

# 触变挤压铜合金的力学性能

肖 寒<sup>1,2</sup>, 段志科<sup>1</sup>, 李乃拥<sup>1</sup>, 李永坤<sup>1</sup>, 周荣锋<sup>1</sup>, 卢德宏<sup>1</sup>, 蒋业华<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

(2. University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK)

**摘 要:** 采用触变挤压工艺成形 ZCuSn10P1 铜合金轴套零件。通过单向拉伸试验和硬度试验测试了触变挤压铜合金的抗拉强度、延伸率、布氏硬度和显微硬度。利用扫描电镜观测了断面形貌并分析了断裂方式, 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, 抗拉强度随成形压力增加而先增加后降低; 延伸率随成形压力增加而不断减小; 成形压力与抗拉强度和延伸率的函数关系分别近似为抛物线和幂指数。触变挤压铜合金拉伸断裂方式为沿晶断裂和韧性断裂的混合型断裂。布氏硬度随成形压力增加而先增加后降低。相同工艺条件下, 液相显微硬度值最高, 固/液界面次之, 固相最低; 固相、固/液界面和液相的显微硬度均随成形压力增加而先增加后降低。触变挤压铜合金综合力学性能要高于常规铸造, 较佳工艺参数为成形压力 250 MPa、挤压速率 15 mm/s, 其抗拉强度、延伸率和布氏硬度分别为 387 MPa、2.8%、1280 MPa。

**关键词:** 铜合金; 半固态; 触变成形; 力学性能

**中图分类号:** TG146.1<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)02-0531-07

半固态金属成形技术是一种介于液态、固态成形的技术, 它具有充型平稳、对模具的热冲击小、制件致密性高、成形力低等特点, 被认为是最具发展前景的近净成形技术之一, 包括触变成形和流变成形<sup>[1-5]</sup>。其中, 触变挤压作为一种典型的触变成形工艺, 广泛应用于铝、镁合金和钢铁材料。Chen 等<sup>[6]</sup>提出背压触变挤压成形 AZ80 镁合金, 发现背压能够有效降低液相偏析、提高组织和性能均匀性。Chen 等<sup>[7]</sup>采用反复墩挤方法制备半固态 AZ80 镁合金, 研究了组织演变特点和触变挤压行为。Xu 等<sup>[8]</sup>发现反复墩挤后 AZ91D 镁合金直接触变挤压成形的产品平均晶粒细小、显微硬度高。Chen 等<sup>[9]</sup>分析了触变挤压镁合金复合材料的组织、力学性能和耐磨性, 结果表明, 挤压态复合材料触变成形件的力学性能要高于铸态材料触变成形件。Neag 等<sup>[10]</sup>发现 7075 铝合金在准等温触变反挤压过程中固相颗粒只重新排列而没有塑性变形。Jiang 等<sup>[11]</sup>研究 7005 铝合金触变挤压的组织和力学性能, 发现模具预热温度对零件充型状态有显著影响, 触变挤压合金 T6 热处理后综合性能最好。Gu 等<sup>[12]</sup>研究了 M2 钢触变挤压的组织演变和流动行为。Becker 等<sup>[13]</sup>发现 SAE1006 低碳钢有较好的触变挤压成形性, 正挤

压和反挤压均能得到尺寸和组织较好的产品。而铜合金半固态成形研究相对较少, Flemings<sup>[14]</sup>等利用机械搅拌制备了 C905 铜合金半固态浆料, 采用高温连续流变铸造装置成形了零件。Lee 等<sup>[15,16]</sup>研究了 Cu-Ca 合金半固态浆料充型和凝固行为、组织特征和导电性。Youn 等<sup>[17]</sup>研究了半固态成形 Cu-Ag 合金感应电机零件。Yan 等<sup>[18]</sup>研究了 HPb59-1 黄铜半固态成形工艺。Wang<sup>[19]</sup>研究了硅碳增强铜基复合材料的半固态锻造成形工艺。Cao 等<sup>[20,21]</sup>研究旋锻制备的半固态 C5191 锡青铜浆料, 发现半固态试样的刚度和强度随着微观晶粒尺寸的减小而增加, 而且强度高于枝晶组织的铸态铜。Li 等<sup>[22]</sup>研究了封闭冷却斜坡法铜合金半固态浆料组织和流变挤压性能, 发现斜坡长度 300 mm 时半固态组织性能较好。Wang 等<sup>[23,24]</sup>采用轧制与重熔工艺制备了铜合金半固态坯料, 并研究了单向压缩变形行为和组织演变规律。

