

半固态成形对 AZ65 镁合金组织演变与力学性能的影响

黄亮¹, 吕峥², 刘骞², 唐思文², 陈友明², 欧云²

(1. 株洲时代金属制造有限公司, 高功效轻合金构件成形技术及耐损伤性能评价湖南省工程研究中心, 湖南株洲 412000; 2. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 采用金属型铸造与半固态触变压铸工艺制备 AZ65 镁合金 (Mg-6Al-5Zn), 对比研究了两种成形工艺下合金的微观组织及力学性能, 并分析了等温热处理过程中合金组织演变规律。结果表明: 铸态组织为细小 α -Mg 枝晶, 晶界分布着不连续的网状 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 与 $Mg_{17}Al_{12}$ 共晶相。等温热处理过程中, 经枝晶碎断、球化和粗化, α -Mg 相转变为近球状。在 560 °C 保温 30 min 可获得固相等效直径低至 43.31 μm 的优良半固态组织。与等温组织相比, 半固态触变成形合金微观组织中颗粒圆整度不佳。620 °C 保温温度下, 触变成形合金的抗拉强度较金属型铸造态有所提升, 拉伸断口呈现解理断裂与沿晶断裂的混合断裂模式。

关键词: AZ65 镁合金; 半固态压铸; 组织演变; 力学性能

中图分类号: TG146.2+2; TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0394-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0055

Effect of Semi-Solid Forming on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ65 Magnesium Alloy

HUANG Liang¹, LÜ Zheng², LIU Qian², TANG Si-wen², CHEN You-ming², OU Yun²

(1. Hunan Provincial Engineering Research Center for High-Efficiency Light Alloy Component Forming Technology and Damage Tolerance Performance Evaluation, Zhuzhou Times Metal Manufacturing Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: AZ65 magnesium alloys (Mg-6Al-5Zn) were prepared using permanent mold casting and semi-solid thixotropic die casting. The microstructure and mechanical properties of the alloy under two forming processes were compared and studied, and the microstructure evolution during isothermal heat treatment was analyzed. The results show that the as-cast microstructure consists of fine α -Mg dendrites with discontinuous networks of $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ and $Mg_{17}Al_{12}$ eutectic phases distributed along grain boundaries. During isothermal heat treatment, after dendrite fragmentation, spheroidization and coarsening, the α -Mg phase transforms into a near-spherical shape. A favorable semi-solid microstructure with a solid phase equivalent diameter of 43.31 μm is obtained after holding at 560 °C for 30 min. Compared with the isothermal microstructure, the particle roundness in the microstructure of the semi-solid thixofomed alloy is not good. The tensile strength of the thixofomed alloy is higher than that of the permanent mold cast specimen under the condition of holding at 620 °C, and the fracture analysis reveals a mixed fracture mode of cleavage and intergranular fracture.

Key words: AZ65 magnesium alloy; semi-solid die casting; microstructure evolution; mechanical property

镁及其合金具有密度低、比强度高、减震性能好等优点, 是航空航天、汽车及 3C 等领域理想的轻质高性能结构材料^[1-3]。镁合金常用的成形方法有常规金属型铸造、低压铸造、高压铸造和半固态成形 (Semi-solid processing, SSP) 等^[4]。其中, 半固态成形因近净成形能力强、成形温度低、能耗小以及可有效减少铸

造缺陷等优势^[5], 已广泛且成熟应用于镁合金领域^[6-7]。半固态浆料的制备是半固态成形中最重要的准备工作, 主要方法有机械搅拌、电磁搅拌、应变诱导熔化激活 (SIMA)、喷射沉积及等温热处理 (SSIT) 等^[8-9]。在众多方法中, 等温热处理于金属材料固液两相温度区间进行成形, 成本低且工艺过程简单, 其核心优势在于

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52005176)。

收稿日期: 2025-10-10 收到初稿, 2026-01-22 收到修订稿。

作者简介: 黄亮 (1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为轻合金成型。E-mail: ryan-huang@timesmetal.com

通信作者: 吕峥, 男, 博士, 主要研究方向为合金材料的设计和制备。E-mail: lvzhen-g2008@163.com

引用格式: 黄亮, 吕峥, 刘骞, 等. 半固态成形对 AZ65 镁合金组织演变与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (4): 394-400.

