

内浇道长度对流变挤压铸造CuSn10P1合金组织性能的影响

何子龙¹ 李永坤² 周荣锋^{1,2} 刘章兴¹ 刘 涛¹ 熊文韬¹
(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 采用熔体约束流动诱导形核装置制备 CuSn10P1 合金半固态浆料,利用自主设计的模具在液压机上进行半固态流变挤压试验,研究了内浇道长度对半固态流变挤压铸件微观组织和力学性能的影响。结果表明,随着内浇道长度增加,合金组织分布均匀程度先增加后降低,内浇道长度为 20 mm 时组织均匀性最好;当内浇道长度达 30 mm 并继续增加时,出现了明显的固、液分离现象。随着内浇道长度增加,抗拉强度和伸长率均先提高后降低,当内浇道长度为 20 mm 时,铸件的抗拉强度和塑性最佳。

关键词 Cu-Sn 合金;半固态;组织均匀性;力学性能

中图分类号 TG146.1⁺1;TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.011 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Ingate Length on the Microstructure and Properties of CuSn10P1 Alloy
by Squeeze Casting

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

Abstract: The CuSn10P1 alloy semi-solid slurry was prepared by the melt-constrained flow-induced nucleation device, and the semi-solid rheological extrusion test was carried out on a hydraulic press using a self-designed mold. The influence of the ingate length on the microstructure and mechanical properties of semi-solid rheological extrusions was investigated. The results show that as the length of the sprue increases, the uniformity of the structure is increased at first and then decreased, which presents desirable when the length of the sprue is 20 mm. When the length of the ingate reaches above 30 mm, there is an obvious solid-liquid separation phenomenon. As the length of the ingate increases, the tensile strength and elongation are increased at first and then decreased. When the length of the ingate is 20 mm, the tensile strength and plasticity of the casting are satisfied.

Key Words: Cu-Sn Alloy, Semi-solid, Uniformity of Structure, Mechanical Properties

锡青铜由于 Sn 含量不同,其性能上也有很大差异,这导致了锡青铜被广泛应用在电气、轻工、机械制造和国防工业等领域^[1]。一般来说,Sn 含量(<5%)较低的 Cu-Sn 合金塑性较好,但随着 Sn 含量增加,由于晶间硬脆相的产生,Cu-Sn 合金的强度和硬度增加,塑性变形困难但流动性好,有较好的铸造性能^[2~4]。传统铸造的 Cu-Sn 合金铸件容易产生气孔、裂纹和偏析等缺陷,离心铸造和连续铸造由于冷却速度快,可以获得更优异的性能,但其生产铸件的形状受到限制^[5,6]。半固态流变成形技术具有短流程、高效率的特点,受到了国内外的广泛关注^[7~9]。

锡青铜合金固、液相线温度区间大,易于进行半固

态挤压成形。WANG Q 等^[10]研究了等温压缩试验制备的半固态 CuSn10P1 合金的热变形行为,发现随着动态再结晶增加,低角度晶界逐渐转变为 $\Sigma 3$ 孪晶界显微组织的变化表明,在热变形过程中,Cu-Sn 合金发生了连续和不连续的动态再结晶。LI Y K 等^[11]通过封闭冷却斜面通道(简称 ECSC)和类似的坩埚等温收集,对 CuSn10P1 合金进行了熔体冷却阶段控制,同时研究了 CuSn10P1 合金的显微组织及元素分布。肖寒等^[12]采用触变挤压工艺成形 ZCuSn10P1 合金轴套零件,研究了成形压力对触变挤压铜合金力学性能的影响。结果表明,成形压力与抗拉强度和伸长率的函数关系分别近似为抛物线和幂指数形式。

收稿日期:2021-11-12;修改稿收到日期:2022-01-20
基金项目:云南省博士后研究资助项目(109820190068);云南省教育厅科学研究基金资助项目(2021J0049)
第一作者简介:何子龙,男,1996 年出生,硕士研究生,昆明(650500),E-mail:1176631374@qq.com
通信作者:周荣锋,男,1969 年出生,教授,昆明(650500),E-mail:zhoufchina@hotmail.com
引用格式:何子龙,李永坤,周荣锋,等. 内浇道长度对流变挤压铸造 CuSn10P1 合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):843-846.
HE Z L, LI Y K, ZHOU R F, et al. Effects of ingate length on the microstructure and properties of CuSn10P1 alloy by squeeze casting[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):843-846.

