

半固态挤压铸造铜合金的组织 and 力学性能

李乃拥¹, 肖 寒^{1,2}, 熊 迟¹, 卢德宏¹, 周荣锋¹, 蒋业华¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

(2. Centre for Precision Manufacturing, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK)

摘 要: 以半固态 ZCuSn10P1 铜合金为研究对象, 自主设计了 1 套 1 模 4 件挤压模具并进行了半固态挤压铸造成形实验, 研究了成形比压和挤压速率对半固态 ZCuSn10P1 铜合金挤压铸造组织和性能的影响规律。结果表明: 当成形比压由 180 MPa 增加到 250 MPa 时, 半固态铜合金平均晶粒直径逐渐减小, 由 89.25 μm 减小至 77.96 μm , 液相率由 36.7% 减少至 22.3%, 抗拉强度由 318 MPa 增加至 387 MPa, 提高了 21.70%, 延伸率由 4.2% 降至 2.8%; 当挤压速率由 11 mm/s 增加至 15 mm/s 时, 固相晶粒圆整度由 1.54 减小至 1.32, 此时抗拉强度由 368 MPa 增加至 387 MPa, 提高了 5.16%, 延伸率由 3.3% 降低至 2.8%。

关键词: 铜合金; 半固态; 挤压铸造; 组织演变; 力学性能

中图分类号: TG146.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)09-2813-08

金属半固态成形技术是对处于固液两相温度区间的金属浆料进行成形的方法^[1,2]。与传统铸造和锻造相比, 它的材料综合利用率较高, 可以成形形状复杂且精度和性能质量要求较高的零件^[3,4]。作为 21 世纪最具发展前景的成形技术之一, 其短流程、高效率等优点, 对于节约资源和保护环境有着重要的指导意义^[5,6]。特别是军工、航空航天和汽车等工业领域对于半固态成形技术的应用越来越多^[7-10]。该技术主要有流变成形^[11]和触变成形^[12]。其中, 流变成形是利用在金属凝固过程中破碎枝晶后制得的半固态浆料直接进行成形加工, 可实现快速成形。

目前, 关于金属半固态成形技术的研究大多集中在镁、铝合金等一些低熔点金属^[13-15], 铜合金半固态成形研究始于 20 世纪 70 年代, Flemings 和 Young^[16]等采用机械搅拌制备了晶粒直径约 100 μm 的 C905 铜合金半固态浆料, 并采用高温连续流变铸造装置成形了 C905 铜合金零件。Liu^[17]等人制备了一种含连续柱状晶的铜锡合金, 该合金抗拉强度和延展性大大提高, 耐腐蚀性能提高 15 倍, 导电率提高 12.2%。Cao^[18,19]等人采用旋锻技术制备半固态铜合金浆料, 研究了铸态铜合金和半固态铜合金的力学行为和组织演变规律, 发现半固态样品的刚度和强度随着微观晶粒尺寸的减小而增加, 而且具有球状晶的半固态铜合金的强度高

于具有枝晶组织铸态铜的强度。本实验以某高铁用铜合金轴套零件为研究对象^[20], 采用半固态方法成形零件。铜合金轴套零件的生产, 通常采用液态成形或离心铸造等成形方式。液态成形时, 需要造型、浇注等, 成形工艺繁琐, 容易出现夹杂、氧化等问题; 离心铸造得到的组织不均匀, 容易出现缩孔、缩松等缺陷。采用半固态流变挤压铸造可以很好的避免以上诸多问题, 半固态流变挤压铸造, 不仅可以提高产品的综合性能, 而且尺寸精度高, 产品表面质量好^[21,22]。

本工作以 ZCuSn10P1 铜合金为研究对象, 利用自主设计的 1 套 1 模 4 件挤压模具在液压机上进行 1 模 4 件半固态挤压成形实验, 研究成形比压和挤压速率对半固态 ZCuSn10P1 铜合金挤压铸造组织和性能的影响规律, 为铜合金半固态成形工艺提供参考价值, 拓展半固态成形技术的应用领域。

1 实 验

实验材料为 ZCuSn10P1 铜合金, 合金的化学成分 (质量分数, %) 为: Cu 87.65, Sn 9.87, P 1.21, 其他元素含量 1.27。采用差示扫描量热法 (DSC), 利用 STA449F3 同步热分析仪测量 ZCuSn10P1 铜合金的固相线温度为 876.1 $^{\circ}\text{C}$, 液相线温度为 1024.2 $^{\circ}\text{C}$, 固-液区间宽度为 148.1 $^{\circ}\text{C}$, 适合于制备半固态浆料并进

收稿日期: 2017-09-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51665024); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20125314120013); 云南省应用基础研究重点项目 (2011FA007) 和面上项目 (2014FB131)

作者简介: 李乃拥, 男, 1992 年生, 博士, 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093, 电话: 0871-65136755, E-mail: 503419195@qq.com

行半固态成形。实验方法：首先对坯料进行多向多道次冷轧，累积变形量15%，然后将冷轧后的坯料线切割为多个质量相等的小试样，并放入箱式电阻炉加热至920 ℃，保温30 min，获得半固态铜合金浆料。最后在160 t 四柱液压机上进行挤压成形实验，具体的工艺参数见表1。此外，将1180℃精炼处理后的铜合金液直接进行液态挤压，并与半固态挤压零件组织和性能进行对比。