HUANG Liang, LÜ Zheng, LIU Qian, et al. Effect of semi-solid forming on microstructure evolution and mechanical properties of AZ65 magnesium alloy [J]. Foundry, 2026, 75 (4): 394-400.

无需单独开展半固态坯料的制备工序,成形环节氧化损失小,正受到越来越多研究者的青睐。半固态成形工艺主要有半固态流变成形和半固态触变成形两种,触变成形完美解决了半固态浆料无法保存和运输的问题^[10],易实现自动化操作,极大地提高了生产效率^[11],是目前镁合金半固态成形中最重要的发展方向。

Mg-Al合金是应用最为广泛的镁合金体系, Mg-Al-Zn系合金作为其重要分支,凭借高比强度和比刚度以及良好的高温抗蠕变性能,展现出广阔的应用前景^[12-14]。WANG等^[15]研究发现半固态触变成形可改变Mg-Al合金的第二相形貌和分布状态,使孔隙率大幅降低,晶粒进一步细化,显著提高铸件力学性能。PUTRA等^[16]对比研究了常规铸造与触变成形工艺下Mg-Al-Zn合金的显微组织和力学性能,发现触变成形试样的硬度及强度均优于常规铸造试样,组织由枝晶转变为球状晶粒。本课题以AZ56镁合金(名义成分Mg-6Al-5Zn,质量分数/%)为研究材料,采用普通金属型铸造及半固态触变压铸工艺进行成形,对比了合金的力学性能差异,着重分析了等温热处理过程中合金的组织演变规律,旨在为半固态成形工艺参数的优化提供基础数据。

1 试样制备与方法

试验用AZ65镁合金以工业高纯(纯度>99.9%)镁、锌、铝为原料,在SG-7.5 kW坩埚电阻炉中进行熔配,温控系统为KSW-3恒温控制箱。在预热至暗红色的坩埚内撒覆RJ-2熔剂,加入预热的纯镁锭,升温至680℃待其完全熔化后,依次加入纯锌与纯铝,再升温至740℃,以C₂Cl₆进行精炼处理并静置10~15 min;在SO₂+CO₂混合气体与氩气双重保护下,于715℃将熔体浇入不锈钢金属型模具,获得尺寸为Φ75 mm×90 mm的铸锭。

半固态触变压铸成形在DAK450-54型冷室压铸机

上完成,将压铸坯料在605、610、615与620℃分别保温60 min使其部分重熔后放入模具,模具温度为250℃,料筒温度为590℃,压铸速度为1 m·s⁻¹,压力为390 MPa,保压30 s,获得尺寸为Φ30 mm×60 mm的圆柱形压铸件。

为探明保温温度对合金组织演变的影响,采用小样(金属型铸锭)单独进行等温热处理。为研究液相形成的整个过程,将铸锭保温温度分别设置为500、560、580和590℃,保温30 min进行部分重熔后立刻置于冷水中水淬,获得半固态组织。

用于组织观察及力学性能测试的试样均从同一铸锭或触变压铸件上截取,加工成Φ15 mm×10 mm的小圆柱,经8%硝酸酒精溶液抛光、侵蚀后备用。采用Olympus BX51M光学显微镜(OM)及JSM-6700F场发射扫描电镜(SEM)观察微观组织。在D/Max-2400型X射线衍射仪(XRD)上进行物相分析,工作参数为40 kV、100 mA,扫描速率为5(°)·min⁻¹,2θ范围为20°~80°。利用Image-Pro Plus图像分析软件对组织特征进行定量表征,测量参数包括初生固相颗粒面积、等效直径及周长。等效直径(d)与形状因子(f)按下式计算:

$$d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

$$f = \frac{p^2}{4\pi A} \quad (2)$$

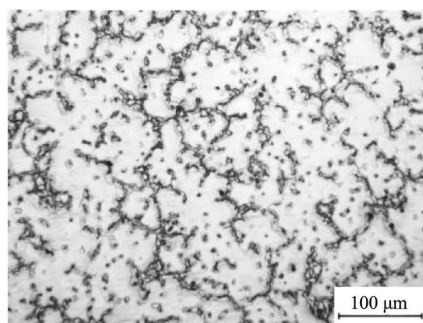
式中: p 为初生固相颗粒周长; A 为初生固相颗粒面积。

当形状因子 $f=1$ 时,晶粒呈理想球状; f 越偏离1,则晶粒形貌越不规则。

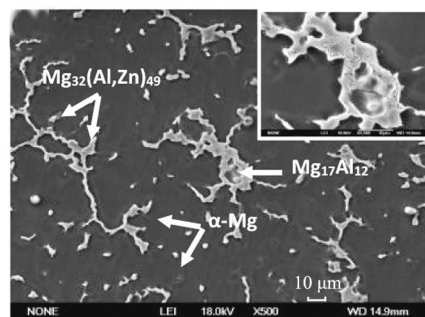
2 试验结果及分析

2.1 铸态微观组织分析

铸态AZ65镁合金凝固组织的微观形貌如图1所示。由OM图可以看到,合金组织呈细小枝晶形貌,基



(a) OM



(b) SEM

图1 铸态AZ65镁合金微观组织

Fig. 1 Microstructures of as-cast AZ65 magnesium alloy

体为白色衬度 α -Mg相, 晶界处分布着不连续的网状共晶第二相。共晶相多呈“骨骼”状, 少量呈颗粒状。结合XRD测试结果(图2)可知, 合金由 α -Mg基体、三元共晶相 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 及少量二元共晶相 $Mg_{17}Al_{12}$ 组成。 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相呈骨骼或颗粒状, $Mg_{17}Al_{12}$ 相则在晶界呈“人”字形分布。依据Mg-Zn-Al三元相图^[17]及Zhang等^[18]的研究, AZ65镁合金的凝固过程为 $L \rightarrow \alpha$ -Mg+ $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ + $Mg_{17}Al_{12}$, 共晶温度约 387 °C。

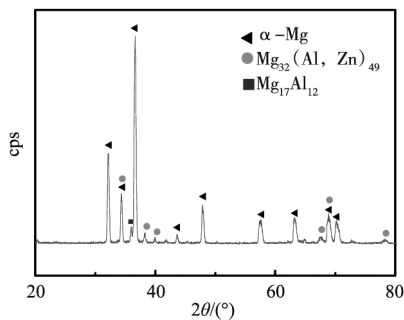


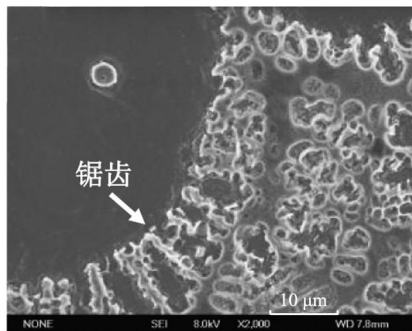
图2 铸态AZ65镁合金的XRD图谱

Fig. 2 XRD pattern of as-cast AZ65 magnesium alloy

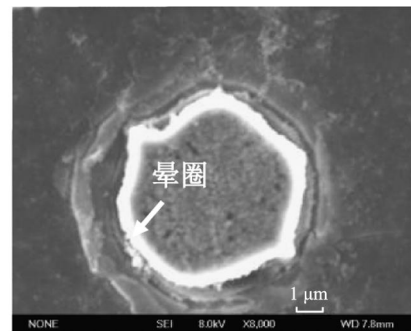
2.2 半固态微观组织分析

AZ65镁合金经等温热处理和水淬后保留了部分重熔的组织特征, 由初生 α -Mg颗粒与二次凝固区构成^[19]。在部分重熔阶段, 初生固相颗粒并未完全熔化, 其边缘呈现晕圈或锯齿形貌, 如图3所示。从界面稳定性角度分析, 当球晶稳定生长时, 固液界面保持光滑, 形成晕圈结构; 若球晶前沿出现微小扰动, 界面失稳, 则演变为锯齿形貌。Trivedi^[12]给出了纯扩散条件下球晶的失稳临界半径 R_{cr} : 当颗粒半径 $R < R_{cr}$ 时, 界面扰动被抑制, 颗粒保持球状稳定; 当 $R \geq R_{cr}$ 时, 随着固相分数降低, 液相内温度梯度升高, 扰动幅值被放大, 球晶失稳并出现锯齿状边缘。