本课题利用自主设计的模具在液压机上进行半固态挤压试验,在不同内浇道长度下制备了 CuSn10P1 合金半固态挤压铸件,研究了内浇道长度对半固态流变挤压铸造 CuSn10P1 合金微观组织和力学性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 CuSn10P1 合金,成分见表 1。将 CuSn10P1 合金放入中频感应炉内熔炼,温度达到 1 200 ℃后进行除气除渣等净化工艺处理,空冷,静置至 1 080 ℃后倒入熔体约束流动诱导形核通道^[11],在通道周围输入循环冷却水。CuSn10P1 熔体受到整体过冷,促使熔体在通道内壁上爆发性异质形核和熔体内部爆发性均匀形核,从而制得半固态浆料。图 1 为熔体约束流动诱导形核装置示意图^[13],熔体处理通道材质为 45 号钢,冷却通道长度为 300 mm,熔体约束通道横截面尺寸为 100 mm×5 mm;冷却通道四周循环水流量为 600 L/h,冷却通道激冷板厚为 5 mm,冷却通道与水平面夹角为 45°。通道下方放有预热至 990 ℃的石墨坩埚,用来收集通过熔体约束流动诱导形核通道的半固态浆料并进行短时间的类等温处理,等温处理温度为 990 ℃,时间约为 20 s。将等温处理的半固态浆料快速浇入已经预热至 500 ℃的模具中,在 KY32-200K 型底注式液压机上,以 100 MPa 的成形比压、25 mm/s 的挤压速率进行挤压充型,在该压力下保压 10 s,最后开模取出零件空冷至室温,得到不同内浇道长度的半固态挤压铸件,成形零件见图 2。在不同内浇道长度的挤压铸件充

表 1 CuSn10P1 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of CuSn10P1 alloy %			
w_B			
Sn	P	其他微量元素	Cu
10.22	0.71	0.17	余量

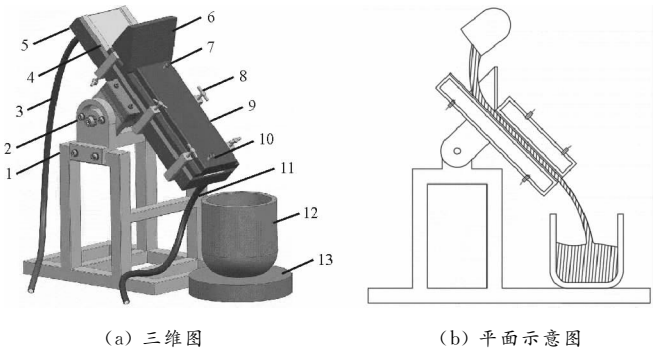


图 1 熔体约束流动诱导形核通道示意图
Fig.1 Schematic diagram of melt-constrained flow-induced nucleation channel

1.支撑架 2.角度调节器 3,7.出水口 4.冷却板 5.下水槽 6.储液室 8.紧固装置 9.上水槽 10,11.进水口 12.坩埚 13.底座

型起始端、中段、末端位置分别取 10 mm×10 mm×5 mm 的方块试样,用砂纸将试样打磨,机械抛光后用浓度为 5% 的 FeCl₃ 溶液腐蚀,通过 Nikon ECLIPSE MA200 金相显微镜(OM)观察试样的宏观组织,在不同内浇道长度的挤压铸件的充型起始端和末端截取试棒并加工成直径为 3 mm、平行段长度为 18 mm 的拉伸试样,见图 3。在拉伸试验前进行打磨处理,以减少试棒表面的影响。在岛津 AG-Xplus100KN 型号拉伸试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/min。