本工作研究了挤压工艺参数对触变挤压铜合金轴套抗拉强度、延伸率和硬度等力学性能的影响规律, 以期对铜合金半固态成形工艺制定提供理论基础和参考价值, 拓宽半固态成形技术在高熔点金属中的应用。

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51665024, 51765026)

作者简介: 肖 寒, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 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: kmxh@kmust.edu.cn

# 1 实验

实验原材料为 ZCuSn10P1 铜合金铸锭，测试其化学成分（质量分数，%）为：Cu 87.65，Sn 9.87，P 1.21，其他元素含量 1.27。利用耐驰 STA449F3 同步热分析仪测得该合金的固、液相线温度分别为 876.1 和 1024.2 °C。触变挤压实验方法：首先将铜合金铸锭机加工为 150 mm×25 mm×25 mm 长方体坯料；其次进行室温多向多道次冷轧，3 道次轧制后累计变形量为 15%；然后将冷轧坯料加热至 920 °C 保温 30 min，制备半固态浆料；最后利用 160 t 四柱液压机进行挤压成形实验，挤压速度为 15 mm/s，成形压力分别为 180、200、250、300 和 350 MPa。同时，将铜合金 1180 °C 精炼处理后直接进行液态挤压，并与触变挤压零件力学性能进行对比。

图 1 为铜合金挤压模具、零件尺寸、硬度测试位置和拉伸试样取样位置及尺寸。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 0.001 s<sup>-1</sup>，拉伸试样形状及尺寸如图 1b 所示。采用

Hitachi（日立）S-3400N 扫描电镜观测拉伸试样断口形貌，分析断裂方式。微观组织、布氏硬度和显微硬度测试位置为图 1b 黑色方块处。使用 Leica 光学显微镜观察金相组织，并借助 Image-Pro Plus 软件计算铜合金组织中平均晶粒直径及形状因子（形状因子  $z = l^2/4\pi s$ ，其中  $l$  为晶粒周长， $s$  为晶粒面积，形状因子  $z$  越接近于 1，晶粒球化越好）。采用 HBE-3000A 型电子布氏硬度计测试硬度，载荷 9807 N，保压时间 25 s，压头直径 10 mm。采用 HMV-FA2 全自动显微硬度仪测试显微硬度，载荷 1.96 N，保压时间 15 s。显微硬度测试选取位置主要是半固态组织中固相点 1、固/液界面点 2 和液相点 3 位置，如图 2 所示。

# 2 结果与讨论

## 2.1 触变挤压铜合金的抗拉强度和延伸率

图 3 为不同成形压力触变挤压铜合金抗拉强度（ $\sigma_m$ ）和延伸率（ $\delta$ ）。由图 3 可知，在挤压速率为 15 mm/s 时，随着成形压力增加，抗拉强度先增加后降低，

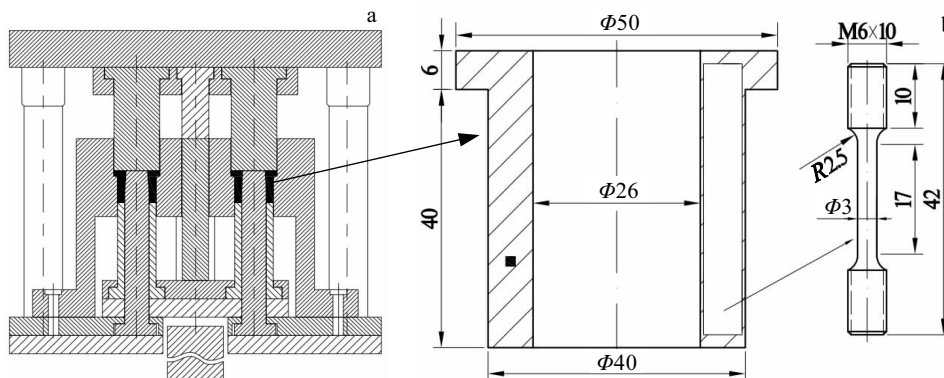


图 1 挤压模具和挤压零件尺寸及拉伸试样取样位置及尺寸

Fig.1 Schematic of extrusion die (a) and dimensions of extrusion part and tensile sample (b) (unit: mm)

