

# 挤压压力对挤压铸造 ZL109 铝合金组织和性能的影响

刘桂超<sup>1</sup>, 王月雷<sup>2</sup>, 李玉满<sup>1</sup>, 陈隆波<sup>1</sup>, 陈微<sup>3</sup>

(1. 共青科技职业学院, 江西共青城 332020; 2. 海南科技职业大学, 海南海口 570100;

3. 武汉理工大学, 湖北武汉 430000)

**摘要:** 研究了挤压铸造过程中挤压压力对ZL109过共晶铝合金组织和性能的影响。试验选择在200 t液压机上进行挤压铸造, 设计挤压压力为75 MPa、95 MPa、115 MPa进行评估。结果表明, 挤压铸造工艺改善了铸件组织, 提高了合金的力学性能。挤压压力的变化对合金的初生Si、共晶组织的尺寸、体积分数和力学性能影响显著。在试验范围内, 挤压压力为115 MPa下的初生Si颗粒直径相较于75 MPa与95 MPa分别减小了23.5%和28.4%、共晶Si的平均尺寸分别减少了22.1%和50.3%;  $\alpha$ -Al的尺寸分别降低了13.6%和18.3%; 挤压压力从75 MPa增加到95 MPa, 合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度分别提高13.9%、22.6%、19.9%和9.4%; 压力从95 MPa提高到115 MPa, 抗拉强度和伸长率分别降低2.4%和6.6%。

**关键词:** 挤压铸造; 压力; ZL109铝合金; 显微组织; 力学性能

## 作者简介:

刘桂超(1982-), 女, 本科, 讲师, 研究方向机械工程。E-mail: liuguichao2020@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

09-1158-05

## 基金项目:

江西省高等学校教学改革研究省级课题(JXJG-21-94-1)。

## 收稿日期:

2022-11-07 收到初稿,

2023-02-02 收到修订稿。

ZL109合金因其重量轻、力学性能优良、耐磨性和耐腐蚀性能好等特点, 已广泛应用于汽车、航空航天、国防和海洋等领域<sup>[1]</sup>。然而, 由于ZL109合金凝固范围很广, 在凝固过程中容易形成各种形式的孔隙和偏析, 在铸造过程中对ZL109合金施加压力会导致含Si相的不均匀分布, 产生气孔等缺陷并导致合金力学性能如抗拉强度和伸长率的严重损失<sup>[2]</sup>。另外, 诸多加工参数, 如凝固时施加的压力、压力持续时间、浇注温度、模具预热温度和模具材料等, 都会影响挤压铸造ZL109合金的显微组织和力学性能<sup>[3]</sup>。挤压铸造是一种结合了重力压铸和闭式模锻优点的特殊铸造工艺, 将熔化后的金属液注入到封闭的模具中, 在铸件凝固过程中施加挤压压力, 可获得力学性能优良、结构精细、表面光洁度好、气孔和收缩小的近净成形结构件<sup>[4]</sup>。同时, 在凝固过程中施加的压力消除了凝固金属和熔体之间的孔隙, 使固液相接触面增加, 因此枝晶臂间距和凝固时间也能得到显著缩短<sup>[5]</sup>。挤压铸造的优点还包括: 可以不设浇注系统和冒口系统, 易获得近净成形铸件, 能够使用各种铸造和变形合金, 改善合金的抗磨损和耐腐蚀性能, 提高合金的硬度和力学性能等<sup>[6]</sup>。研究表明, 施加挤压力的大小是影响ZL109合金组织和性能最有效的参数<sup>[7]</sup>, 要彻底消除气孔和缩孔现象, 压力必须达到106 MPa以上, 而研究中在压力为23 MPa和46 MPa时, 两种条件下界面传热系数没有太大差异; 当施加压力达到75 MPa后, 铸模界面处的压力对界面传热系数的影响非常显著<sup>[8]</sup>。显然, 为保证获得高质量的挤压铸造ZL109合金铸件, 必须选择合适的挤压铸造参数水平, 因此本文以ZL109合金为研究对象, 分别研究了不同的挤压压力对ZL109合金的微观组织和力学性能的影响, 以期望对挤压铸造ZL109合金零件的工业生产提供技术参考。