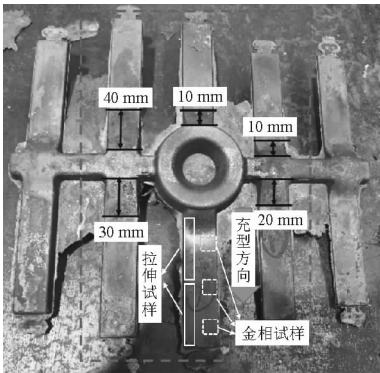


图 2 零件实物图及拉伸试样、金相试样取样位置图
Fig.2 Diagram of parts and sampling locations of tensile specimens and metallographic specimens

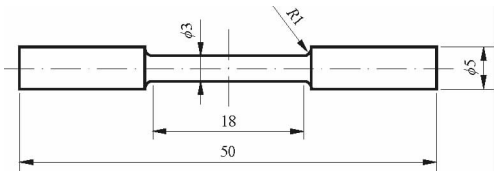


图 3 拉伸试样尺寸
Fig.3 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 内浇道长度对显微组织的影响

不同内浇道长度下 CuSn10P1 合金半固态流变挤压铸件沿充型方向上的显微组织变化见图 4。可以看出,铸件的显微组织均由初生 α -Cu 和晶间($\alpha + \delta + Cu_3P$)相组成,其中初生 α -Cu 全为等轴晶或蠕虫状晶。对不同内浇道长度下 CuSn10P1 合金半固态挤压铸件组织对比可知,随着内浇道长度增加,组织分布均匀程度先增加后降低。当内浇道长度为 30 mm 并继续增加时,出现了明显的固、液分离现象。当内浇道长度为 10 mm 时,铸件充型末端的显微组织保持了半固态浆料^[14]的特征(见图 4c);铸件充型中段的显微组织出现了粘连合并长大的现象,颗粒之间还存在着一些液相凝固形成的细小枝晶(见图 4b);铸件充型起始端显微组织粘连现象更加严重,这些粘连可能是液相中直接形