如图4所示, 合金二次凝固区由细小的二次初生 α -Mg相及共晶组织构成, 共晶组织包括共晶 α -Mg相和 α -Mg+ $Mg_{17}Al_{12}$ + $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相。已有研究表明^[20-21], 二次凝固区的组织形成与演化由依附生长与均匀形核两种机制竞争主导。依附生长使共晶 α -Mg相外延附着于初生 α -Mg枝晶表面, 并与 $Mg_{17}Al_{12}$ 等相协同形成规则的层片状或纤维状共晶组织; 而均匀形



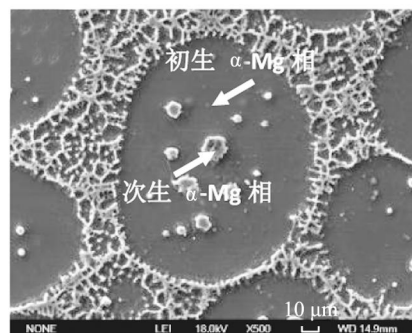
(a) 锯齿特征



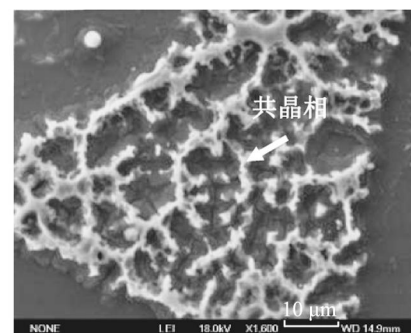
(b) 晕圈特征

图3 半固态AZ65镁合金微观组织锯齿及晕圈特征

Fig. 3 Serrated and halo characteristics of the microstructure of semi-solid AZ65 magnesium alloy



(a) α -Mg相



(b) 共晶组织

图4 半固态AZ65镁合金二次凝固区微观组织

Fig. 4 Microstructures of the secondary solidification zones of semi-solid AZ65 magnesium alloy

核则促使 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 等化合物在枝晶间的液相中独立成核,形成弥散的颗粒状或汉字状组织^[22]。这两种机制的竞争结果及最终组织形貌由凝固过程的液相率、过冷度和凝固速率共同决定。缓慢冷却条件有利于依附生长,形成以初生 α -Mg枝晶为核心的、连续分布的 α -Mg+ $Mg_{17}Al_{12}$ 共晶网;而快速凝固条件则强烈促进均匀形核,使得细小的共晶 α -Mg相与大量弥散分布的金属间化合物颗粒共存于枝晶间^[23]。

在铸锭加热过程中,铸态枝晶组织演变遵循“共晶优先熔化→枝晶根部分离→界面张力球化”三步机制。当温度超过共晶点后,晶界处低熔点 $Mg_{17}Al_{12}$ 与 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相首先熔化,形成初始液相;随过热度增大,溶质原子沿枝晶臂发生定向扩散,玫瑰状共晶从枝晶根部熔断,晶界及亚晶界为该过程提供快

速通道;固液界面能驱动下,破碎的枝晶逐渐球化,形成近球形固相颗粒。延长等温时间后,未熔颗粒受Ostwald熟化机制影响而粗化,大颗粒吞噬小颗粒,颗粒平均尺寸增大,符合 $d^3-d_0^3=Kt$ 关系^[24]。

2.3 等温温度对半固态组织的影响

图5所示为AZ65镁合金在不同温度保温30 min后水淬的半固态组织。当温度为500 °C时,枝晶臂已大量破碎并球化,见图5(a);随温度升高,液相率增加,颗粒等效直径显著减小,在560 °C时达到最小,继续升温则有增大的趋势,同时球化程度不断提高。