图1为试样形状及金相和拉伸试样取样位置及尺寸。使用Leica光学显微镜观察金相组织，并借助Image-Pro Plus图像分析软件计算铜合金组织中的液相分数、平均晶粒直径及形状因子，以表征和分析不同工艺条件下铜合金微观组织。采用10 t液压式万能试验机，对挤压件进行室温单向拉伸试验，应变速率为0.001 s⁻¹。每个流变挤压工艺参数进行3次拉伸实验，实验结果取平均值。采用Hitachi S-3400N扫描电镜（SEM）分析拉伸试样断口形貌，分析断裂方式。

2 结果与讨论

2.1 铜合金成形件形貌及其微观组织

液态挤压和半固态挤压铜合金宏观形貌和微观组织如图2所示。图2a为液态ZCuSn10P1铜合金挤压成形件及其微观组织。由图2a可知，挤压件下端部出

现冷隔、裂纹等缺陷，导致挤压件表面质量较差，无法满足使用要求，其组织为典型的铸态枝晶组织，组织粗大。其中，枝晶组织主要为 α 相，它是 Sn 在 Cu 中的固溶体，其晶体结构为面心立方晶格。枝晶外分布着的组织为(α+δ+Cu₃P)共析组织。图 2b 为成形比压 250 MPa、挤压速率 15 mm/s 时半固态挤压 ZCuSn10P1 铜合金件及其微观组织。由图 2b 可知，挤压件表面光洁，无裂纹，无收缩孔洞，零件近终成形。其组织为典型半固态组织，近球状晶粒为 α-Cu 固相，球状晶粒之间的黑色组织为(α+δ+Cu₃P)共析体，在高温时表现为液相。经计算，其液相率为 32.4%，平均晶粒直径为 88.6 μm，形状因子为 1.54，固相晶粒分布均匀，半固态球化效果较好。

图 3 是在成形比压为 250 MPa、挤压速率为 15 mm/s 条件下不同型腔挤压件宏观形貌及其微观组织。图 3a 为 1 模 4 件模具 4 个不同型腔位置，图 3b 为对应不同型腔位置挤压件宏观形貌。在相同工艺条件下制得半固态浆料，将半固态浆料倒入模具的 4 个型腔，保证半固态浆料倒入模具每个型腔的质量相同、时间相同、模具预热温度相同，然后在相同挤压工艺参数下进行流变挤压成形，可在一次挤压过程中得到 4 个相同零件，相比于一腔一模，效率提高了 4 倍。由图 3b 可知，相同工艺挤压成形得到的轴套零件外观质量较好且 4 个零件完全相同、一致性较好，表明采用 1 模 4 件模具进行半固态挤压成形可以得到表面成形质量较好且完全一致的 4 个零件。图 3c~3f 分别对

表 1 半固态铜合金挤压工艺参数
Table 1 Extrusion process parameters of semi-solid copper alloy

Sample	Forming specific pressure/MPa	Extrusion rate/mm·s ⁻¹
1	180	15
2	200	15
3	250	15
4	250	13
5	250	11

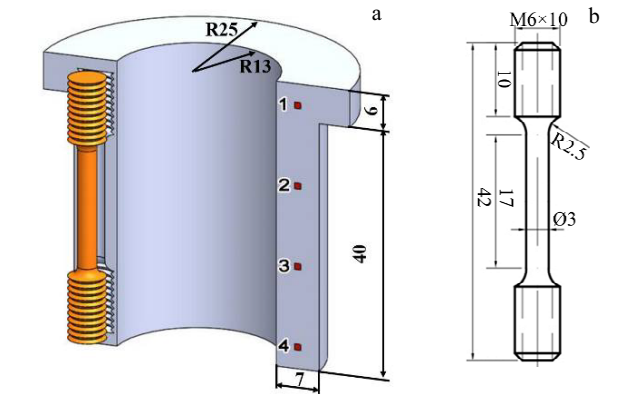


图 1 金相取样位置和拉伸试样取样位置及其尺寸
Fig.1 Sampling location of metallography and tensile sample (a) and its dimensions (b)

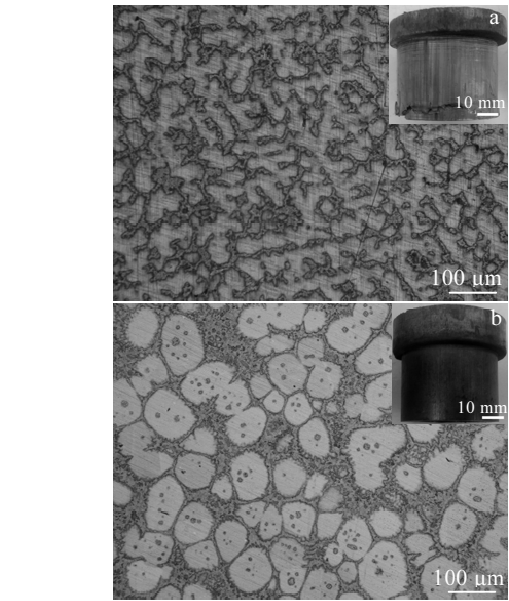


图 2 液态和半固态挤压铜合金件形貌及其微观组织
Fig.2 Morphology and microstructure of copper alloy extrusion parts: (a) liquid forming and (b) semi-solid forming