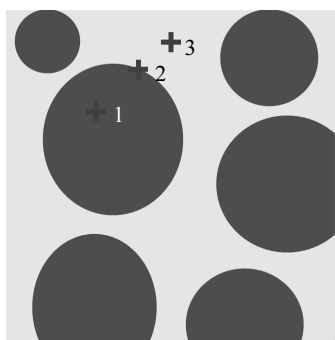


图 2 显微硬度测试位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of micro-hardness test position

延伸率持续降低。当成形压力由 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% 降低至 2.8%，降低了 33.33%；当成形压力由 250 MPa 增加至 350 MPa 时，抗拉强度由 387 MPa 降低至 364 MPa，降低了 5.94%；延伸率由 2.8% 降低至 2.5%，降低了 10.71%；抗拉强度变化范围 318~387 MPa，变化幅度 21.70%，成形压力与抗拉强度的关系近似抛物线函数；延伸率变化范围 2.5%~4.2%，变化幅度 40.48%，成形压力与延伸率的关系近似幂指数函数。液态挤压铜合金零件抗拉强度为 336 MPa，延伸率为 2.6%。成形压力为 250 MPa 时，触变挤压铜合金抗拉强度为 387 MPa，延伸率为

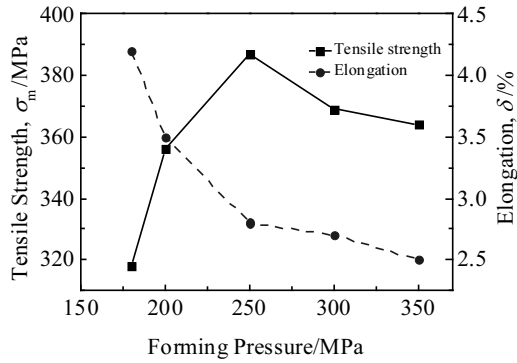


图3 触变挤压铜合金的抗拉强度和延伸率

Fig.3 Tensile strength and elongation of thixo-extruded copper alloy

2.8%，与液态挤压铜合金相比，分别提高了15.2%和7.7%。半固态铜合金浆料在挤压变形过程中，充型压力对半固态浆料成形行为有重要影响。一方面，成形压力增加，也即增大了充型压力，使半固态铜合金浆料变形程度增大，组织由疏松变得更加致密，从而引起强度增加；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。但是，当充型压力超过半固态骨架所能承受的最大变形抗力极限时，就会破坏半固态铜合金的组织结构，甚至引发缩孔和裂纹，导致强度降低。因此，随着成形压力的增加，抗拉强度先增加后降低。

图4为液态挤压和触变挤压铜合金拉伸断口形貌。液态挤压件为粗大枝晶组织，成形温度较高导致凝固收缩大，会产生缩松缩孔，这将成为拉伸断裂的裂纹源。当一次枝晶臂垂直拉伸方向时，裂纹可能沿着枝晶间结合强度较低的面扩展，形成明显的沿晶断裂；当一次枝晶臂与拉伸方向平行时，可能产生穿晶断裂，在枝晶断裂位置可以看到解理平面，且裂纹和缩孔较多，这导致延伸率较差，如图4a所示。图4b为挤压速率15 mm/s、成形压力250 MPa试样的断口形貌。拉伸断口出现较深的韧窝和圆形的凸包，这些圆形的凸包是半固态球状晶粒，在球形晶粒附近有裂纹。在拉伸断裂时，半固态骨架遭破坏，裂纹由球状晶粒附近的液相凝固处产生。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，球状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，留下较深的凹坑，在凹坑内还能够发现球状晶粒脱落后留下的韧窝，此时断裂方式为沿晶断裂和韧性断裂的混合型断裂。