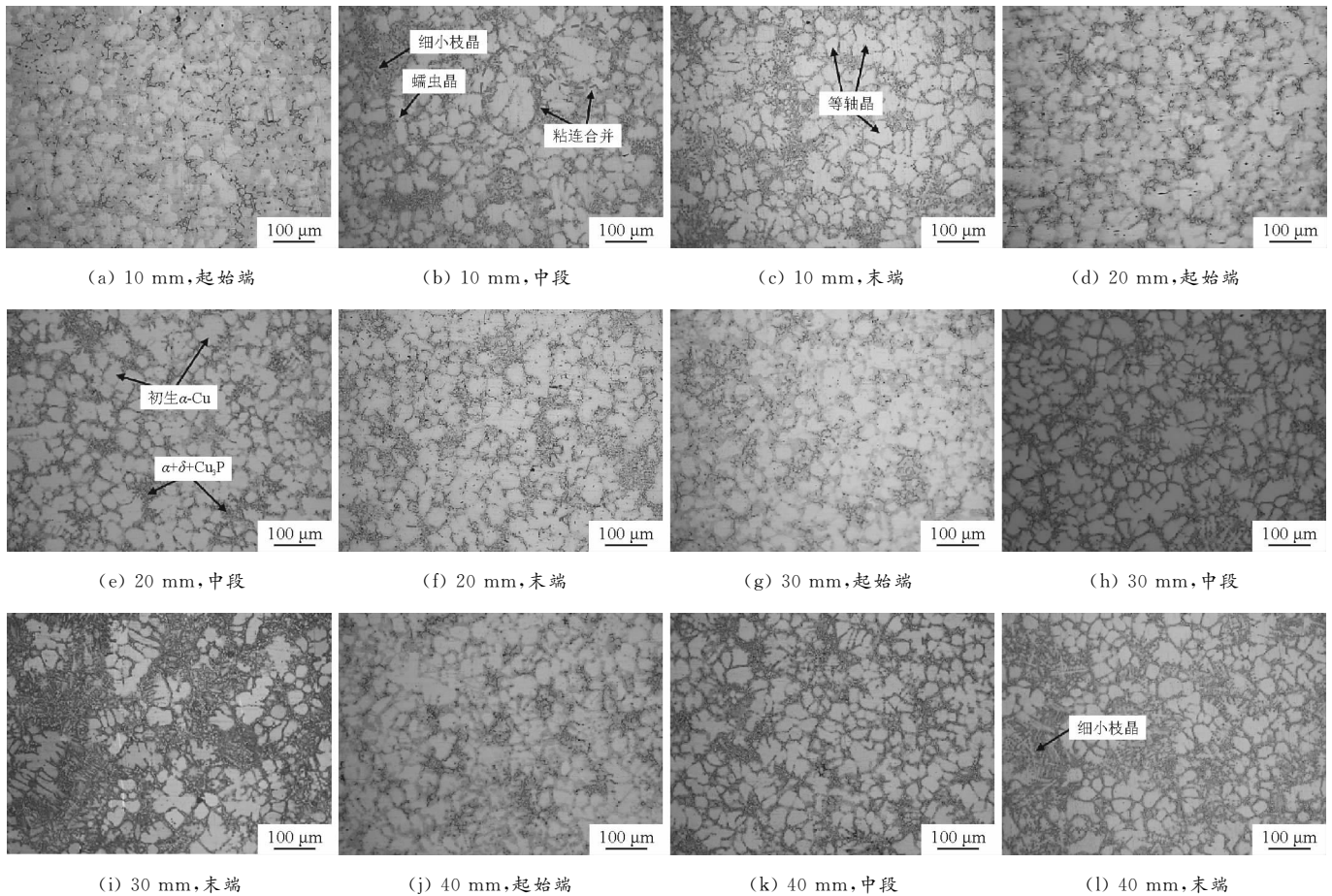


图 4 不同内浇道长度下 CuSn10P1 合金半固态挤压铸件沿充型方向上的显微组织

Fig.4 The microstructure of semi-solid extrusion castings with different ingate lengths along the filling direction

核的二次晶粒长大造成的。另外,此处熔体凝固时间长和熔体温度高,凝固后的组织中存在少量的缩孔、缩松等缺陷(见图 4a)。当内浇道长度进一步增加(20 mm)时,显微组织形貌的一致性有所提高,以等轴状组织为主,蠕虫状显微组织减少(见图 4d~图 4f)。当内浇道长度增加到 30 mm 或 40 mm 时,半固态浆料在内浇道内流动时间长,型腔壁对熔体的激冷促使熔体内二次形核并使熔体温度降低,半固态浆料的流动性下降,充型过程中液相流动性好,会优先流动,带动固相一起充型的能力减弱,导致铸件充型末端初生 α -Cu 较少,液相较多,凝固后出现了细小枝晶组织(见图 4i、图 4l);铸件充型中段组织与半固态浆料保持一致(见图 4h、图 4k),而铸件充型起始端初生 α -Cu 较多且尺寸较大,出现了严重的粘连和合并长大现象,原因可能是内浇道长度太长,使半固态浆料温度下降,初生 α -Cu 颗粒在进入成型件入口处塞积,塞积的初生 α -Cu 之间就合并长大和通过自身周围的元素扩散长大(见图 4g、图 4j)。

