

# ZL104 铝合金连杆半固态挤压铸造工艺实验研究

王永飞<sup>1,2</sup>, 赵升吨<sup>1</sup>, 樊晓光<sup>2</sup>, 李双江<sup>1</sup>, 刘宽心<sup>3</sup>, 郑顺奇<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(3. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

**摘要:** 研究了传统液态挤压铸造与半固态挤压铸造成形 ZL104 铝合金连杆的充填状态、微观组织及力学性能。结果表明: 传统液态挤压铸造成形连杆充填饱满, 但其抗拉强度及伸长率低于半固态挤压铸造成形连杆。对于半固态挤压铸造成形, 浇注温度高于 565 °C 时, 铸件充填性能良好; 平均晶粒尺寸及形状因子随浇注温度的升高而逐渐增大; 连杆抗拉强度及伸长率先增加后减小。挤压压力高于 25 MPa 时, 铸件均充填饱满; 挤压压力升高, 平均晶粒尺寸不断减小且形状因子不断增大, 连杆机械性能不断提高。模具预热温度升高, 平均晶粒尺寸和形状因子不断增大, 连杆机械性能逐渐提高。但当模具预热温度超过 300 °C 时, 平均晶粒尺寸进一步增大而其形状因子减小, 导致连杆的机械性能下降。

**关键词:** 半固态挤压铸造; 铝合金连杆; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)07-2517-07

半固态金属成形 (semi-solid metal forming, SSMF) 具有成形温度比液态成形低、变形抗力比固态成形小等优点, 被认为是 21 世纪最有前途的金属加工技术之一<sup>[1-3]</sup>。与传统铸造相比, 半固态成形零件致密性好, 缩松缩孔缺陷少, 力学性能高, 相对于热锻而言, 其成形零件的余量小, 机械加工量少, 生产效率高, 成形力大大降低, 模具寿命长, 易于实现近净成形<sup>[4-7]</sup>。液态挤压铸造是指利用外力使液态金属平稳充型并在较高的压力下结晶凝固以获得铸件。相对于传统压铸工艺, 该工艺充型速度较低, 成形零件内部卷气等缺陷较少, 且生产的铸件经热处理后机械性能可接近或达到锻件水平<sup>[8,9]</sup>。

半固态挤压铸造工艺是将液态挤压铸造与金属半固态加工的思想结合在一起形成的一种新型成形工艺, 综合了两者的优点, 在镁、铝合金应用方面获得了广泛的关注和研究<sup>[10-12]</sup>。Lee<sup>[10]</sup>等通过控制电磁搅拌以及浇注的速度获得了流变挤压铸造过程中不同固相分数对零件充型性能及机械性能的影响, 并得到具有细小微观组织的零件。Masoumi<sup>[11]</sup>等研究了挤压铸造成形过程中挤压压力对 Mg-Al-Ca 合金微观组织及其拉伸性能的影响并指出随着挤压压力的增加, 第二相以及缩松的数量均有所减少; 铸件的密实化以及基体中固溶体含量的增加导致其拉伸性能随挤压压力的增加而增加。Mo<sup>[12]</sup>

等研究了液态挤压铸造过程中挤压压力、浇注温度、保压时间对 Mg-12Zn-4Al-0.5Ca (ZAX12405) 合金微观组织以及机械性能的影响。获得了最佳的工艺参数并指出铸件的密实化是其抗拉强度及伸长率比重力铸造分别提高 40% 和 300% 的主要原因。

汽车发动机曲柄连杆机构 (如图 1 所示) 是实现发动机工作循环, 完成能量转换的主要运动零件。随着汽车轻量化进程的不断加快, 铝合金连杆逐渐被广泛应用于汽车工业, 但传统压铸工艺生产的零件内部存在气孔等缺陷导致力学性能较低。本研究将采用半固态挤压铸造工艺取代传统液态挤压铸造工艺生产铝合金连杆, 并揭示不同工艺参数对铝合金连杆的充填状态、力学性能及微观组织的影响规律。

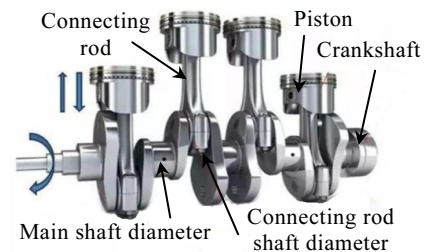


图 1 汽车发动机曲柄连杆机构

Fig.1 Crank connecting rod mechanism of automobile engine

收稿日期: 2019-07-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (XZY012019003/XZD012019009); 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题 (SKLSP201921); 中国博士后科学基金 (2018M643627); 浙江省自然科学基金 (LQ18E040002)