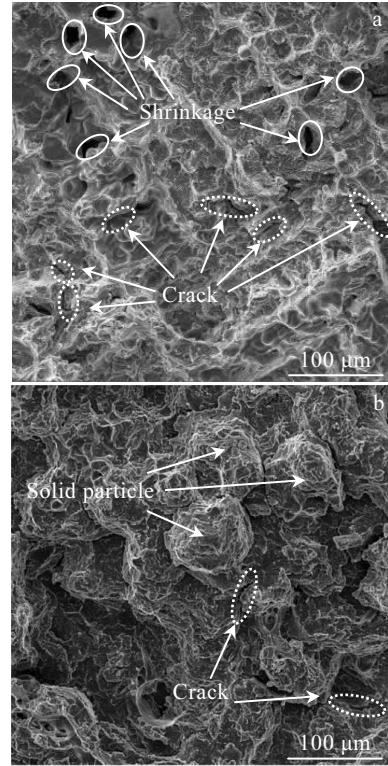


图4 液态挤压和触变挤压铜合金拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fracture morphologies of copper alloys: (a) liquid-extruded and (b) thixo-extruded

## 2.2 触变挤压铜合金的布氏硬度

触变挤压铜合金的布氏硬度如图5所示。由图5可知，随着成形压力增加，铜合金挤压件布氏硬度先增加后降低。成形压力由180 MPa增加至350 MPa，布氏硬度先由1030 MPa增加至1280 MPa，然后降低至1120 MPa。当成形压力为250 MPa时，布氏硬度达到最大值1280 MPa，与液态挤压铜合金布氏硬度1050 MPa相比，提高了21.9%。挤压充型过程中，将半固态铜合金浆料倒入模具型腔，由于半固态铜合金浆料与模具之间存在温差，半固态铜合金浆料表层受激冷作用，与模具壁相接触的最外层半固态铜合金浆料先凝固形核，形成一层凝固壳。当没有外力存在时，由于凝固收缩作用，半固态铜合金浆料最外层凝固壳与内部未凝固金属熔体之间会产生缩孔，并有部分气体渗入半固态铜合金浆料中，导致传热系数降低，半固态铜合金浆料结晶潜热不能及时释放，冷却凝固速率降低，凝固后形成粗大的组织。如果对倒入模具型腔的半固态铜合金浆料施加外力，在外力作用下，凝固收缩得到及时补充，减少缩孔、缩松等缺陷，同时，组织变得致密，气孔不易渗入，金属凝固时传热方式

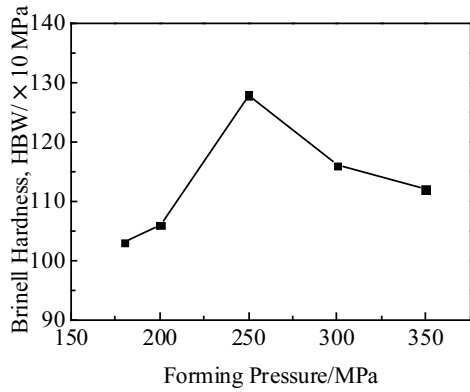


图 5 触变挤压铜合金的布氏硬度

Fig.5 Brinell hardness of thixo-extruded copper alloy

由固体→气体→液态传热转变为固体→液体传热。由于固体金属的传热速率远大于气体，提高了金属凝固速率，同时，冷却速率越高，组织越细小。在压力作用下，凸模将半固态铜合金浆料充满型腔，挤压成形为轴套零件。随着成形压力增加，成形件组织由疏松变得致密，晶粒尺寸得到细化，力学性能逐渐提高；同时，靠近凸模的组织发生塑性变形，产生大量位错，位错通过滑移和攀移，相互交错缠结，产生加工硬化，提高了零件的强度和硬度。当成形压力增加至 250 MPa 时，布氏硬度达到最大值，继续增加成形压力，布氏硬度值逐渐降低。这是因为，半固态铜合金组织是由共析相( $\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$ )包裹着近球状初生相( $\alpha\text{-Cu}$ )晶粒组成，液-固两相均匀分布，形成半固态骨架结构，半固态骨架结构有其独特的稳定性，当外力作用于半固态组织时，其能承受一定的变形抗力，但是，当外力超过半固态骨架所能承受的极限值时，半固态骨架就会被破坏，导致其力学性能降低。