AZ65镁合金固相分数、等效直径及形状因子随等温温度的变化规律如图6所示。结合图5(c)可知,当在560 °C保温30 min时,固相颗粒已被液膜完全隔离,

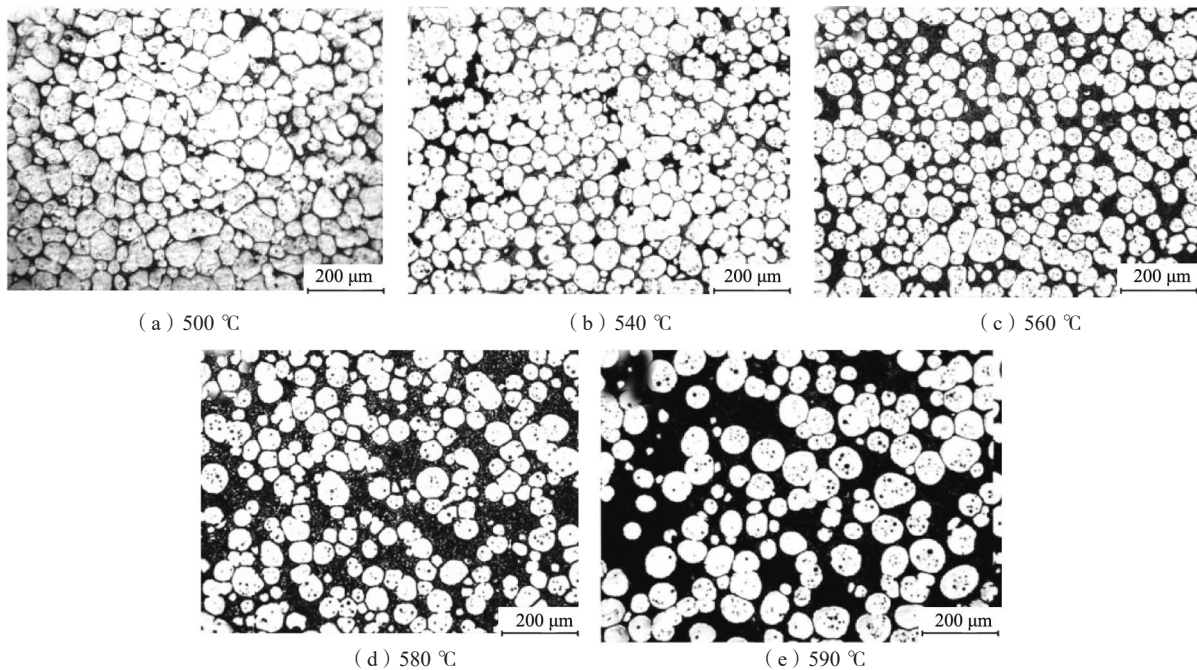


图5 不同等温温度下半固态AZ65镁合金显微组织

Fig. 5 Microstructures of semi-solid AZ65 magnesium alloy under different isothermal temperatures

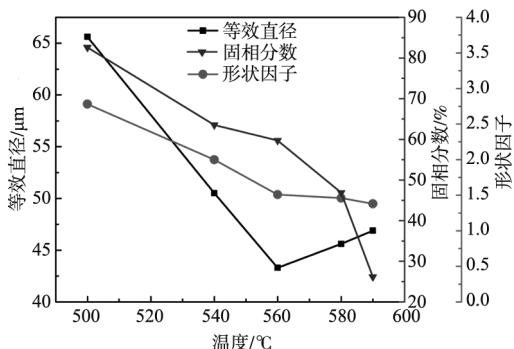


图6 不同等温温度下半固态AZ65镁合金晶粒特征统计结果
Fig. 6 Grain characteristic statistical results of semi-solid AZ65 magnesium alloy under different isothermal temperatures

此时其等效直径低至43.31 μm,固相分数约59%,形状因子为1.51。继续升温至590 °C,液相率显著增加,固相分数陡降,形状因子进一步趋近1,初生 α -Mg颗粒更加圆整,球化程度进一步提高。

2.4 温度对半固态触变成形组织的影响

不同保温温度下半固态触变成形AZ65镁合金的微观组织如图7所示。与等温热处理后的组织相比,触变成形组织明显劣化,颗粒圆整度下降且分布不均,固相周围出现大量“液池”,部分液相甚至已侵蚀颗粒边缘,导致轮廓残缺。触变成形组织中固相分数、等效直径及形状因子随保温温度的变化规律见图8。可