作者简介: 王永飞, 男, 1988 年生, 博士后, 助理研究员, 西安交通大学机械工程系, 陕西 西安 710049, E-mail: yongfeio@126.com

# 1 实验

本研究采用的 ZL104 铝合金的化学成分如表 1 所示, 其固、液相线分别为 555 和 595 °C, 半固态温度区间为 40 °C。成形铸件是通过浇道连接的尺寸不同的 2 个连杆, 其中大连杆 A 质量为 165 g、小连杆 B 质量为 108 g, 连杆的具体尺寸如图 2 所示。

本研究采用的传统液态挤压铸造 (liquid squeeze casting, LSC) 与半固态挤压铸造 (semi-solid squeeze casting, SSSC) 成形 ZL104 铝合金连杆的具体工艺如下: 将电磁搅拌法制备的 ZL104 半固态坯料切割为直径 63 mm 高度 100 mm 的棒料并放入坩埚进行二次重熔加热, 重熔温度为 565~650 °C, 保温时间为 20 min。同时, 预热模具并喷涂耐玻璃水和石墨粉混合润滑剂。随后, 将重熔坯料放入 400 t 卧式挤压铸造机的料筒, 并按照预设的参数进行半固态挤压铸造, 具体试验参数见表 2。

从大连杆 A 上获取拉伸试样并利用 Instron 5982 材料试验机进行拉伸试验, 拉伸速度为 1.25 mm/min。从小连杆 B 的连杆臂上取试样, 经过嵌样、研磨、抛光及腐蚀制备金属试样。采用光学显微镜观察金相组织, 并借助 Image-Pro Plus 图像分析软件对金相组织平均晶粒直径和形状因子进行定量分析, 其计算公式如下<sup>[13,14]</sup>:

表 1 ZL104 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZL104 aluminum alloy (ω/%)

Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn	Al
9.23	0.25	0.3	0.05	0.2	0.2	Bal.

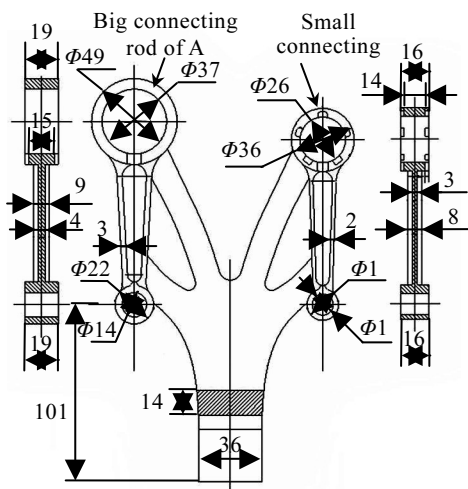


图 2 铝合金连杆铸件

Fig.2 Casting of aluminum alloy connecting rod

表 2 试验工艺参数

Table 2 Process parameters of experiment for LSC and SSSC

Item	Squeezing pressure, P/MPa	Pouring temperature, T <sub>p</sub> /°C	Mold preheating temperature, T <sub>m</sub> /°C
1	100	650 (Liquid state)	250
2	100	565, 570, 575, 580	250
3	25, 50, 75, 100	575	250
4	100	575	200, 250, 300, 350

$$D = \frac{\sum_{N=1}^N \sqrt{4A/\pi}}{N} \tag{1}$$

$$F = \frac{\sum_{N=1}^N 4\pi A/L^2}{N} \tag{2}$$

式中, D、A、L、N、F 分别为晶粒的平均等效直径、面积、周长、数量、平均形状因子。

## 2 结果与讨论

### 2.1 浇注温度的影响

挤压压力为 100 MPa, 模具预热温度为 250 °C, 浇注温度为 650 °C (液态) 时, 连杆铸件的充填状态及微观组织如图 3 所示。由图 3a 可见, 液态挤压铸造成形连杆充填性能良好, 且由于浇注温度很高, 连杆的溢流槽和排气道均充填饱满。由图 3b 及 3c 可见, 液态挤压铸造连杆铸件的微观组织主要由粗大的树枝晶组成, 其部分枝晶臂的长度超过了 100 μm。

当挤压压力为 100 MPa, 模具预热温度为 250 °C, 浇注温度分别为 565、570、575 及 580 °C 时, 半固态挤压铸造连杆的充填状态如图 4 所示。