### 2.3 触变挤压铜合金的显微硬度

成形压力为 250 MPa、挤压速率为 15 mm/s 的触变挤压铜合金不同位置显微硬度测试时的微观组织如图 6 所示。图 6a、6b、6c 分别对应半固态铜合金组织的固相、固/液界面、液相。半固态铜合金组织中固液两相的存在，导致其存在着成分偏析，固相颗粒为  $\alpha\text{-Cu}$ ，其为面心立方晶体，显微硬度测试时留下较深的凹坑，其值为 1120 MPa，表明  $\alpha\text{-Cu}$  较软，塑性较好，如图 6a 所示。在固/液两相交界面处，既包含初生相  $\alpha\text{-Cu}$ ，又包含共析相( $\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$ )，显微硬度测试时留下的凹坑深度介于固相和液相之间，其值为 1560 MPa，表明其硬度高于固相，如图 6b 所示。液相主要为共析相( $\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$ )，它富含 P 元素，属于硬脆相，显微硬度测试时该位置凹坑最浅，其值为 1930 MPa，表明其硬度最高，塑性最差，如图 6c 所示。半固态铜合金固相、固/液界面、液相显微硬度的差值，主要是由于物相不同造成的。半固态铜合金中 Sn 和 P 元素的加入，提高了金属的强度，在金属承受外力发生塑性变形时，由共析相( $\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$ )包裹初生相  $\alpha\text{-Cu}$  组成的半固态骨架结构主要起抵抗变形的作用，半固态铜合金骨架结构的稳定性决定了其力学性能。

不同成形压力的触变挤压铜合金显微硬度如图 7 所示。由图 7 可知，随着成形压力由 180 MPa 增加至 350 MPa 时，固相、固/液界面和液相的显微硬度变化规律相同，均为先增加后降低。固相颗粒的维氏硬度先由 950 MPa 增加至 1120 MPa 然后降低至 1040 MPa，最大变化幅度 170 MPa；固/液界面的维氏硬度由 1200 MPa 先增加至 1560 MPa 然后降低至 1380 MPa，最大变化幅度 360 MPa；液相的维氏硬度由 1510 MPa 增加至 1930 MPa 然后降低至 1780 MPa，最大变化幅度 420 MPa。相同工艺条件时，液相处显微硬度值和变化幅度均最大，固/液界面次之，固相最小。成形压力 250 MPa、挤压速率为 15 mm/s 时，固相、固/液界面和液

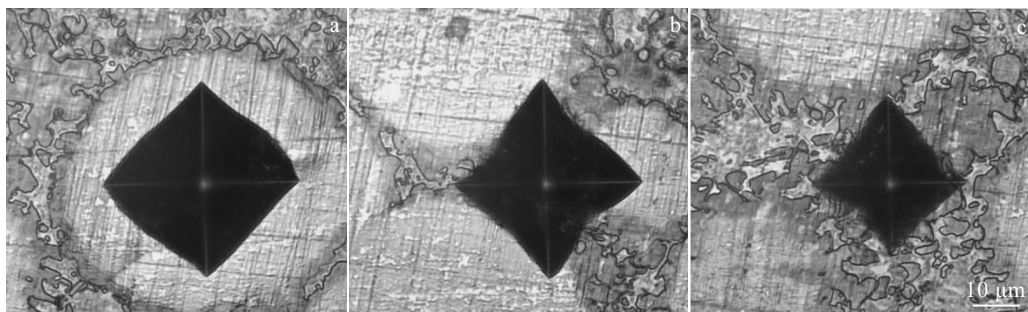


图 6 触变挤压铜合金不同位置（固相，固/液界面，液相）显微硬度测试时的扫描电镜图

Fig.6 SEM images of micro-hardness of thixo-extruded copper alloy tested at different positions: (a) solid, (b) solid-liquid interface, and (c) liquid