## 1 试验材料与方法

本文使用三基公司SCV立式挤压铸造机对ZL109零件进行加工, 图1中为该挤压



图1 挤压铸造机  
Fig. 1 Squeezing casting machine

铸造机的示意图。本研究选择不同的挤压压力（75 MPa、95 MPa、115 MPa）对ZL109合金进行加工，在每种压力下加工5个样品并进行观察，最终统计分析了各个挤压压力对ZL109合金显微组织和力学性能的影响。本文使用的ZL109合金铸锭的化学成分分析结果如表1所示。熔炼过程先使用2 kg的ZL109合金铸锭在电阻炉的石墨坩埚中熔化，然后用 $C_2Cl_6$ 气体进行熔体的脱气。随后将石墨坩埚转移到恒温保温炉中，在700 °C下保温至少30 min，使其熔体分布均匀。挤压铸造模具材料采用H13工具钢，经电加热器在260 °C温度下预热，采用石墨胶体对模具进行润滑。挤压铸造试验使用100 t容量的液压机，使用直径为50 cm的活塞，在680 °C的浇注温度与75 MPa、95 MPa和115 MPa的压力下一直保持压力直到ZL109合金凝固结束。挤压铸造模具主要有凸模、凹模及顶杆构成，模具单边间隙0.1 mm，脱模斜度3°，铸造时留在凸模部分的少量气体，通过凸模及凹模间隙排出。本研究制备零件为某商用车车架，零件尺寸为长19 cm、宽9 cm、壁厚3 cm，零件重1.15 kg，零件形貌如图2所示。零件挤压铸造过程中加压开始时间为3~5 s，保压时间为12 s，挤压铸造完毕取出零件放入砂堆冷却至150 °C后再取出空冷，以防止铸件表面产生裂纹。另外，本试验在相同浇注温度675 °C下，使用重力铸造的工艺加工了与挤压铸造相同型号的试样，用来进行显微组织的对比。试验中金相取样位置选择铸件顶部20 mm处进行切片，所有金相试样均用凯勒试剂进行腐蚀，之后进行抛光，利用蔡司光学显微镜和日立扫描电镜对其显微组织进行了观察研究。本文采用布氏硬度计进行ZL109合金硬度的测试，测试力

表1 ZL109合金化学成分测试结果  
Table 1 Chemical composition of the ZL109 alloy prepared

									$w_B / \%$
Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Ti	Zn	Al	
17.11	4.96	1.07	0.91	0.22	0.03	0.11	0.09	余量	

为30 kg，球径2.5 mm。最后，按照图2所示拉伸试样型号对合金试样进行线切割制备薄板拉伸试样，并在应变速率为 $0.002 \text{ s}^{-1}$ 的室温条件下进行挤压铸造ZL109合金的拉伸试验。

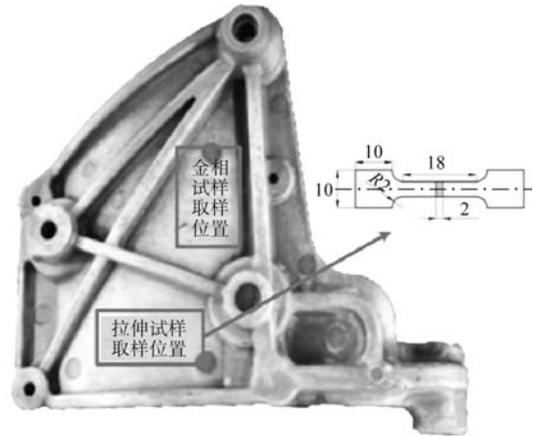


图2 拉伸试样规格示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the tensile specimen specifications

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 微观组织分析

图3为ZL109合金在重力铸造的条件下的显微组织金相照片，由图可见，通过重力铸造得到的ZL109合金凝固组织中，存在着较为粗大的初生Si颗粒、共晶 $\alpha$ -Al相、共晶Si相以及其他金属间化合物。同时，重力铸造过程中较宽的凝固范围和较低的凝固速率会导致大量气孔缺陷的形成，使得大量的初生Si浮在铸件上部，并同时形成较大的针状共晶Si，使得ZL109合金的力学性能和耐磨损性能大幅度降低。因此，控制和改变Si颗粒的尺寸和分布是ZL109合金铸造和凝固过程中最重要的挑战之一。图4为ZL109合金试样在施加挤压压力后的光学显微图像，其中标识出了合金中各组织与相的形貌特征。相较于重力铸造，通过挤压铸造所得到的ZL109合金组织更加致密，并未观察到明显的气