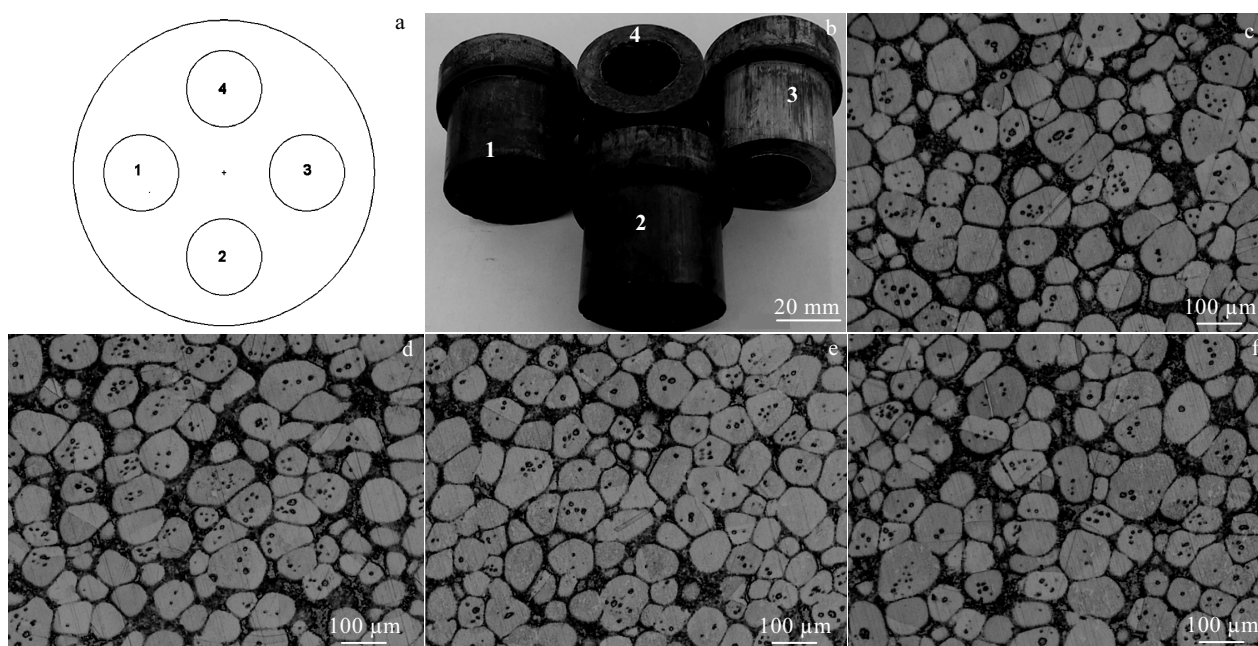


图3 不同型腔挤压件型腔示意图、宏观形貌及微观组织

Fig.3 Macro morphology and microstructure of different extrusion parts: (a) diagram of cavity; (b) macro morphology of extrusion parts; microstructures of extrusion part from cavity 1 (c), cavity 2 (d), cavity 3 (e), and cavity 4 (f)

应型腔 1、2、3、4 四个挤压件图 1b 取样位置 2 处的显微组织, 由图 3c~3f 可以看出, 在相同挤压工艺条件下, 一次成形得到的 4 个挤压件, 内部组织基本一致, 均为液相包裹近球形固相晶粒的半固态组织。经过计算可知, 4 个挤压件位置 2 处组织中的液相率分别为 19.5%, 21.2%, 19.3%, 22.9%, 液相率最大差异 3.6%; 平均晶粒尺寸分别为 85.2, 89.4, 84.3, 88.2 μm , 平均晶粒尺寸最大差异 5.1 μm , 形状因子分别为 1.57, 1.65, 1.64, 1.59, 其最大差异 0.08, 因此, 可知在 1 模 4 件模具半固态挤压得到的 4 个轴套零件组织几乎无差异, 表明其组织均匀性较好。

2.2 流变挤压工艺对挤压件组织的影响

图 4 是液态挤压和半固态挤压成形铜合金轴套零件的扫描电镜照片。图 4a 为液态挤压铜合金微观组织, 由图 4a 可知, 液态挤压铜合金微观组织呈粗大枝晶状, 枝晶组织相互连接均匀分布。图 4b 为半固态挤压铜合金微观组织, 由图 4b 可知, 半固态铜合金微观组织是由液相包裹近球状固相晶粒组成, 在扫描电子显微镜下, 可以直观清晰地观测到固、液两相分布及其微观形貌。从图 4b 可以看到 $\alpha\text{-Cu}$ 固相晶粒周围由液相包裹, 液相组织由网状结构的富 P 相和松枝状结构的富 Sn 相组成, 构成半固态骨架结构。