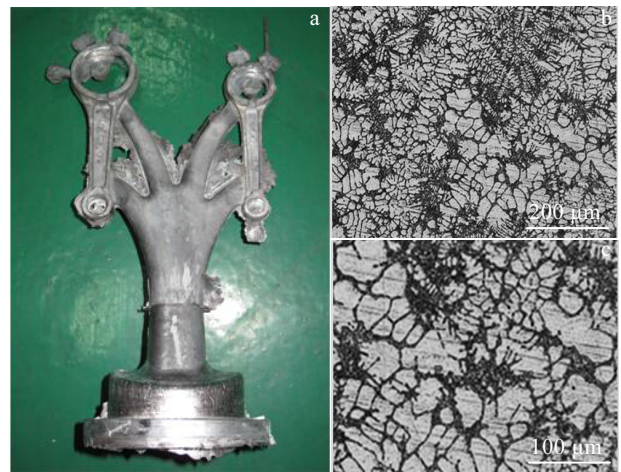


图 3 液态挤压铸造连杆

Fig.3 Filling state (a) and microstructures (b, c) of aluminum alloy connecting rod fabricated by LSC process



图4 不同浇注温度下半固态挤压铸造连杆的充填状态

Fig.4 Filling states of connecting rods fabricated by SSSC at different pouring temperatures: (a) 565 °C, (b) 570 °C, (c) 575 °C, and (d) 580 °C

由图4可见, 浇注温度在570~580 °C时, 连杆铸件仍然充填饱满、轮廓清晰且表面光滑, 无明显的宏观缺陷。可见, 半固态挤压铸造成形过程中坯料具有良好的充填性能。但当浇注温度进一步降低至565 °C时, 由于连杆臂及连杆大头厚度较薄且浆料充填路程较长, 导致铸件两侧的连杆臂均充填不满且大、小连杆的大头的轮廓不清晰。由于浇注温度为565 °C时, 铸件存在明显缺陷, 所以不再对其进行相关的微观组织及力学性能分析。

570~580 °C半固态挤压铸造连杆的微观组织如图5所示。对比分析图5所示不同连杆的微观组织可见: 半固态挤压铸造连杆铸件的微观组织主要由均匀分布的相对较大的 $\alpha_1$ -Al球状晶粒和相对细小的 $\alpha_2$ -Al颗粒组成, 其中 $\alpha_1$ -Al球状晶粒的直径为30~50  $\mu\text{m}$ ,  $\alpha_2$ -Al颗粒的直径为10  $\mu\text{m}$ 左右。半固态挤压铸造成形过程中, 半固态铝合金浆料微观组织的形成可分2个阶段<sup>[9]</sup>: 第1阶段, 浆料在二次重熔阶段保留下的初生 $\alpha$ -Al球状晶在型腔充填及高压凝固过程中长大形成尺寸较大、圆整度好且分布均匀的 $\alpha_1$ -Al球状晶粒; 第2阶段, 二次重熔阶段保留下的液相在浆料充填型腔的过程中发生异质形核并在高压下长大, 形成细小的 $\alpha_2$ -Al晶粒。但本研究中由于连杆厚度较薄且模具预热温度较

低, 铸件快速凝固, 故导致 $\alpha_2$ -Al颗粒来不及长大且圆整度较低。

图6为半固态挤压铸造连杆微观组织的平均晶粒尺寸和形状因子随浇注温度的变化曲线。由图6可见: 随着浇注温度的升高, 平均晶粒尺寸及形状因子均有一定的提高。如图5a所示, 当浇注温度为570 °C时, 铸件微观组织包括细小的初生 $\alpha_1$ -Al晶粒和大量形状不规则的 $\alpha_2$ -Al小晶粒, 快速凝固的 $\alpha_2$ -Al颗粒来不及长大, 导致其晶粒尺寸以及圆整度较小。故浇注温度为570 °C时的平均晶粒尺寸及形状因子均较小。如图5b所示, 当浇注温度升高至575 °C时, 初生 $\alpha_1$ -Al晶粒尺寸及形状变化不大,  $\alpha_2$ -Al颗粒尺寸略有增大且形状更加圆整, 平均晶粒尺寸及形状因子增加并不明显。如图5c所示, 当浇注温度为580 °C时, 微观组织主要由粗大的初生 $\alpha_1$ -Al球状晶粒组成,  $\alpha_2$ -Al颗粒几乎可以忽略, 故其平均晶粒直径以及形状因子进一步增大。