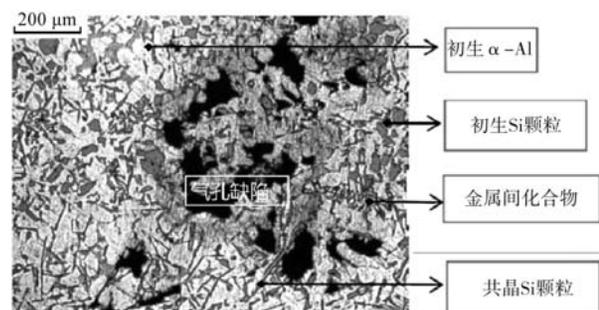


图3 重力铸造下ZL109合金的金相组织  
Fig. 3 The metallographic microstructure of the ZL109 alloy under gravity casting

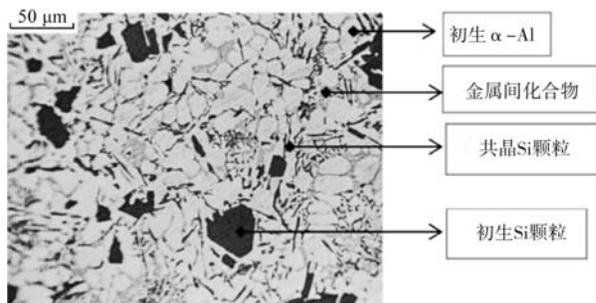


图4 挤压铸造ZL109合金组织和相的分布

Fig. 4 Microstructure and phase distribution of the squeezing casting ZL109 alloy

孔缺陷。

图5和表2中的结果体现了在施加不同挤压压力的条件下, 挤压铸造ZL109合金初生Si颗粒、共晶Si颗粒及 $\alpha$ -Al相不同测试参数的区别。从图5和表2中分析得到, 在增加施加的压力从75 MPa至95 MPa的过程中, ZL109合金的初生Si颗粒从24.3  $\mu\text{m}$ 下降到了18.6  $\mu\text{m}$ , 当压力从95 MPa升高至115 MPa, 初晶Si颗粒尺寸进一步下降到17.4  $\mu\text{m}$ , 相较于压力为75 MPa与95 MPa时分别减小了23.5%和28.4%。此外, 初生Si颗粒的平均长宽比从75 MPa下的2.06下降到95 MPa下的1.75, 降低了15.1%; 在115 MPa下时为1.70, 相比于75 MPa的压力