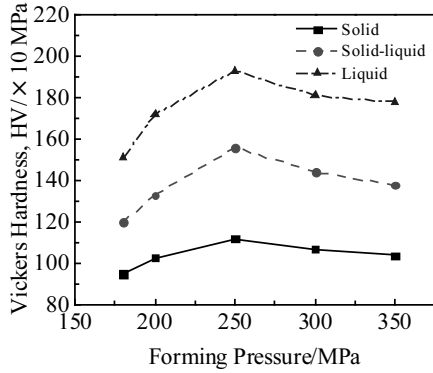


图 7 触变挤压铜合金的显微硬度

Fig.7 Vickers hardness of thixo-extruded copper alloy

相的显微硬度均达到最大值。触变挤压铜合金显微硬度整体变化趋势与布氏硬度变化趋势一致，即随着成形压力增加，显微硬度先增加后下降。

2.4 不同成形工艺铜合金的力学性能

表 1 为 GB/T 1176-2013<sup>[25]</sup>和本研究的 ZCuSn10P1 铜合金室温力学性能。在本研究的工艺范围内，铜合金的抗拉强度、延伸率和布氏硬度变化范围分别为 318~387 MPa、2.5%~4.2%和 1030~1280 MPa。综合力学性能较佳的工艺参数为成形压力 250 MPa、挤压速率 15 mm/s，其抗拉强度、延伸率和布氏硬度分别为 387 MPa、2.8%、1280 MPa。此时，固相、固/液界面

和液相的显微硬度均为最大值，分别为 1120、1560、1930 MPa。由表 1 可知，对比砂型铸造、金属型铸造、离心铸造、连续铸造和液态挤压可知，触变挤压铜合金抗拉强度和布氏硬度更高，而延伸率不高，与离心铸造相当，后续可以通过热处理进一步提高触变挤压铜合金延伸率，从而提高其综合力学性能。综合而言，触变挤压铜合金的力学性能要优于传统铸造工艺。

2.5 不同成形工艺的铜合金微观组织

图 8 为液态挤压和触变挤压铜合金的显微组织。由图 8a 可知，液态挤压下为典型的粗大枝晶组织，一次枝晶臂和二次枝晶臂交错分布，枝晶主要为 Sn 在 Cu 中的固溶体  $\alpha$  相，为面心立方晶体结构；枝晶周围的深灰色组织为  $(\alpha+\delta+Cu_3P)$  共析组织，组织中的一次枝晶和二次枝晶构成网状结构， $(\alpha+\delta+Cu_3P)$  共析体位于其间隙内。这种组织会导致其抗拉强度和延伸率较低。图 8b~8f 为触变挤压铜合金微观组织，是典型的

表 1 ZCuSn10P1 铜合金的力学性能

Process method	$\sigma_m$ /MPa	$\delta$ /%	Hardness, HBW/×10 MPa
Sand casting	220	3	80
Metal casting	310	2	90
Centrifugal casting	330	4	90
Continuous casting	360	6	90
Liquid-extruding	336	2.6	105
Thixo-extruding	318~387	2.5~4.2	103~128