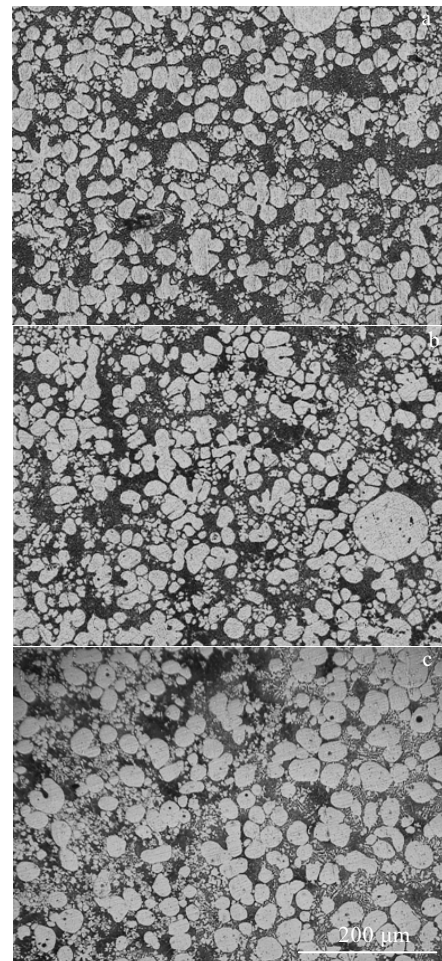


图5 不同浇注温度下半固态挤压铸造连杆的微观组织

Fig.5 Microstructures of connecting rods fabricated by SSSC process at different pouring temperatures: (a) 570 °C, (b) 575 °C, and (c) 580 °C

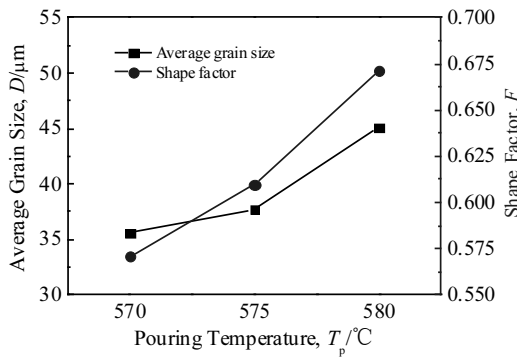


图 6 平均晶粒尺寸和形状因子随浇注温度的变化曲线

Fig.6 Variations of the average grain size and shape factor with pouring temperature

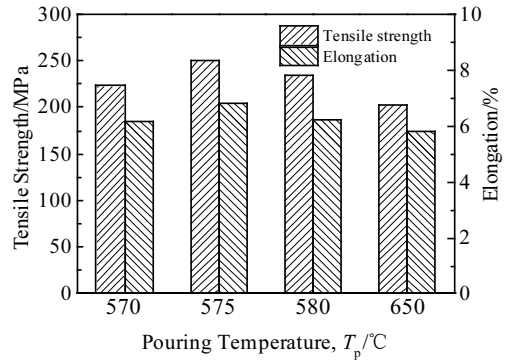


图 7 浇注温度对连杆力学性能的影响

Fig.7 Effects of pouring temperature on the mechanical properties of connecting rods

图 7 为液态浇注 (650 °C) 及不同半固态浇注温度 (570~580 °C) 下连杆的抗拉强度和伸长率的柱状图。可见, 半固态挤压铸造连杆的抗拉强度和伸长率均明显高于传统液态挤压铸造连杆, 且当浇注温度为 575 °C 时连杆的力学性能最好。当浇注温度过高 (580~650 °C) 时, 浆料的固相分数小, 浆料中的形核颗粒少, 则初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒会充分长大从而形成粗大晶粒。此外, 浇注温度过高时, 浆料的粘度很小, 则浆料充填型腔过程中易产生紊流效应, 这将使连杆铸件的力学性能降低<sup>[12]</sup>。相反, 当浇注温度过低 (570 °C) 时, 浆料的固相分数很高, 浆料中的形核颗粒很多, 形核率增大, 大量的形核颗粒最终生长成为尺寸较小但形状不规则的  $\alpha_2$ -Al 颗粒。而当浇注温度 575 °C 时, 内部的初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒尺寸均匀, 形状圆整, 且  $\alpha_2$ -Al 颗粒均匀分布在其周围, 故浇注温度为 575 °C 时连杆的力学性能略高于 570 °C 时的连杆。由上述分析可见: 575 °C 为最佳浇注温度。