2.2 内浇道长度对力学性能的影响

不同内浇道长度下 CuSn10P1 合金半固态挤压铸件的力学性能见图 5。可以看出,随着内浇道长度从 10

mm 增加到 40 mm,CuSn10P1 合金半固态挤压铸件的抗拉强度和伸长率均呈先增加后降低的趋势。当内浇道长度为 20 mm 时性能最佳。内浇道长度从 10 mm 增加到 20 mm 时,铸件充型末端和起始端的抗拉强度分别从 374.9 MPa 和 389.4 MPa 增加至 396.4 MPa 和 419.2 MPa,分别提升了 7.7% 和 5.7%;伸长率从 10.56% 和 10.88% 提升至 12.78% 和 13.33%,分别提升了 22.5% 和 21.0%。内浇道长度增加至 30 mm 时,充型末端和起始端的抗拉强度分别为 358.3 MPa 和 396.7 MPa,分别提升了 7.7% 和 5.7%;伸长率从 10.56% 和 10.88% 提升至 12.78% 和 13.33%,分别提升了 22.5% 和 21.0%。内浇道长度增加至 40 mm 时,充型末端和起始端的抗拉强度分别为 352.1 MPa 和 384.0 MPa,分别提升了 7.7% 和 5.7%;伸长率从 10.56% 和 10.88% 提升至 12.78% 和 13.33%,分别提升了 22.5% 和 21.0%。

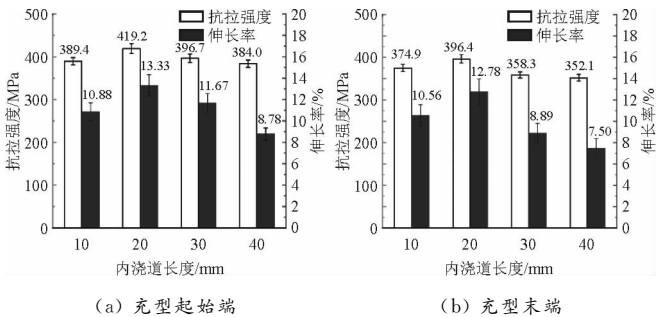


图 5 不同内浇道长度下 CuSn10P1 合金半固态挤压铸件的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of CuSn10P1 alloy semi-solid extrusion castings with different ingate lengths

MPa, 相比于 20 mm 时分别降低了 10.6% 和 5.4%; 伸长率为 8.89% 和 11.67%, 相比于 20 mm 时分别降低 43.8% 和 12.5%。内浇道长度增加至 40mm 时, 充型末端和起始端的抗拉强度为 352.1 MPa 和 384.0 MPa, 相比于 20 mm 时分别降低了 11.2% 和 8.4%; 伸长率为 7.50% 和 8.78%, 相比于 20 mm 时分别降低了 41.3% 和 34.1%。

增加内浇道长度可以增加 CuSn10P1 合金半固态浆料在内浇道内的流动距离和时间, 半固态浆料受到内浇道型腔壁激冷作用时间延长, 使半固态浆料的温度降低, 充型过程中熔体的稳定流动性提高, 降低了卷气的可能, 有利于提高铸件的致密性进而提升铸件的力学性能。当内浇道过长时(>20 mm), 导致半固态浆料的粘度过大, 流动性降低, 在压力作用下, 半固态浆料内的液相就会带动部分固相优先充型, 形成铸件末端固相少而前段固相多的现象, 导致铸件力学性能的差异。在 4 种内浇道长度下, 铸件的抗拉强度和伸长率都存在充型起始端高于充型末端的现象。当内浇道长度短于 30 mm 时, 铸件充型起始端和末端的抗拉强度和塑性差值都在 6% 以内, 表明内浇道长度在一定范围内时, 铸件整体性能相对比较均匀, 这归因于显微组织的均匀性。而内浇道长度达到 30 mm 并继续增加时, 铸件充型起始端和末端的抗拉强度差值较大, 达到 9% 以上, 这是显微组织不均匀导致的。

3 结 论

(1) 内浇道长度影响 CuSn10P1 合金半固态挤压铸件显微组织的均匀性, 内浇道长度在 20 mm 以内时, 随着内浇道长度增加, 铸件具有均匀分布的组织形态, 而当内浇道长度达 30 mm 并继续增加时, 铸件的显微组织沿充型方向出现了不均匀分布, 导致铸件组织产生固、液分离的现象。