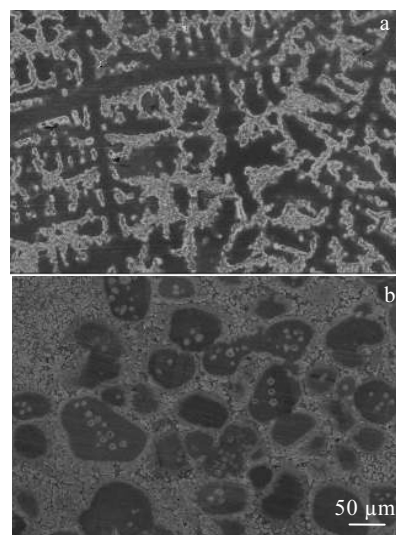


图4 液态挤压和半固态挤压铜合金扫描电镜照片

Fig.4 SEM images of liquid (a) and semi-solid (b) extruded Cu alloys

图 5 是挤压速率 15 mm/s、成形比压分别为 180, 200, 250 MPa 时半固态铜合金挤压件不同部位的显微组织。半固态挤压可以减少半固态浆料凝固过程中因体积收缩产生的缩孔、缩松等缺陷, 从而获得组织致

密均匀, 性能良好的零件。实验发现, 浆料的充型能力会随着成形比压的增大而提高。由图 5 可知, 从整体上来看, 在不同成形比压条件下, 半固态组织固相晶粒近球形, 圆整度较高, 组织相对均匀。在位置 1 处, 半固态浆料在挤压过程中, 直接与模具凸模接触, 由于模具温度与凸模温度相比于半固态浆料温度较低, 当半固态浆料转移到模具凹模开始挤压时, 存在较大温差, 半固态浆料受激冷作用, 过冷度增加, 快速凝固形核。在位置 2、3 处, 随着充型的进行, 浆料受挤压力向下移动, 要想使浆料能够充型完整, 成形比压就要克服半固态浆料凝固过程中产生的变形抗力和半固态浆料的流变临界切应力。在位置 4 处, 相比于位置 1、2、3 可以发现, 由上往下, 液相率呈上升趋势。一方面, 由于半固态浆料重熔保温时, 低熔点的共析组织先熔化, 在浆料转移至模具凹模过程中,

熔化的低熔点液相先于固相转移至模具底端, 造成下部液相增多; 另一方面, 在充型挤压过程中, 液相由于受到其自身重力作用, 同时受到向下的挤压力, 液相比固相流速快, 先于固相向下流动, 液固两相开始分离, 液相快速挤压到底端, 底端液相升高。经计算, 当成形比压由 180 MPa 增加到 250 MPa 时, 半固态铜合金固相晶粒平均直径逐渐减小, 由 $89.25\ \mu\text{m}$ 减小至 $77.96\ \mu\text{m}$, 液相率由 36.7% 减少至 22.3%。

图 6 是在成形比压 250 MPa、挤压速率为 11, 13, 15 mm/s 下半固态铜合金不同部位的显微组织, 取样位置如图 1 所示。流变挤压铸造充型过程是一个半固态浆料连续冷却的过程, 增大挤压速率, 将缩短挤压时间, 半固态浆料温降较小, 浆料流动性则较好, 因此, 充型能力较好, 从而保证充型完整。实验发现, 浆料的充型能力会随着挤压速率的增大而提高。