## 2.2 挤压压力的影响

浇注温度为 575 °C, 模具预热温度为 250 °C, 挤压压力分别为 25、50、75 和 100 MPa 时, 铸件的充填状态如图 8 所示。由图 8 可见, 当挤压压力为 25 MPa 时, 挤压力不足导致大连杆的大头充填不满且小连杆只有部分充填, 存在明显的宏观缺陷。当挤压压力超过 50 MPa, 连杆铸件均充填饱满, 轮廓清晰且表面光滑, 无明显的宏观缺陷。同理, 由于挤压压力为 25 MPa 时, 铸件存在明显的缺陷, 故后续不再对其进行相关的微观组织及力学性能分析。不同挤压压力下半固态挤压铸造连杆的微观组织如图 9 所示。如图 9a 所示, 当挤压压力为 50 MPa 时, 微观组织中存在部分蔷薇状初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒,  $\alpha_2$ -Al 小晶粒分布不均且形状不规

则。如图 9b 所示, 当挤压压力增大到 75 MPa 时, 大部分初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒逐渐向球状转化并且晶粒更加圆整。如图 9c 所示, 当挤压压力为 100 MPa 时, 初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒进一步球化, 且  $\alpha_2$ -Al 小晶粒均匀分布在其周围。

半固态挤压铸造成形过程中, 增加挤压压力对微观组织演化的影响体现在: 其一, 使金属液相线温度略有升高; 其二, 增加浆料的冷却速率<sup>[11]</sup>。挤压压力对金属液相线的影响可采用 Clausius-Clapeyron 方程<sup>[9]</sup>表示:

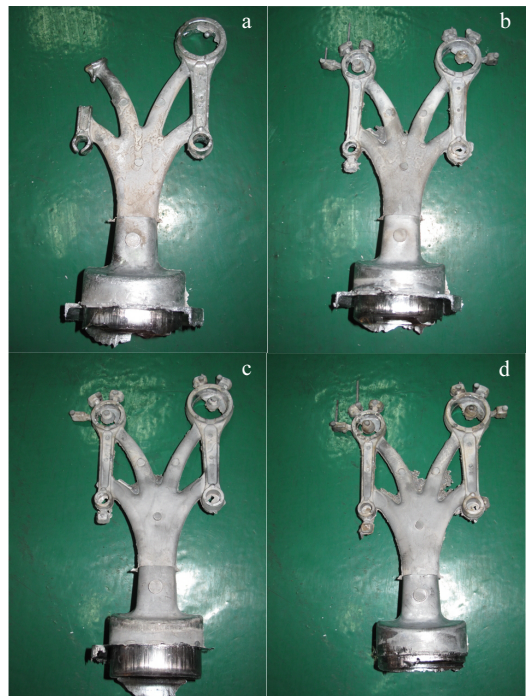


图 8 不同挤压压力下半固态挤压铸造连杆的充填状态

Fig.8 Filling states of connecting rods fabricated by SSSC at different squeeze pressures: (a) 25 MPa, (b) 50 MPa, (c) 75 MPa, and (d) 100 MPa

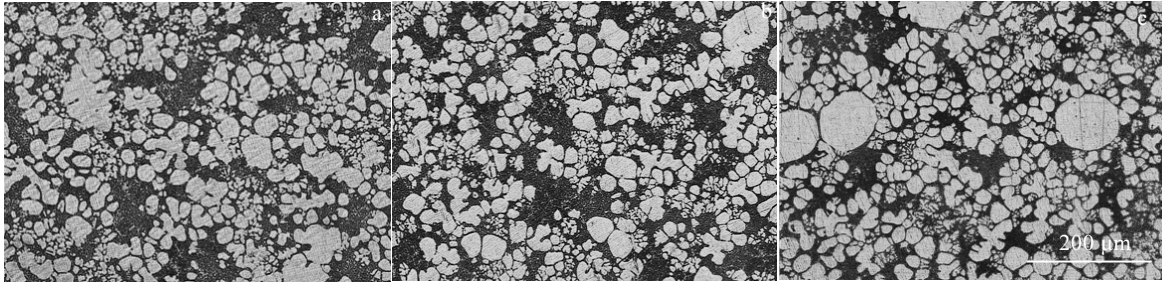


图 9 不同挤压压力下半固态挤压铸造连杆的微观组织

Fig.9 Microstructures of connecting rods fabricated by SSSC process at different squeeze pressures: (a) 50 MPa, (b) 75 MPa, and (c) 100 MPa

