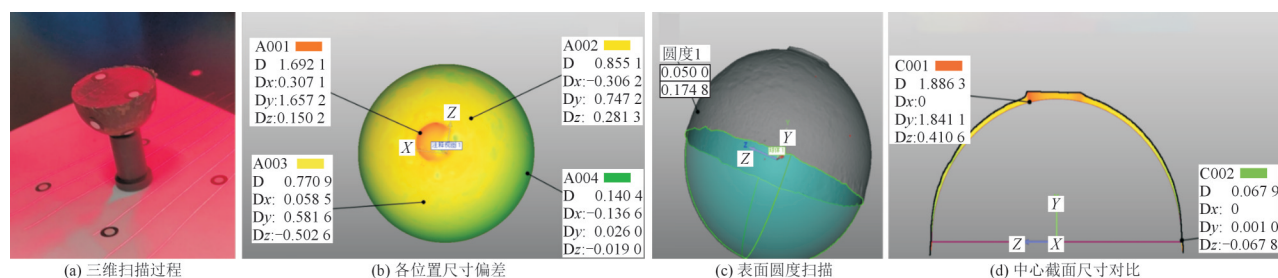


图 11 三维扫描分析结果

Fig.11 3D scanning results

3 结 论

(1)经过预压缩变形和热处理获得半固态坯料后,再进行半固态成形获得的工件平均晶粒尺寸显著减小,同时,整个工件从上部到下部的晶粒分布更均匀。同时,在更高的半固态成形压力下,可以获得更加细小和均匀的半固态组织。

(2)在预变形量、保温温度不变的情况下,铜合金半固态组织的晶粒尺寸与保温温度密切相关,随着保温温度升高,晶粒尺寸有长大的趋势。

(3)制备ZCuSn10P1合金半固态坯料较理想的SIMA法工艺参数是:预变形量为15%、保温时间为30 min时,保温温度为960~980℃,此时采用半固态触变成形工艺制备的半球形工件平均显微硬度高、晶粒尺寸小、半固态固相颗粒的圆整度高。

(4)经过三维激光扫描系统对获得的半球形触变成形锻件进行三维扫描,锻件实际尺寸与模型尺寸偏差较小,不同位置偏差均在1.7 mm以内,且半球形锻件圆度为0.174 8 mm,表明成形品质较好。

参 考 文 献

- [1] SPENCER D B, MEHRABIAN R, FLEMINGS M C. Rheological behavior of Sn-15Pb in the crystallization range[J]. Metallurgical Transactions, 1972(3-7): 1 925-1 932.
- [2] WANG Y F, ZHAO S D, ZHANG C Y. Grain refinement of aluminum alloy bar by a modified RAP process for semi-solid forming[J]. Materials Transactions, 2017, 58(2): 176-181.
- [3] WANG Y F, GUO Y, ZHAO S D, et al. Direct preparation of semi-solid billets by the semi-solid isothermal heat treatment for commercial cold-rolled ZL104 aluminum alloy [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2021, 28 (7): 1 164-1 173.
- [4] 陆常翁,肖寒,卢德宏,等. 半固态挤压成形ZCuSn10铜合金的微观组织研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (5): 486-489.
- [5] KIUCHI M, KOPP R. Mushy/Semi-solid metal forming technology-present and future [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51 (2): 653-670.
- [6] 李军. 半固态金属加工技术[J]. 中国科技信息, 2015(8): 132-133.
- [7] 毛卫民. 半固态金属成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] 康永林,毛丑民,胡壮麒. 金属材料半固态加工理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 毛卫民,赵爱民,钟雪友. 半固态金属成形应用的新进展与前景展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2002(1): 33-36.
- [10] LEE S Y, LEE J H, LEE Y S. Characterization of Al 7075 alloys after cold working and heating in the semi-solid temperature range [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111: 42-47.
- [11] 夏明许,郑红星,袁森,等. 大挤压形变 AZ91D 镁合金半固态等温组织演变[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(3): 287-290.
- [12] CAO L J, MA G R, TANG C C. Effects of isothermal process parameters on semi-solid microstructure of Mg-8Al-1Si alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2 364-

2 369.

- [13] KIRKWOOD D H. Semi-solid metal processing [J]. International Materials Reviews, 1994, 39(5): 173-189.
- [14] 谷立东,应韬,曾小勤,等. SIMA法工艺参数对6061铝合金半固态组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(4): 741-750.
- [15] CAO L J, MA G R, WANG C X. Effect of compression ratio on microstructure evolution of Mg-10Al-1Zn-1Si alloy prepared by SIMA process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (9): 2 597-2 605.
- [16] JIANG J, PAN X Y, REN Y F, et al. Mechanical properties and micro-structural of Al-Zn-Mg-Cu alloy by semi-solid SIMA processed [J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107 126.
- [17] BINESH B, AGHAIE-KHAFRI M, SHABAN M, et al. Micro-structural evolution and mechanical properties of thixoformed 7075 aluminum alloy prepared by conventional and new modified SIMA processes [J]. International Journal of Materials Research, 2018, 109 (12): 1 122-1 135.
- [18] 胡海莲,肖寒,王佳,等. 半固态ZCuSn10铜合金坯料单向压缩变形行为及显微组织 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (5): 1 193-1 199.
- [19] WANG J, LU H D, XIAO H, et al. Effect of rolling-remelting SIMA process on semi-solid microstructure of ZCuSn10 alloy [J]. Solid State Phenomena, 2014, 217-218: 418-425.
- [20] 孙震,崔黎明,张雄超,等. 预退火温度对半固态铜合金坯料组织演变和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(2): 457-464.
- [21] 任丽君,邸彤彤,王徐炳,等. SIMA法制备BCu93P铜磷钎料的半固态组织及性能研究[J]. 中国计量大学学报, 2023, 34 (1): 84-91.

(编辑:刘晨辉)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金
领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态
及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家
最新研究成果)



特种铸造及有色
合金杂志
(文章动态时刻关注)