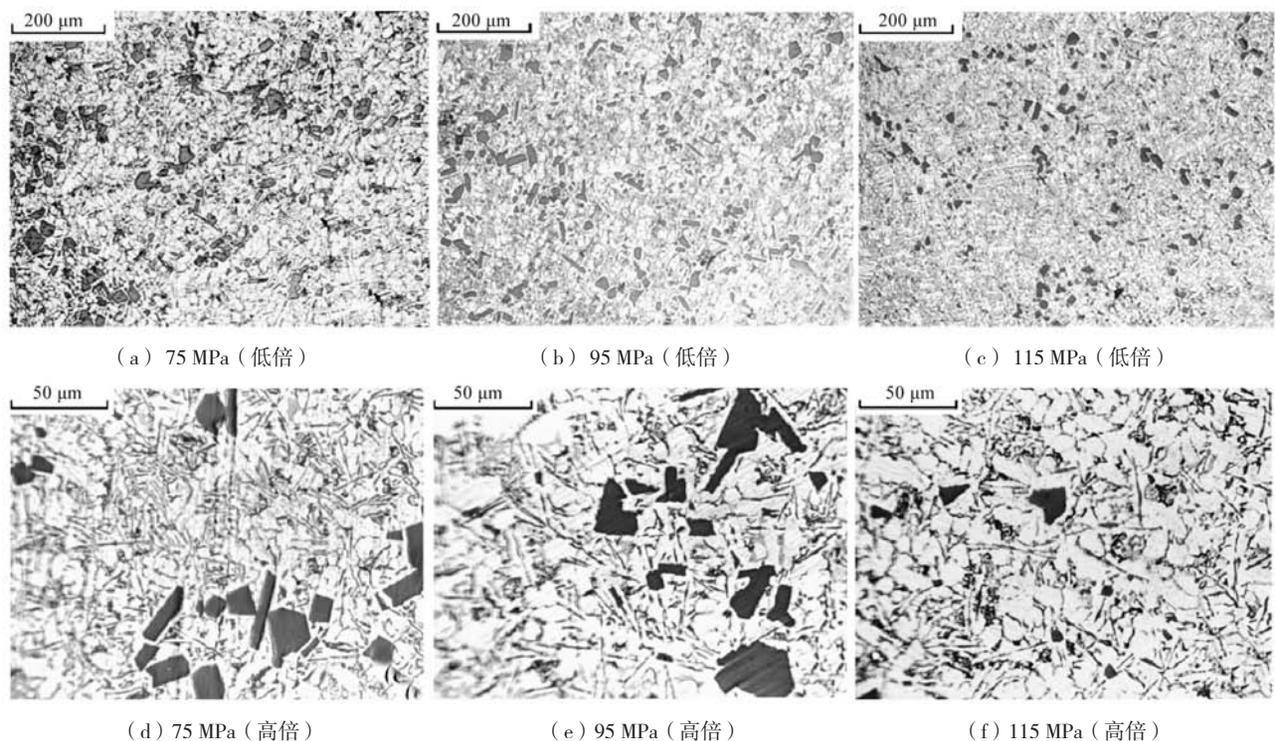


图5 不同压力下挤压铸造ZL109合金的显微组织

Fig. 5 Microstructures of the ZL109 alloys casted by extrusion under different pressures

下降了21.2%。

除初晶Si颗粒外, 共晶Si颗粒也是ZL109合金中重要的特征组织, 从图5c中可以看出, 当施加压力增加到115 MPa时, Si共晶相细化程度显著提高, 同时随着压力的增加, 共晶Si的分布更为合理。在表2的定量分析中表明, 当施加压力从75 MPa增加到95 MPa和115 MPa时, 共晶Si的平均尺寸为16.3  $\mu\text{m}$ 、12.7  $\mu\text{m}$ 和8.1  $\mu\text{m}$ , 相较于75 MPa与95 MPa时分别减少了22.1%和50.3%。另外, 挤压铸造过程中施加的压力对ZL109合金中的 $\alpha$ -Al相也有积极的影响。如表2所示, 随着施加压力的增加,  $\alpha$ -Al相的晶粒尺寸逐渐减小, 当压力为75 MPa时,  $\alpha$ -Al相的晶粒尺寸为16.9  $\mu\text{m}$ ; 当压力为95 MPa时,  $\alpha$ -Al相的晶粒尺寸为14.6  $\mu\text{m}$ ; 当压力为

表2 ZL109合金在不同挤压压力下的晶粒尺寸及晶粒细化程度

Table 2 Grain size and grain refinement of the ZL109 alloy under different pressures

挤压压力/MPa	初生Si的晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	初晶Si颗粒的长宽比	$\alpha$ -Al晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	共晶Si颗粒的平均尺寸/ $\mu\text{m}$
75	24.3	2.06	16.9	16.3
95	18.6	1.75	14.6	12.7
115	17.4	1.70	13.8	8.1

115 MPa时,  $\alpha$ -Al相的晶粒尺寸为13.8  $\mu\text{m}$ ; 随着压力的增加,  $\alpha$ -Al相的尺寸相较于75 MPa与95 MPa的条件下分别降低了13.6%和18.3%。随挤压压力升高, 显微组织的细化是由于ZL109合金的液相线温度会随挤压压力

的增大而降低,通过增加施加的压力,可以明显地看到共晶组织的体积分数增加,初生Si的体积分数降低。此外,压力可以提高凝固过程中的形核速率,从而细化ZL109合金的组织。

## 2.2 力学性能

图6展示了在不同挤压压力下,挤压铸造ZL109合金的应力-应变曲线,从图6的曲线中可以看出,随着加工过程中挤压力的变化,ZL109合金的力学性能会随之产生显著的变化。表3描述了ZL109合金试样的拉伸和硬度测试结果。当压力从75 MPa增加到95 MPa时,ZL109合金的所有力学性能都有所改善,但当压力增加到115 MPa时,ZL109合金仅在硬度和屈服强度上有所改善,抗拉强度和伸长率相对降低。当ZL109合金在挤压力为75 MPa进行加工时,抗拉强度为209.68 MPa,屈服强度为83.67 MPa,伸长率为6.73%,布氏硬度为120.5;当挤压压力升高至95 MPa时,ZL109合金的力学性能均随之增加,抗拉强度升高到了238.80 MPa,屈服强度也随之升高至102.54 MPa,伸长率升高为8.07%,布氏硬度则变大至131.8;当ZL109合金的挤压压力进一步增加至115 MPa后,抗拉强度和伸长率呈现