$$\frac{\Delta T_f}{\Delta P} = \frac{T_f(V_L - V_S)}{\Delta H_f} \quad (3)$$

式中,  $T_f$  为平衡凝固温度,  $V_L$  和  $V_S$  分别为金属液态和固态的体积比容,  $\Delta H_f$  为金属熔化潜热。

由式 (3) 可得, 增加挤压压力会提高半固态浆料的液相线温度, 则浆料的过冷度增加, 从而降低了晶粒的粗化时间。此外, 增大挤压压力使半固态浆料与模具的表面接触更加紧密, 进而增加浆料与模具的热传导率和冷却速率, 使  $\alpha$ -Al 晶粒来不及过分长大<sup>[15]</sup>。因此, 在上述两方面的共同作用下, 随着挤压压力的增大, 平均晶粒直径逐渐减小, 且形状因子不断增加 (如图 10 所示)。此外, 半固态挤压铸造连杆的抗拉强度和伸长率随挤压压力变化的柱状图如图 11 所示。

由图 11 可见, 连杆的抗拉强度和伸长率均随着挤压压力的增大而增大。挤压压力由 50 MPa 增大至 75 MPa, 铸件的抗拉强度及伸长率均有明显增加, 当挤压压力进一步增大至 100 MPa 时, 铸件的力学性能增幅有限并趋于稳定。这可能是由于当挤压压力超过 75 MPa 后, 进一步增加挤压压力对微观组织的改善不明

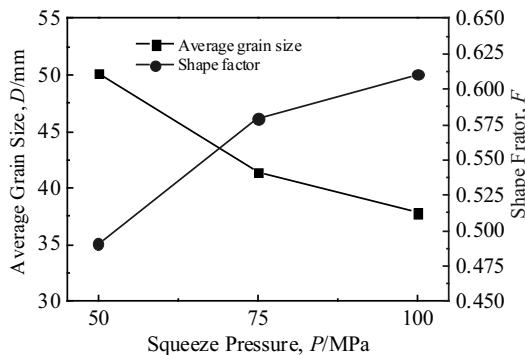


图 10 平均晶粒尺寸和形状因子随挤压压力的变化曲线

Fig.10 Variations of the average grain size and shape factor with squeeze pressures

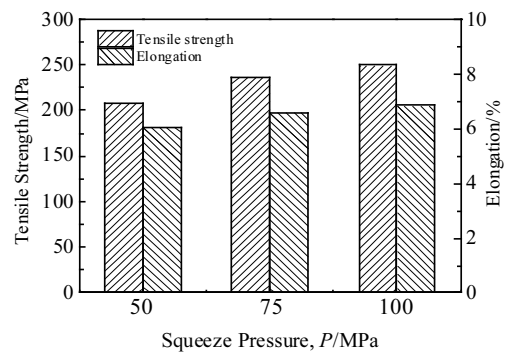


图 11 挤压压力对半固态挤压铸造连杆力学性能的影响

Fig.11 Effects of squeeze pressures on the mechanical properties of connecting rods

显, 导致其力学性能无明显增加<sup>[12]</sup>。此外, 考虑到更高的挤压压力对模具和设备均会产生不利的影响, 因此, 挤压压力应该控制在 100 MPa 左右。

### 2.3 模具预热温度的影响

当浇注温度为 575 °C, 挤压压力为 100 MPa, 模具预热温度分别为 200、250、300 及 350 °C 时, 半固态挤压铸造连杆均能完全充填, 其相应的微观组织如图 12 所示。如图 12a 所示, 当模具预热温度较低时, 初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒主要为球状晶, 也存在小部分的蔷薇状晶粒,  $\alpha_2$ -Al 颗粒特别细小。模具预热温度升高到 250 °C 时, 初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒略有长大且形态有所改善,  $\alpha_2$ -Al 颗粒进一步长大, 如图 12b 所示。进一步升高模具预热温度, 初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒变得更加粗大和圆整,  $\alpha_2$ -Al 颗粒逐渐转化为小枝晶分布在初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒周围, 如图 12c 和 12d 所示。

图 13 为半固态挤压铸造连杆微观组织的平均晶粒尺寸和形状因子随模具预热温度的变化曲线。随着模具预热温度的升高, 初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒逐渐粗化, 平