(2) CuSn10P1 合金半固态挤压铸件的组织分布均匀性很大程度上影响其力学性能。随着内浇道长度增加, 抗拉强度和伸长率均先增加后降低, 当内浇道长度为 20 mm 时, 铸件的抗拉强度和塑性最佳。

参 考 文 献

- [1] MAO Z, ZHANG D Z, JIANG J, et al. Processing optimisation, mechanical properties and microstructural evolution during selective laser melting of Cu-15Sn high-tin bronze[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A721: 125-134.
- [2] SCUDINO S, UNTERDÖRFER C, PRASHANTH G, et al. Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze[J]. Materials Letters, 2015, 156: 202-204.
- [3] SOS M, KIM K Y, LEE S J, et al. Effects of Sn content and hot deformation on microstructure and mechanical properties of binary

high Sn content Cu-Sn alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A796: 140 054.

- [4] TAVAKOLI A, LIU R, WU X J. Improved mechanical and tribological properties of tin-bronze journal bearing materials with newly developed tribology alloy additive[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A489(1-2): 389-402.
- [5] LASHKARI O, GHOMASHCHI R. The implication of rheology in semi-solid metal processes: An overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1-3): 229-240.
- [6] PARK J S, PARK C W, LEE K J. Implication of peritectic composition in historical high-tin bronze metallurgy[J]. Materials Characterization, 2009, 60(11): 1 268-1 275.
- [7] CAO M, WANG Z, ZHANG Q. Microstructure-dependent mechanical properties of semi-solid copper alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 715: 413-420.
- [8] LUO S J, KEUNG W C, KANG Y L. Theory and application research development of semi-solid forming in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1 805-1 814.
- [9] NAFISI S, LASHKARI O, GHOMASHCHI R, et al. Microstructure and rheological behavior of grain refined and modified semi-solid A356 Al-Si slurries[J]. Acta Materialia, 2006, 54(13): 3 503-3 511.
- [10] WANG Q, ZHOU R, LI Y, et al. Characteristics of dynamic recrystallization in semi-solid CuSn10P1 alloy during hot deformation[J]. Materials Characterization, 2020, 159: 109 996.
- [11] LI Y K, ZHOU R F, LI L, et al. Microstructures formation, distribution of tin element and properties of CuSn10P1 alloy during controlled by melt cooling[J]. Materials Research Express, 2018, 5(6): 066 517.
- [12] 肖寒, 段志科, 李乃拥, 等. 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.
- [13] XIONG W, ZHOU R, LIU Z, et al. Research on neural network genetic algorithm optimization in the preparation of CuSn10P1 semi-solid slurry with the fully enclosed melt-constrained cooling inclined plate[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2021, 15(3): 26-32.
- [14] LI Y, YU X, ZHOU R, et al. Microstructure evolution and coarsening kinetics of semi solid CuSn10P1 alloy under short-time isothermal treatment[J]. Materials Research Express, 2021, 8(4): 046 535.

(编辑: 张正贺)

青海推出 11 个铝相关重点招商项目

近日, 青海省工信厅编制完成《2022 年青海省招商引资项目手册》, 推出 3 大类 287 个重点招商项目, 总投资额为 3 770 亿元, 涉及新能源、新材料、文化旅游、农牧业产业化、生物医药、节能环保等重点行业领域。

其中涉及 11 个铝相关项目, 分别是年产 30 万 t 铝锂合金项目、年产 10 万套镁铝合金压铸件制造项目、年产 5 万 t 锂电池用电子铝箔项目、年产 10 万套锂电池包铝合金壳体项目、包装用铝箔项目、年产 5 万 t 铝箔项目、年产 60 万 t 铝合金高精板带项目、汽车结构件用 A356.2 铝合金锭坯项目、工业用型材项目、民用及市政用型材项目和航空板材深加工项目。

(摘自青海工信厅)