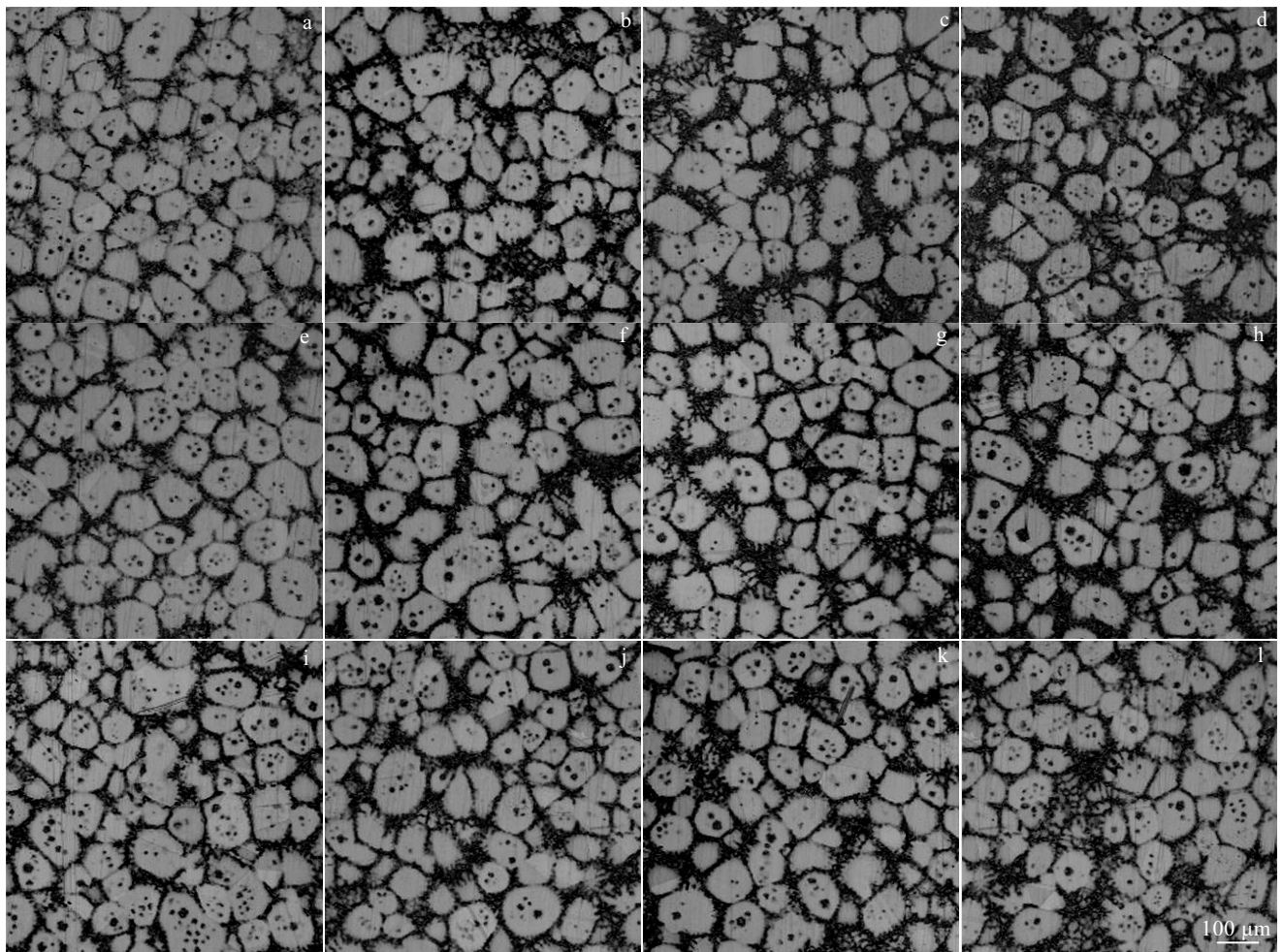


图 5 不同成形比压时半固态铜合金显微组织

Fig.5 Microstructures of semisolid copper alloy at forming specific pressure of 180 MPa (a~d), 200 MPa (e~h), 250 MPa (i~l): (a, e, i) location 1, (b, f, j) location 2, (c, g, k) location 3, and (d, h, l) location 4

从图6可知,从整体上来看,半固态组织固相晶粒圆整度较高,但随着挤压速率增加,晶粒尺寸逐渐降低,液相率逐渐降低。挤压铸造时,其凝固过程主要是初生固相颗粒的长大以及浆料中剩余液相的凝固。当挤压速率较低时,浆料充满型腔时间延长,液相会有充足时间从固相中分离出来,液相先于固相流到型腔底端,在底端大量聚集,产生液相偏聚。在位置1处,由于靠近凸模位置,浆料受激冷作用,凝固形核,固相率较高,颗粒圆整度随着挤压速率增加而减小。在位置2、3处,随着挤压速率增加,平均晶粒直径和形状因子逐渐减小。在位置4处,当挤压速率为11 mm/s时,组织中出现液相聚集现象,挤压速率低,浆料充型过程延长,晶粒之间剪切速率降低,液相流动所受到的变形阻力降低,更容易流动,彼此聚集在一起;当挤压速率增加到15 mm/s时,晶粒之间相互剪切作用增加,通常,随着剪切速率的增加,固相晶粒尺寸会逐渐减小。经计算,

当挤压速率由11 mm/s增加至15 mm/s时,固相晶粒圆整度由1.54减小至1.32,颗粒圆整度越小,表明晶粒圆整度越高,组织越均匀。

2.3 流变挤压工艺对挤压件性能的影响

图7为不同挤压工艺参数半固态ZCuSn10P1铜合金挤压件力学性能。当挤压速率相同时,随着成形比压增加,抗拉强度增加,延伸率逐渐降低。当成形比压由180 MPa增加至250 MPa时,抗拉强度由318 MPa增加至387 MPa,提高了21.70%,延伸率由4.2%降至2.8%。半固态铜合金充型过程中,充型压力对于半固态浆料组织变形有重要影响。一方面,增大充型压力,增大了半固态组织变形程度,组织由疏松变得致密;同时,充型过程中位错数量增加,位错的存在,起到一定强化作用,位错相互交割,引起位错缠结,阻碍了晶粒塑性变形,引起加工硬化,从而提高了强度。所以随着成形比压的增加,抗拉强度随之增加。