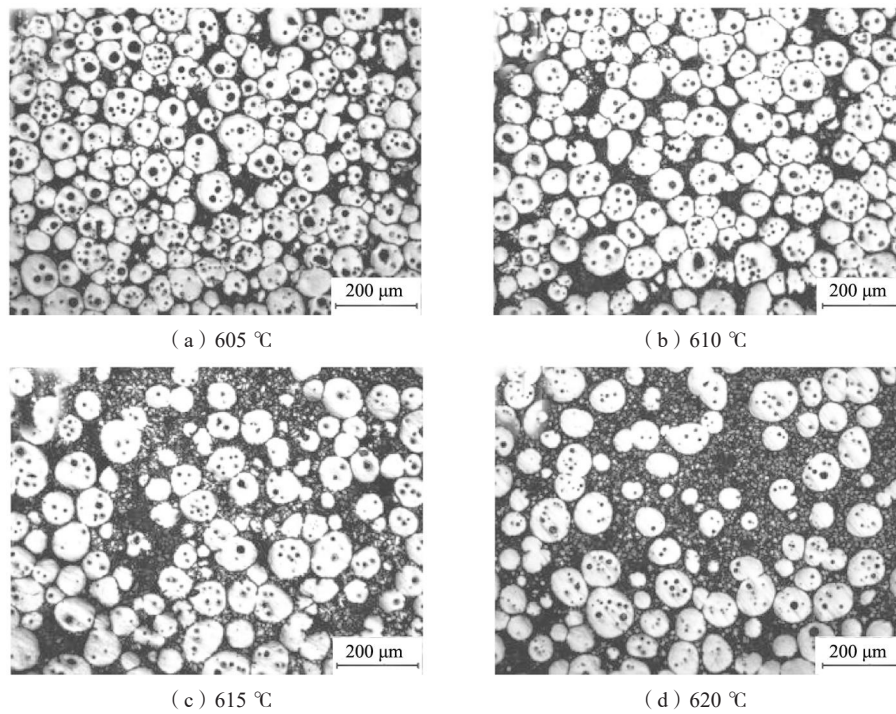


图7 不同保温温度下半固态触变成形AZ65镁合金的微观组织

Fig. 7 Microstructures of semi-solid thixoformed AZ65 magnesium alloy under different holding temperatures

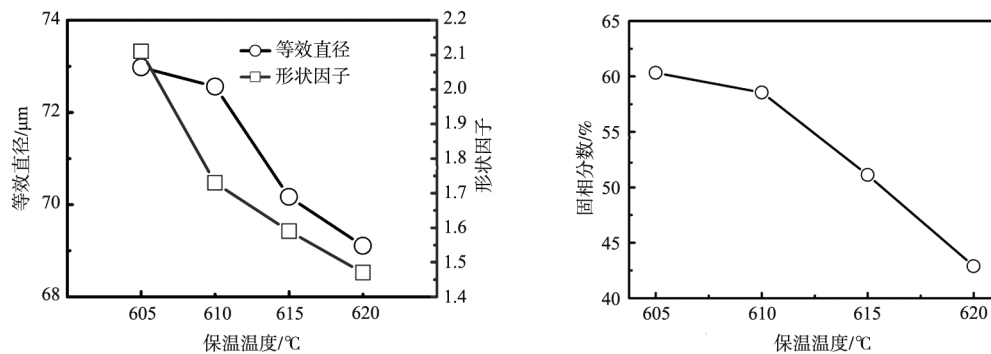


图8 不同保温温度下半固态触变成形AZ65镁合金组织晶粒特征统计结果

Fig. 8 Grain characteristic statistical results of semi-solid thixoformed AZ65 magnesium alloy under different holding temperatures

以看出, 固相分数随着保温温度的升高逐渐降低, 在 620 °C 时固相分数达到最低的 41.8%, 固相颗粒等效直径及形状因子均随着保温温度的升高持续下降。

2.5 力学性能

镁合金是一种重要的结构材料, 其力学性能在很大程度上决定了成形件的应用范围。本研究对三种不同工艺下 AZ65 镁合金的力学性能进行了测试: 金属型铸造、等温处理淬火 (560 °C) 和触变压铸成形 (620 °C), 结果如图 9 所示。金属型铸造试样的室温抗拉强度为 209 MPa, 而等温处理淬火态试样的抗拉强度为 227 MPa, 触变压铸试样的抗拉强度介于两者之间, 为 218 MPa。通过触变压铸成形, 合金力学性能较金属型铸造有所提高, 但由于存在较多铸造缺陷, 如