表3 ZL109合金在不同挤压压力下的力学性能  
Table 3 Mechanical properties of the ZL109 alloys at different pressures

挤压力/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 HB
75	209.68	83.67	6.73	120.5
95	238.80	102.54	8.07	131.8
115	233.31	120.38	7.54	131.9

出下降的趋势,降低为233.31 MPa和7.54%,但屈服强度和硬度则体现为升高趋势,为120.38 MPa和131.9。

合金中Si颗粒的存在会导致ZL109合金的延展性的降低,如图7所示为ZL109合金的断口扫描照片,裂纹由初生Si颗粒以及共晶Si发生并产生扩展。在拉伸过程中,裂纹从较大的初生Si及共晶Si颗粒上发生,使应力集中在Si颗粒与 $\alpha$ -Al相的界面上。其中初生Si颗粒的形貌特性是影响ZL109合金力学性能的重要因素之一,当挤压压力大于95 MPa时,ZL109合金熔体会产生过冷,这在很大程度上会降低Si原子在熔体中析出并凝固的机会,进而抑制了初生Si的形成,最终影响了ZL109合金的强度(图5)。此外,随着压力的增加,合金的冷却速度会随之增大,当施加压力从75 MPa增加到95 MPa时,ZL109合金的抗拉强度提高了13.9%。然而,结果中可以看出,当压力增大到超过这个水平不会对抗拉强度产生显著影响;当压力从95 MPa增加到115 MPa时,ZL109合金的抗拉强度和伸长率会产生一定程度的下降,但下降幅度不明显。一般来说,抗拉强度与合金内的孔隙率有正相关的关系,当施加压力增加到95 MPa时,ZL109合金内的微孔隙逐渐消失,从而表现为ZL109合金的硬度和强度随之升高。当施加压力升高至115 MPa时,ZL109合金的屈服强度最高,这是由于施加压力降低了孔隙率,增加了传热系数,使ZL109合金的组织得到了细化。结果表明:大而规则的初晶Si颗粒以及各种金属间化合物是提高ZL109合金强度的主要因素;另一方面,这些脆性初晶Si颗粒导致

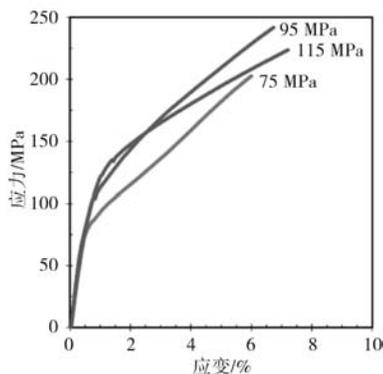
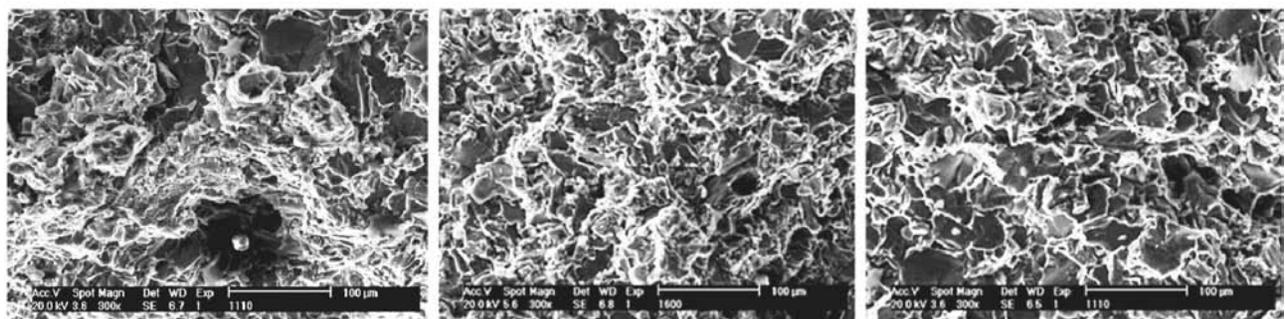


图6 不同压力下挤压铸造ZL109合金的应力应变曲线  
Fig. 6 Stress and strain curves of the ZL109 alloys casted by extrusion under different pressures