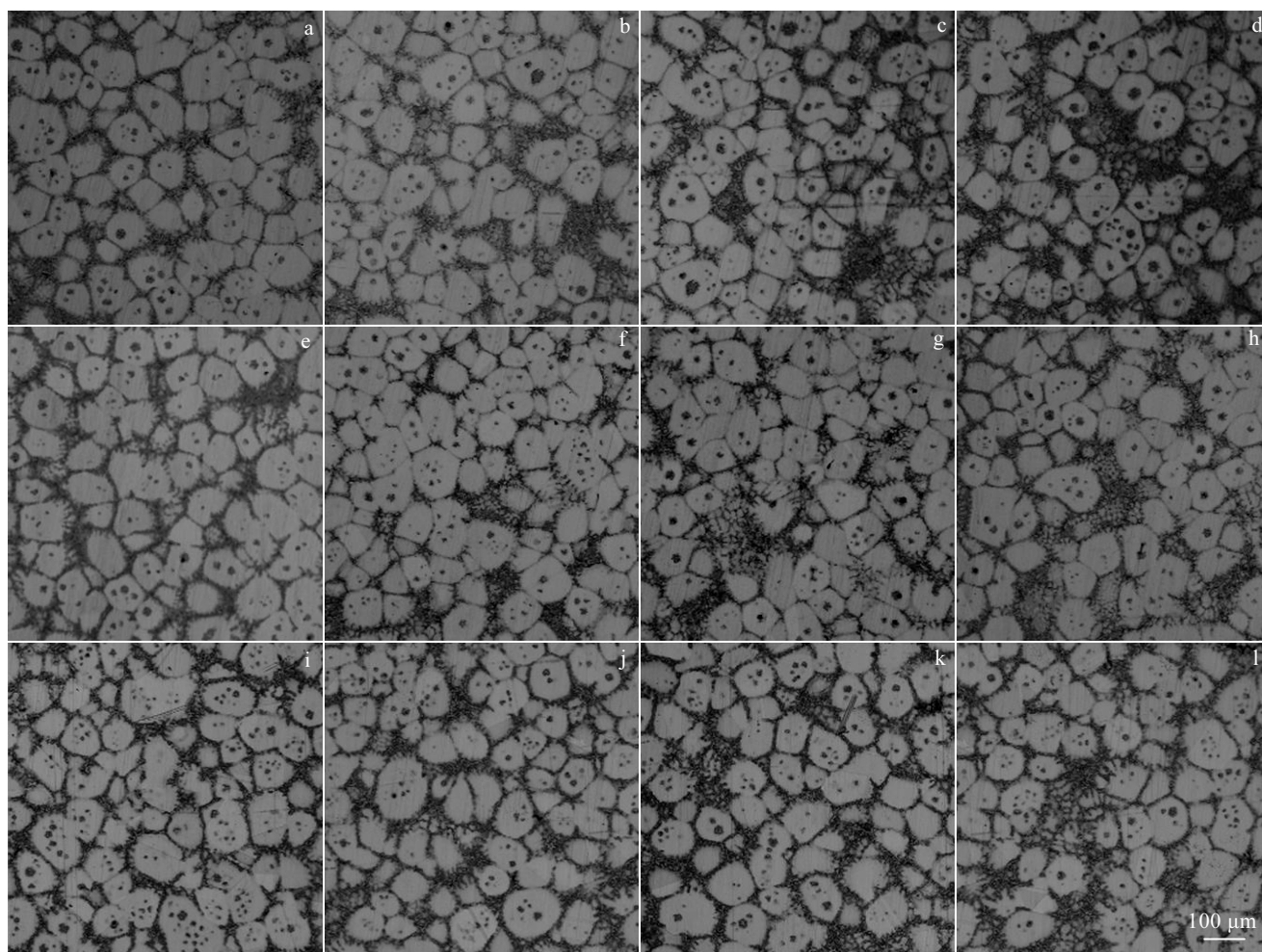


图6 不同挤压速率时半固态铜合金微观组织

Fig.6 Microstructure of semisolid copper alloy at extrusion rate of 11 mm/s (a~d), 13 mm/s (e~h), 15 mm/s (i~l): (a, e, i) location 1, (b, f, j) location 2, (c, g, k) location 3, and (d, h, l) location 4

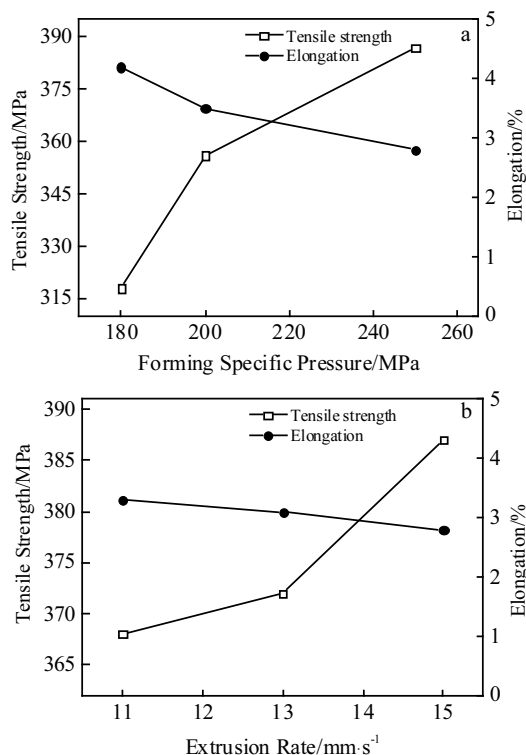


图 7 不同成形比压和应变速率下的抗拉强度和延伸率变化曲线

Fig.7 Curves of tensile strength and elongation at different forming specific pressures (a) and extrusion rate (b)