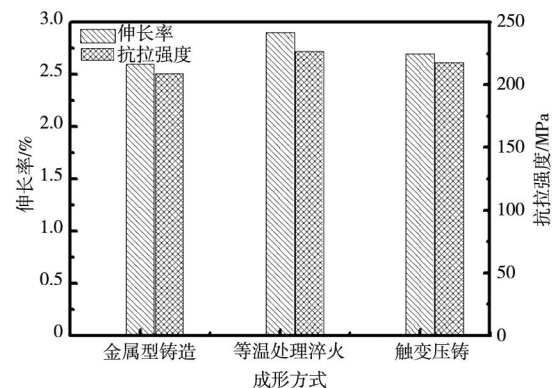


图9 不同处理工艺下AZ65镁合金的力学性能

Fig. 9 Mechanical properties of AZ65 magnesium alloy under different treatment processes

夹渣、缩孔和热裂等，提高幅度不大。

由于镁合金为密排六方晶格，滑移系仅三个，故其断裂方式以解理断裂与准解理断裂为主。由图10可见，金属型铸造试样的断口无明显撕裂棱，但存在大面积解理面，晶界开裂清晰可辨，触变压铸成形试

样与之类似。等温处理淬火态试样的断口形貌表现出明显的沿晶断裂特征，裂纹优先在液相区域萌生并扩展，固相颗粒被整体拔出，形成大颗粒或巢状圆坑形貌。

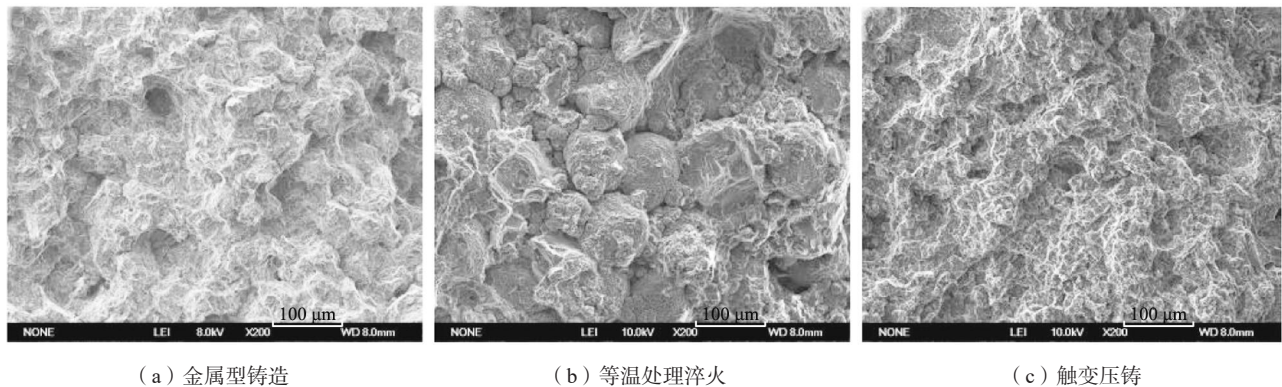


图10 不同处理工艺下AZ65镁合金的断口形貌

Fig. 10 Fracture morphologies of AZ65 magnesium alloy under different treatment processes

3 结论

(1) 铸态AZ65镁合金显微组织呈细小枝晶形貌，由 α -Mg基体与沿晶界分布的断续网状第二相构成。其中，第二相包括主三元共晶 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相及少量二元共晶 $Mg_{17}Al_{12}$ 相。

(2) 等温热处理可成功制备AZ65镁合金半固态组织。等温过程中组织演变依次经历枝晶碎断、球

化、粗化三个阶段；在560℃保温30 min可获得平均尺寸43.31 μm 、形状因子低至1.51的无枝晶近球状结构。

(3) 半固态触变成形的合金组织中颗粒圆整度不佳且分布不均，随保温温度升高，固相颗粒等效直径及形状因子均下降。620℃保温温度下，半固态触变成形AZ65合金的抗拉强度由铸态的209 MPa提升至218 MPa，断口形貌显示其断裂模式为解理断裂，并可观察到沿晶开裂特征。