(a) 75 MPa

(b) 95 MPa

(c) 115 MPa

图7 挤压铸造ZL109合金断口形貌扫描电镜照片

Fig. 7 SEM images of fracture morphologies of the squeezing casting ZL109 alloys

了合金的延展性降低。如图7所示, 75 MPa挤压压力的样品中, 在断口表面上观察到若干孔洞, 证明裂纹是从缩孔及初生Si颗粒处开始扩展的, 因此合金的脆性断裂倾向增加。95 MPa与115 MPa的挤压条件下, 断口表面的孔洞数量明显减少, 表明合金脆性断裂倾向的降低。但是由于挤压压力超过95 MPa后合金内孔隙率的降低达到了极限, 且合金的晶粒细化幅度降低, 使得挤压压力在95 MPa与115 MPa条件下的合金力学性能相差幅度不大, 断口均观察到明显的韧窝存在, 表现为韧性断裂。

### 3 结论

(1) 压力对挤压铸造ZL109合金的组织 and 力学性

能影响显著。随挤压压力的增加, 合金的初生Si颗粒、共晶Si相及 $\alpha$ -Al晶粒的平均尺寸均呈现为逐渐降低的趋势。

(2) 将挤压压力提高到95 MPa以上, ZL109合金内的孔隙逐渐消失, 合金的力学性能逐渐提高; 当施加压力升高至115 MPa时, 对合金的抗拉强度和硬度没有显著影响。

(3) 大而规则的初晶Si颗粒以及各种金属间化合物提高了ZL109合金的力学性能, 同时脆性初晶Si颗粒导致合金的延展性降低。挤压压力为75 MPa时, 裂纹从缩孔及初生Si颗粒处开始扩展, 合金呈脆性断裂倾向, 挤压压力在95 MPa与11 MPa条件下的合金向韧性断裂转化。

#### 参考文献:

- [1] 罗继相, 白旭白, 谌伟, 等. 铝合金挤压铸造技术的研究与应用 [J]. 铸造, 2002 (8): 464-469.
- [2] 李峰, 刘向东, 王文印, 等. 挤压铸造对A356铝合金组织的影响 [J]. 铸造, 2008 (4): 347-349.
- [3] 代颖辉. 挤压铸造A356铝合金重载车轮的模具设计 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 155-157, 161.
- [4] 涂卫军, 王刚. 铝合金汽车转向节挤压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 740-743.
- [5] 王伟, 崔晓明, 石博, 等. 铝合金轮毂连接盘挤压铸造数值模拟 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 306-310.
- [6] 范卫忠, 黄建良, 闫俊, 等. 挤压铸造高强韧Al-Si-Cu-Mg合金组织性能研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (4): 513-516.
- [7] 陈云, 李杰, 罗继相, 等. 铝合金发动机悬置支架挤压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 167-173.
- [8] 李道忠, 丁武学, 孙宇, 等. 汽车支架半固态挤压铸造工艺参数的优化 [J]. 热加工工艺, 2022 (15): 54-58, 61.

## Effect of Extrusion Pressure on Microstructure and Properties of Squeezing Casting ZL109 Aluminum Alloy

LIU Gui-chao<sup>1</sup>, WANG Yue-lei<sup>2</sup>, LI Yu-man<sup>1</sup>, CHEN Long-bo<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>3</sup>

(1. Gongqing Institute of Science and Technology, Gongqingcheng 332020, Jiangxi, China; 2. Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 570100, Hainan, China; 3. Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, Hubei, China)

#### Abstract:

The effect of squeezing casting pressure on microstructure and mechanical properties of ZL109 hypereutectic aluminum alloy was studied in this paper. The extrusion casting was carried out on a 20-ton hydraulic press machine, and the designed extrusion pressures were 75 MPa, 95 MPa and 115 MPa for evaluation, respectively. The results showed that the extrusion casting process improved the microstructure and mechanical properties of the alloy. The change of extrusion pressure had significant effect on the primary Si, eutectic microstructure size, volume fraction and mechanical properties. The results showed that when the extrusion pressure is 115MPa, the primary Si particle diameter decreases by 23.5% and 28.4% compared with 75 MPa and 95 MPa, respectively, and the average size of eutectic Si decreased by 22.1% and 50.3%, respectively. The sizes of  $\alpha$ -Al decreased 13.6% and 18.3%. When the extrusion pressure increased from 75 MPa to 95 MPa, the tensile strength, yield strength, elongation and hardness increased by 13.9%, 22.6%, 19.9% and 9.4%. When the pressure increased from 95 MPa to 115 MPa, the tensile strength and elongation decreased by 2.4% and 6.6%, respectively.

#### Key words:

squeezing casting; pressure; ZL109 aluminum alloy; microstructure; mechanical properties