当成形比压相同时,随着挤压速率增加,抗拉强度增加,延伸率逐渐降低。当挤压速率由 11 mm/s 增加至 15 mm/s 时,抗拉强度由 368 MPa 增加至 387 MPa,提高了 5.16%,延伸率由 3.3%降低至 2.8%。半固态铜合金在挤压充型过程中,挤压速率对于半固态浆料组织变形有重要影响。充型过程中,挤压速度越快,成形所需时间越短,越能快速成形,半固态铜合金组织中液相来不及与固相分离,导致固相、液相能够一起协同变形,使其组织均匀性较好,从而使力学性能增加;挤压速度慢,成形所需时间较长,浆料凝固时间越长,半固态铜合金组织中液相有足够的时间流向前端,导致组织中液相过多,易出现液相团聚,导致组织均匀性较差,如图 6j 所示;此外,模具与浆料之间存在一定温差,挤压速度慢,浆料受激冷作用,凝固效果差,引起组织不均匀性,因此,挤压速率较低时,半固态挤压件的力学性能差。

图 8 为不同工艺条件下半固态铜合金挤压件拉伸断口形貌。当成形比压为 180 MPa、挤压速率 15 mm/s 时,拉伸断口形貌如图 8a 所示。从图 8a 可以看出,拉伸断口平齐,断裂面与拉伸方向垂直,为典型的脆性断裂。当成形比压为 200 MPa、挤压速率 15 mm/s 时,拉伸断口形貌如图 8b 所示。从图 8b 可以看出,拉伸断口出现大量韧窝和解理平台,解理平台与韧窝交错分布,此时断裂方式为准解理断裂。当成形比压

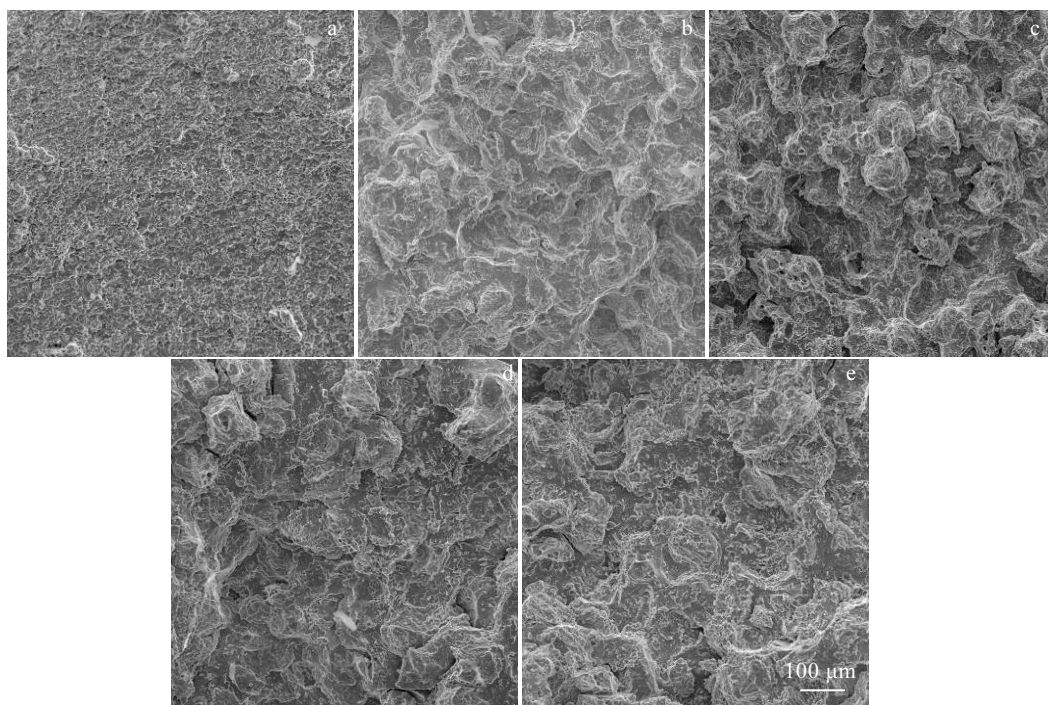


图 8 不同工艺条件下试样拉伸断口形貌

Fig.8 Morphologies of tensile fracture sample 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), and 5 (e)

为 250 MPa、挤压速率 15 mm/s 时, 拉伸断口形貌如图 8c 所示。从图 8c 可以看出, 拉伸断口出现较深的韧窝和圆形的凸包, 这些圆形的凸包就是半固态球形晶粒, 在拉伸断裂时, 半固态骨架遭破坏, 裂纹由液相部分产生, 随着拉伸的进行, 裂纹扩大并沿着液相延伸, 而固相晶粒在拉伸过程中并未遭到破坏, 球形晶粒整体被保留下来; 较深的韧窝, 是由于球状晶粒整体被拉出, 留下一个较深的孔洞。此时断裂方式为沿晶断裂和韧性断裂的混合型断裂。当成形比压为 250 MPa, 挤压速率分别为 11、13 mm/s 时, 拉伸断口形貌如图 8d~8e 所示, 与图 8b 拉伸断口形貌类似, 存在大量的解理平台和韧窝, 并伴有河流花样, 随着挤压速率增加, 解理平台增多, 此时断裂方式为准解理断裂和韧性断裂的混合型断裂。