参考文献:

- [1] 李先洲, 杨杨, 刘付伟通, 等. 镁合金半固态注射技术研究现状及展望[J]. 铸造工程, 2025, 49(4): 21-26.
- [2] HSIANG S H, KUO J L. An investigation on the hot extrusion process of magnesium alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 6-12.
- [3] NISHIKAWA Y, MATSUMURA K, TAKARA A. Development of the outer cases for television set with magnesium alloy [J]. Materia Japan, 2000, 39(3): 278-280.
- [4] 吴振波, 郭威, 黄润华, 等. 镁合金半固态浆料制备及注射成形技术研究进展[J]. 铸造技术, 2025, 46(3): 277-287.
- [5] NAMI B, SHABESTRI S G, MIRE SMAEILI S M, et al. The effect of rare earth elements on the kinetics of the isothermal coarsening of the globular solid phase in semi-solid AZ91 alloy produced via SIMA process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489(2): 570-575.
- [6] 徐升亮, 郭洪民, 杨湘杰. 金属半固态浆料非枝晶微观组织形成机制与表征[J]. 精密成形工程, 2024, 16(7): 109-123.
- [7] 姜巨福, 张金泽, 崔竞波, 等. 镁合金半固态触变注射成形技术研究进展[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2025-11-06. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0584>.
- [8] 孟帅举, 王孟璐, 杜慈威, 等. 触变成形Mg-5Sn-3Bi-2Cu合金微观组织与力学性能研究[J]. 材料导报, 2026, 40(1): 24100030.
- [9] QU D F, DU X D, WANG F, et al. Breaking strength-ductility trade-off in magnesium alloy by semi-solid extrusion process: multi-slip activation in "bimodal grain" [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13(11): 5652-5668.
- [10] 陈宇城, 郑碎勇, 李冰, 等. AM60B合金半固态压铸成形的组织及性能演变[J]. 热加工工艺, 2026, 55(1): 184-189.
- [11] 刘佳辉. Mg-5Zn-xGd-0.6Zr合金半固态工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [12] TRIVEDI R. Theory of dendritic growth during the directional solidification of binary alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 1980, 49(2): 219-232.
- [13] 胡宇阳, 牛立斌, 高冲, 等. 固溶处理对半固态注射成形Mg-Al-Zn合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(7): 38-45.
- [14] 姜龙, 郑小平, 宋进英, 等. 半固态AZ91镁合金固相线以下流变行为[J]. 热加工工艺, 2023, 52(23): 123-127.
- [15] WANG Y N, SHUAI S S, HUANG C L, et al. Revealing the

- diversity of dendritic morphology evolution during solidification of magnesium alloys using synchrotron X-ray imaging: a review [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35: 177–200.
- [16] PUTRA A G, MANAF A, PRAJITNO D H. The effect of Ca and thixoforming process on hardness and microstructure of Mg-Al-Zn alloys [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 643–652.
- [17] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state [J]. *Metallurgical Transaction A*, 1991, 22: 957–981.
- [18] ZHANG J, LI Z S, GUO Z X, et al. Solidification microstructural constituent and its crystallographic morphology of permanent mould-case Mg-Zn-Al alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16 (2): 452–458.
- [19] 宇文江涛, 赵雄, 董璐, 等. 注射成形增强半固态AZ91D镁合金的组织及性能 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53 (6): 122–127.
- [20] CZERWINSKI F. Strain induced melt activation (SIMA): original concept, its impact and present understanding [J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2020, 33 (4/5): 157–164.
- [21] ATKINSON H V, LIU D. Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 496 (1/2): 439–446.
- [22] TZIMAS Z, ZAVALIANGOS A. A comparative characterization of near-equiaxed microstructures as produced by spray casting, magnetohydrodynamic casting and the stress induced, melt activated process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 289 (1/2): 217–227.
- [23] 姚亮宇, 袁森, 王武孝, 等. SIMA法处理AZ91D镁合金压缩形变及半固态等温组织的特征 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14 (4): 660–664.
- [24] 李元东, 郝远, 陈体军, 等. 等温热处理工艺对AZ91D镁合金半固态组织演变和成形性的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12 (6): 1143–1148.