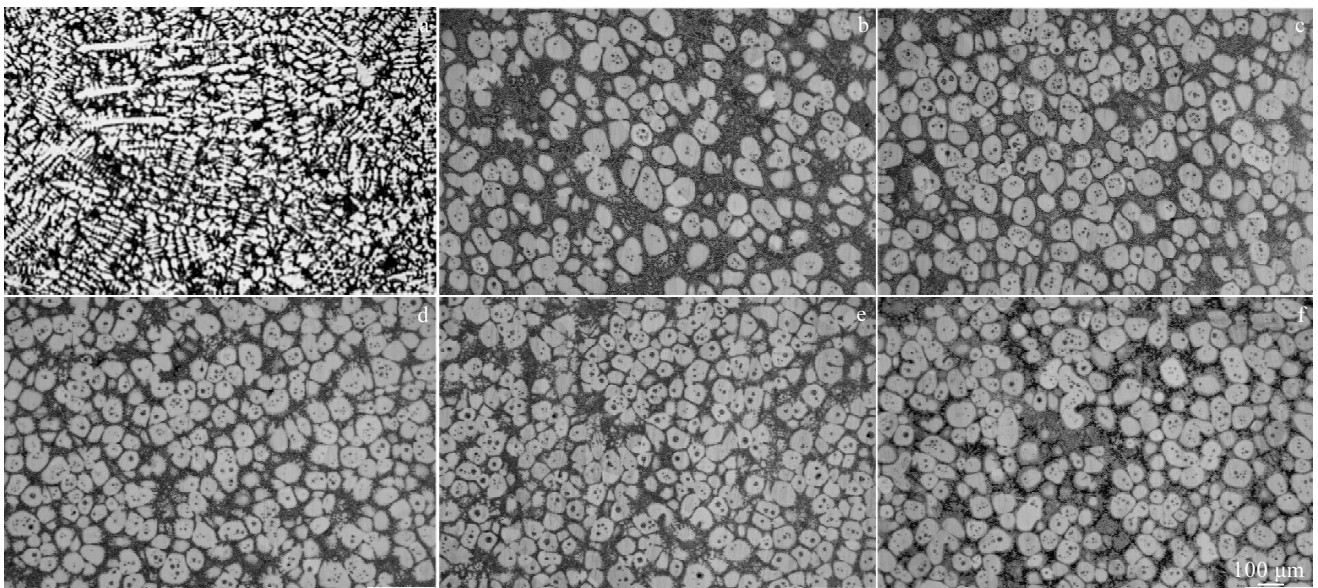


图 8 液态挤压和不同压力的触变挤压铜合金微观组织

Fig.8 Microstructures of copper alloys of liquid-extrusion (a); thixo-extrusion at 180 MPa (b), 200 MPa (c), 250 MPa (d), 300 MPa (e), and 350 MPa (f)

半固态组织,  $\alpha$  固相晶粒为球状或近球状, 液相也即 ( $\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$ ) 共析组织分布在  $\alpha$  固相晶粒周围。该金相组织观测位置为靠近零件前端, 液相含量较高, 因此在挤压变形过程中, 固相和液相协同变形, 液相起到润滑  $\alpha$  固相晶粒的作用, 导致最终固相晶粒没有发生形状的变化, 只是随着挤压的进行发生了重新排列。随着成形压力增加, 挤压力增大, 部分固相会聚集而团聚在一起, 导致形状发生一定改变, 如图 8e 和 8f。随着成形压力增加, 固相颗粒平均尺寸不断降低, 由 180 MPa 的 82.6  $\mu\text{m}$  降低至 350 MPa 的 79.4  $\mu\text{m}$ , 变化幅度不大, 形状因子则随着成形压力增加而先降低后增加, 先由 180 MPa 的 1.54 降低至 250 MPa 的 1.43, 然后增加至 350 MPa 的 1.49。由图 8 可知, 成形压力为 250 MPa 时, 触变挤压铜合金微观组织平均晶粒尺寸为 80.9  $\mu\text{m}$ , 形状因子为 1.43, 固、液两相均匀分布, 固相颗粒球化效果最好, 此时, 力学性能最好。

### 3 结 论

1) 触变挤压铜合金随成形压力增加, 抗拉强度先增加后降低, 延伸率不断减小。其函数关系分别近似为抛物线和幂指数。触变挤压铜合金拉伸断裂方式为沿晶断裂和韧性断裂的混合型断裂。

2) 布氏硬度随成形压力增加而先增加后减小。触变挤压铜合金液相显微硬度值最高, 固/液界面次之, 固相最低, 是因为液相和固/液界面含有较多硬脆的共析相 ( $\alpha+\delta+\text{Cu}_3\text{P}$ )。固相、固/液界面和液相的显微硬度均随成形压力增加而先增加后降低。