3 结 论

1) 对半固态 ZCuSn10P1 铜合金进行 1 模多件挤压铸造成形实验, 选择合理的成形工艺参数, 可得到表面光洁、轮廓清晰、尺寸精确、组织均匀的零件产品, 同时提高了生产效率。

2) 当成形比压由 180 MPa 增加到 250 MPa 时, 半固态铜合金固相晶粒平均直径逐渐减小, 由 89.25 μm 减小至 77.96 μm , 液相率由 36.7% 减少至 22.3%; 挤压速率由 11 mm/s 增加至 15 mm/s 时, 固相晶粒圆整度由 1.54 减小至 1.32。

3) 当成形比压由 180 MPa 增加到 250 MPa 时, 半固态铜合金的抗拉强度由 318 MPa 增加至 387 MPa, 提高了 21.70%, 延伸率由 4.2% 降至 2.8%; 当挤压速率由 11 mm/s 增加至 15 mm/s 时, 抗拉强度由 368 MPa 增加至 387 MPa, 提高了 5.16%, 延伸率由 3.3% 降低至 2.8%。

4) 随着成形比压和挤压速率增加, 半固态挤压 ZCuSn10P1 铜合金的拉伸断口断裂方式由脆性断裂逐渐演变为为准解理断裂和韧性断裂的混合型断裂。

参考文献 References

- [1] Spencer D B, Mehrabia R, Flemings M C. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 1972, 3(7): 1925
- [2] Flemings M C. *Metallurgical Transactions A*[J], 1991, 22(5): 957
- [3] Meng Yi(孟毅). *Journal of Netshape Forming Engineering* (精密成形工程)[J], 2016, 8(4): 21
- [4] Beigi M T S, Niroumand B. *Materials Science and*

- Technology*[J], 2017, 33(18): 2203
- [5] Luo Shoujing(罗守靖), Tian Wentong(田文彤), Xie Shuisheng(谢水生) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2000, 10(6): 765
- [6] Atkinson H V. *Progress in Materials Science*[J], 2005, 50(3): 341
- [7] Guo Lili(郭丽丽), Fu Rong(符蓉), Pei Jiuyang(裴久杨) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(6): 1626
- [8] Guan R G, Di T. *Acta Metallurgica Sinica, English Letters*[J], 2017, 30(5): 409
- [9] Tzimas E, Zavaliangos A. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 289(1-2): 228
- [10] Wang Yongfei(王永飞), Zhao Shengdun(赵升吨), Fan Shuqin (范淑琴) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(10): 2900
- [11] Guan Renguo(管仁国), Zhang Qiusheng(张秋生), Dai Chunguang(戴春光) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2011, 47(9): 1167
- [12] Jiang J F, Atkinson H V, Wang Y. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2017, 33(4): 379
- [13] Liu Jing(刘静), Wang Ping(王平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(10): 2455
- [14] Lin H Q, Wang J G, Wang H Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2007, 431(1-2): 141
- [15] Jiang J F, Wang Y, Xiao G F *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 238: 361
- [16] Flemings M C, Riek R G, Young K P. *Materials Science and Engineering*[J], 1976, 25: 103
- [17] Liu X F, Luo J H, Wang X C *et al. Progress in Natural Science: Materials International*[J], 2013, 23(1): 94
- [18] Cao M, Wang Z, Zhang Q. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 715: 413
- [19] Cao M, Zhang Q, Zhang Y S. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 721: 220
- [20] Wang Jia(王佳), Xiao Han(肖寒), Wu Longbiao(吴龙彪) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(5): 567
- [21] Zhang J J, Liu S C, Lu Y P *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2017, 33(7): 623
- [22] Guan R G, Shen Y F, Zhao Z Y *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2017, 33(3): 215

Microstructure and Mechanical Properties of Semi-Solid Squeeze Casting Copper Alloy

Li Naiyong¹, Xiao Han^{1,2}, Xiong Chi¹, Lu Dehong¹, Zhou Rongfeng¹, Jiang Yehua¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

(2. Centre for Precision Manufacturing, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK)

Abstract: A semi-solid ZCuSn10P1 copper alloy was used as the research object. A four-piece extrusion mold was independently designed. The semi-solid squeeze casting experiments were carried out. The effects of forming specific pressure and extrusion rate on microstructure and mechanical property of semi-solid ZCuSn10P1 copper alloy squeeze casting parts were investigated. The results show that with the specific pressure increases from 180 MPa to 250 MPa, the average diameter of the solid phase of semi-solid copper alloy decreases gradually from 89.25 μm to 77.96 μm , and the liquid fraction decreases from 36.7% to 22.3%, tensile strength increases from 318 MPa to 387 MPa with an increase amplitude of 21.70%, and the elongation decreases from 4.2% to 2.8%. When the extrusion rate increases from 11 mm/s to 15 mm/s, the roundness of the solid phase is reduced from 1.54 to 1.32, the tensile strength increases from 368 MPa to 387 MPa, increased by 5.16%, and the elongation decreases from 3.3% to 2.8%.

Key words: copper alloy; semi-solid; squeeze casting; microstructure evolution; mechanical properties

Corresponding author: Xiao Han, Ph. D., Associate Professor, Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China, Tel: 0086-871-65136755, E-mail: kmxh@kmust.edu.cn