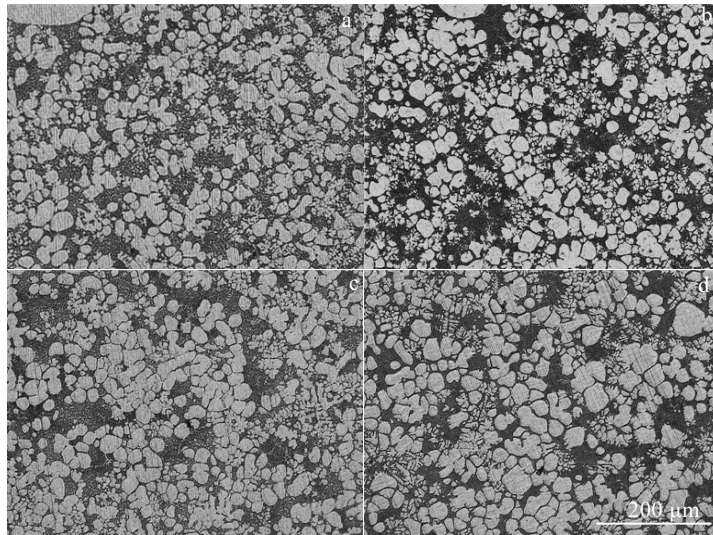


图 12 不同模具预热温度下半固态挤压铸造连杆的微观组织

Fig.12 Microstructures of connecting rod fabricated by SSSC process at different mold preheating temperatures: (a) 200 °C, (b) 250 °C, (c) 300 °C, and (d) 350 °C

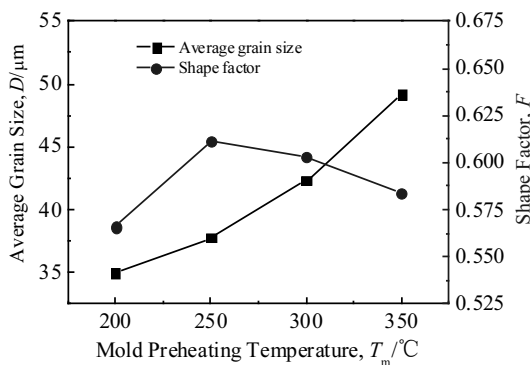


图 13 平均晶粒尺寸和形状因子随模具预热温度的变化曲线  
Fig.13 Variations of the average grain size and shape factor with mold preheating temperatures

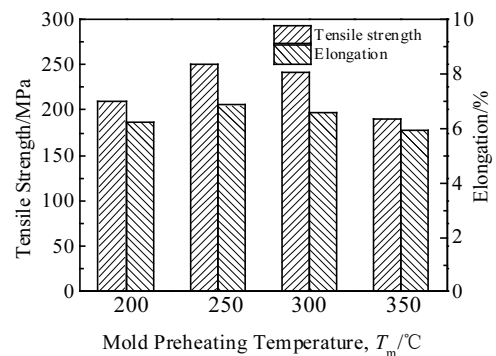


图 14 模具预热温度对半固态挤压铸造连杆力学性能的影响  
Fig.14 Effects of mold preheating temperature on the mechanical properties of connecting rods

均晶粒尺寸和形状因子不断增大，但当模具预热温度过高时，大量的  $\alpha_2$ -Al 小枝晶附着在初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒上，导致形状因子有所下降。

图 14 为半固态挤压铸造连杆的抗拉强度和伸长率随模具预热温度变化的柱状图。由图 14 可见，模具预热温度为 200 °C 时连杆的力学性能明显低于 250 °C 时。模具预热温度过低时，浆料的过冷度增加。过快的冷却速率显著的增加了  $\alpha_2$ -Al 颗粒的数量并减小其尺寸，初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒和  $\alpha_2$ -Al 颗粒来不及粗化圆整<sup>[15]</sup>，其形态较差(如图 12a 所示)，平均晶粒尺寸和形状因子都很小；激冷的浆料在型腔表面形成的薄凝固层在高压充填过程中破碎并卷入浆料中，最终可能夹杂在铸件中，影响连杆的表面光滑程度及力学性能。此外，模具预热温度过低容易产生冷隔现象，也会影响铸件

的力学性能<sup>[16]</sup>。相反，模具预热温度过高浆料冷却速率降低导致其凝固时间较长，初生  $\alpha_1$ -Al 颗粒粗大并且出现部分蔷薇晶， $\alpha_2$ -Al 颗粒转变为小枝晶附着在初生  $\alpha_1$ -Al 晶粒上，导致其形态恶化，故模具预热温度为 300~350 °C 铸件的力学性能逐渐下降，如图 14 所示。因此，模具预热温度应控制在 250 °C 左右。