3) 触变挤压铜合金综合力学性能要高于常规铸造, 成形压力 250 MPa、挤压速率 15 mm/s 为较佳工艺参数, 此时抗拉强度、延伸率和布氏硬度分别为 387 MPa、2.8%、1280 MPa, 固相、固/液界面和液相的显微硬度分别为 1120、1560、1930 MPa。

#### 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] Sun Bing(孙 兵), Zhang Yingbo(张英波), Quan Gaofeng(权高峰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(2): 404
- [4] Atkinson H V. *Progress in Materials Science*[J], 2005, 50(3):

341

- [5] 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
- [6] Chen G, Zhang S, Zhang H et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 259: 88
- [7] Chen Q, Zhao Z, Zhao Z et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509(26): 7303
- [8] Xu Y, Jia J B, Chen C et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 93(9-12): 4317
- [9] Chen Q, Chen G, Han F et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2017, 48(7): 3497
- [10] Neag A, Favier V, Bigot R et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(7): 1472
- [11] Jiang J F, Atkinson H V, Wang Y. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2017, 33(4): 379
- [12] Gu G, Pesci R, Langlois L et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 216: 178
- [13] Becker E, Bigot R, Rivoirard S et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 252: 485
- [14] Flemings M C, Riek R G, Young K P. *Materials Science and Engineering*[J], 1976, 25: 103
- [15] Lee S Y, Lee S Y. *Solid State Phenomena*[J], 2006, 116-117: 652
- [16] Yi H K, Moon Y H, Lee S Y. *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*[J], 2007, 45(5): 315
- [17] Youn J I, Kim Y J. *Solid State Phenomena*[J], 2006, 116-117: 730
- [18] Yan G H, Zhao S D, Sha Z H. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(S3): 931
- [19] Wang K K. *Rare Metals*[J], 2013, 32(2): 191
- [20] Cao M, Wang Z, Zhang Q. *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2017, 715: 413
- [21] Cao M, Zhang Q, Zhang Y S. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 721: 220
- [22] Li Y K, Zhou R F, Li L et al. *Metals*[J], 2018, 8(4): 275
- [23] 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
- [24] Wang J, Xiao H, Wu L B et al. *Rare Metals*[J], 2016, 35(8): 620
- [25] *Casting Copper and Copper Alloys*(铸造铜及铜合金). GB/T 1176-2013[S]. Beijing: China Standard Press, 2013

## Mechanical Properties of Thixo-extruded Copper Alloy

Xiao Han<sup>1,2</sup>, Duan Zhike<sup>1</sup>, Li Naiyong<sup>1</sup>, Li Yongkun<sup>1</sup>, Zhou Rongfeng<sup>1</sup>, Lu Dehong<sup>1</sup>, Jiang Yehua<sup>1</sup>

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

(2. University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK)

**Abstract:** ZCuSn10P1 copper alloy was formed by a thixo-extrude process. The mechanical properties including tensile strength, elongation, Brinell hardness and Vickers hardness were measured by the uniaxial tensile test and hardness test. The fracture morphology was observed by scanning electron microscope, and the fracture mode was analyzed. The influence of forming pressure on the mechanical properties of thixo-extruded copper alloy was investigated. The results show that as the forming pressure increases, the tensile strength first increases and then decreases, while the elongation decreases all the time. The functional relationships between the forming pressure and tensile strength and elongation are parabolic and exponential. The tensile fracture mode of thixo-extruded copper alloy is a hybrid fracture including intergranular fracture and ductile fracture. The variation of Brinell hardness first increases and then decreases with increasing the forming pressure. The Vickers hardness of the liquid is highest, followed by the solid-liquid interface, and the lowest is the solid phase in the same process. The microhardness of the solid phase, the solid-liquid interface and the liquid phase increases first and then decreases as the forming pressure increases. The mechanical properties of thixo-extruded copper alloy are higher than those of the alloy prepared by conventional casting. The optimum process parameters are a forming pressure of 250 MPa and an extrusion rate of 15 mm/s, and the tensile strength, elongation and Brinell hardness are 387 MPa, 2.8% and 1280 MPa, respectively.

**Key words:** copper alloy; semi-solid; thixo-extrude; 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