### 3 结 论

1) 传统液态挤压铸造的铸件充填饱满，微观组织为典型的枝晶组织，其抗拉强度及伸长率低于不同半固态浇注温度下的挤压铸造成形铸件。

2) 浇注温度在 565 °C 时，铸件充填不满，随着浇注温度进一步的升高，铸件充填性能良好。晶粒尺寸及形状因子随着浇注温度的升高而逐渐增大，铸件的抗拉

强度及伸长率先增加后减小。

3) 挤压压力为 25 MPa 时, 铸件难以充填完整, 随着挤压压力的进一步增大, 铸件均充填饱满, 晶粒尺寸不断减小且形状因子不断增大。铸件的机械性能随着挤压压力的升高而不断提高。

4) 随着模具预热温度升高, 铸件的平均晶粒尺寸和形状因子不断增大, 其机械性能逐渐提高; 但模具预热温度超过 300 °C 后, 晶粒尺寸进一步增大而其形状因子减小, 最终导致铸件的机械性能下降。

#### 参考文献 References

- [1] Guan Renguo (管仁国), Ma Weimin (马伟民) *et al.* *Theory and Technology of Semi-solid Metal Forming* (金属半固态成形理论与技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 3
- [2] Wang Yongfei(王永飞), Zhao Shengdun(赵升吨), Zhang Chenyang(张晨阳). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3875
- [3] 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
- [4] Zhao Zude(赵祖德), Luo Shoujing(罗守静). *The Light Metal Semi-solid Forming Technology*(轻合金半固态成形技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1
- [5] Wang Ping, Liu Jing. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(8): 1969
- [6] Zhang Qi(张琦), Cao Miao(曹苗), Cai Jin(蔡进) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(8): 1975
- [7] Zhou Quan(周全), Chen Leping(陈乐平), Xiao Chengbo(肖程波) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(3): 665
- [8] Xing Shuming(邢书明), Bao Peiwei(鲍培玮). *Melted Metal Die Forging*(金属液态模锻)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 9
- [9] Luo Shoujing(罗守静), Chen Bingguang(陈炳光), Qi Pixiang(齐丕骥). *Melted Metal Die Forging and Squeeze Casting* (液态模锻与挤压铸造)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 36
- [10] Lee S M, Kang C G. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* [J], 2011, 225(B2): 184
- [11] Masoumi M, Hu H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(10-11): 3589
- [12] Mo W, Zhang L, Wu G *et al.* *Materials and Design*[J], 2014, 63: 729
- [13] Wang Y, Zhao S, Zhao X *et al.* *Journal of Mechanical Science and Technology*[J], 2017, 31(8): 3917
- [14] Jiang J, Wang Y, Xiao G *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 238: 361
- [15] Vijian P, Arunachalam V P. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 180(1-3): 161
- [16] Jiang Jufu(姜巨福). *Research on the Preparation of AZ91D Semi-solid Billet by New SIMA Method and Thixoforging* (新 SIMA 法制备 AZ91D 半固态坯及其触变模锻研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 8

## Experimental Study on Semi-solid Squeeze Casting Process of ZL104 Aluminum Alloy Connecting Rod

Wang Yongfei<sup>1,2</sup>, Zhao Shengdun<sup>1</sup>, Fan Xiaoguang<sup>2</sup>, Li Shuangjiang<sup>1</sup>, Liu Kuanxin<sup>3</sup>, Zheng Shunqi<sup>3</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Ningbo Branch of China Ordnance Academy, Ningbo 315103, China)

**Abstract:** The filling states, microstructures and mechanical properties of ZL104 aluminum alloy connecting rod prepared by traditional liquid squeeze casting (LSC) and semi-solid squeeze casting (SSSC) processes were investigated. Results show that during the LSC process, the connecting rod is fully filled and its microstructure is a typical dendritic structure. However, its tensile strength and elongation are lower than those of the connecting rod prepared by SSSC process. During the SSSC process, when the pouring temperature is higher than 565 °C, the connecting rod is fully filled; the average grain size and shape factor are improved with the increase of the pouring temperature; the tensile strength and elongation are increased first and then decreased. When the squeezing pressure is higher than 25 MPa, the connecting rod is filled fully; with the increase of the squeezing pressure, the average grain size is gradually decreased, the shape factor is gradually increased, and the mechanical properties are gradually improved. Additionally, with the increase of the mould preheating temperature, the average grain size and shape factor are gradually increased, and mechanical properties are gradually improved. However, when the mould preheating temperature is higher than 300 °C, the average grain size is further increased and the shape factor is decreased, resulting in the decrease of the mechanical properties of the connecting rod.

**Key words:** semi-solid squeeze casting; aluminum alloy connecting rod; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Wang Yongfei, Postdoctor, Assistant Researcher, Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: yongfeio@126.com