

铸挤一体化高强韧 ZK60 镁合金微观组织及力学性能研究

郭文波, 郭光辉, 赵第甲, 严兆祥, 吕书林, 吴树森

(华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 研究了挤压铸造和铸挤一体化ZK60合金的微观组织和力学性能。结果表明, 挤压铸造和铸挤一体化ZK60合金的微观组织主要由 α -Mg、MgZn₂和MgZn相组成。挤压铸造合金中, 第二相呈细小片状、破碎条块状和颗粒状沿晶界分布; 热挤压后, 第二相呈流线型分布且更加细小弥散。挤压铸造ZK60合金的平均晶粒尺寸为51.75 μm , 铸挤一体化合金的平均晶粒尺寸大幅细化至1.81 μm , 其微观组织具有明显的“双峰结构”特征, 再结晶程度达到52.27%。归因于晶界强化、第二相强化及位错强化, 铸挤一体化ZK60合金展现出优异的力学性能, 其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为349 MPa、321 MPa和18.5%, 比挤压铸造合金提高了78%, 241%和144%, 其断口形貌呈现典型的韧性断裂特征。

关键词: ZK60合金; 铸挤一体化; 微观组织; 力学性能; 晶粒细化

镁合金具有低密度、高比强度、阻尼减震性好和电磁屏蔽性优良等优点, 是常用结构材料中最轻的金属, 在汽车、电子、轨道交通、航空航天以及国防军工等领域有着巨大的应用前景^[1-3]。ZK60合金作为镁合金中的一种, 是目前所有商用镁合金中强度最高的, 且其塑性和耐蚀性较好, 又由于镁合金本身轻的缘故, 因此ZK60合金几乎是所有材料中比强度最高的一种^[4]。

ZK60作为一种高强度变形镁合金, 其比强度已经超过了高强度的7075铝合金^[5]。然而, 由于镁的晶体结构为密排六方, 室温滑移系少且对称性差, 塑性不及面心立方结构的铝, 室温塑性成形能力较差, 这极大制约了其在工程领域的大规模应用^[6]。因此, 只要解决了ZK60的成形加工等关键问题, 其极有可能取代相当部分的铝合金制品, 为材料领域带来继铝合金之后的又一次革命。目前, 常通过锻造、轧制和挤压等塑性加工技术改善镁合金的微观组织, 消除铸造缺陷, 提高其力学性能^[7]。挤压具有比锻造、轧制更为强烈的三向压应力状态, 有利于金属塑性的发挥。

然而, 对于传统的热挤压工艺, 坯料往往需要经过长时间的均匀化处理以及去皮、预热等辅助工序, 工艺复杂且耗时耗能, 限制了其加工效率。在均匀化处理过程中存在以下问题: 坯料晶粒粗化; 第二相溶解后, 对挤压过程中的动态再结晶的促进作用消失; 坯料表面易氧化^[8-9]。此外, 回顾以往对ZK60合金的研究, 要想获得更高强度的合金, 往往需要很高的挤压比^[10-13]。然而, 高挤压比对挤压设备吨位要求高, 而且会缩短挤压模具的寿命, 这将进一步限制ZK60合金在工业领域的大规模应用。因此, 急需一种新技术或新方法解决上述问题。

近期, 作者团队提出了镁合金的铸挤一体化成形新方法, 不仅可实现材料或零件的短流程、高效率、低成本制备与成形, 而且能以较低的挤压比制备出高强度的镁合金。基于该方法, 本研究制备了ZK60合金, 研究了合金的微观组织演变规律及其力学性能, 为制备更高性能的ZK60合金奠定基础。

作者简介:

郭文波(1995-), 男, 博士生, 主要研究方向为金属及金属基复合材料的制备与成形理论。E-mail: 2668991615@qq.com。

中图分类号: TG146.22;
TG113

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2025)
12-1566-07

基金项目:

国家自然科学基金资助
(No.52175321)。

收稿日期:

2025-06-25 收到初稿,
2025-07-14 收到修订稿。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用纯Mg (>99.95%)，纯Zn (>99.95%)和Mg-30%Zr中间合金作为原材料，按照合金的成分进行称量配比，其名义成分如表1所示。

表1 ZK60合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the ZK60 alloy

w _B /%						
Zn	Zr	Al	Si	Fe	其他	Mg
6	0.5	0.01	0.01	0.008	<0.02	余量

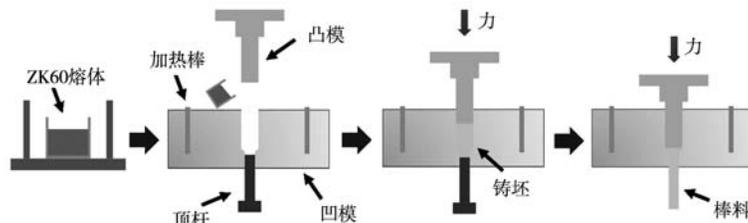


图1 铸挤一体化成形工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous squeeze casting-extrusion process

1.3 组织表征与性能检测

采用X射线衍射仪 (XRD, RD-7000) 分析合金的相组成。 2θ 的范围为 $20^\circ\sim 80^\circ$ ，扫描速度为 $3^\circ/\text{min}$ 。采用光学显微镜 (OM, DMM-490C) 及配备了能谱仪 (EDS) 和电子背散射衍射 (EBSD) 的扫描电镜 (SEM, Gemini SEM300) 观察并表征样品的微观组织形貌。EBSD 分析样品通过精密刻蚀镀膜仪 (PECS II 685) 制备。抛光过程为: 先在电子枪角度 6° 和电压6 kV条件下进行0.5 h, 随后在 3° 和电压3 kV条件下进行0.5 h。EBSD数据通过Aztec Crystal进行分析。在万能材料试样机 (C45.105EY) 上以 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率进行室温拉伸测试。拉伸试样为狗骨形状的试样, 其

1.2 试验方法

首先, 将上述金属原材料在 N_2+SF_6 保护气氛下, 在电阻炉中熔化得到ZK60合金。随后, 将合金熔体倒入预热温度为 100°C 的模腔中, 并施加100 MPa的压力, 待熔体完全凝固后得到挤压铸造坯料。一部分坯料冷却到 350°C 时, 取出凹模下方出口处的顶杆, 进行热挤压, 得到铸挤一体化棒料。挤压速度为7 mm/s, 挤压比9:1。需要说明的是, 挤压铸造和热挤压均在同一模具中完成。图1为铸挤一体化成形工艺流程示意图。

直径为5 mm, 标距长度为30 mm。每组试样进行三次相同的测试, 并取平均值。拉伸后, 采用SEM对断口形貌进行观察和分析。

2 试验结果与讨论

2.1 相鉴定与微观组织

图2是通过挤压铸造和铸挤一体化成形制备的ZK60合金的XRD图谱。通过XRD图谱, 可以看出ZK60合金的相组成主要有 $\alpha\text{-Mg}$ 、 MgZn_2 和 MgZn 相。与挤压铸造工艺相比, 经铸挤一体化后, ZK60合金的相组成没有发生明显变化。图3显示的是通过挤压铸造和铸

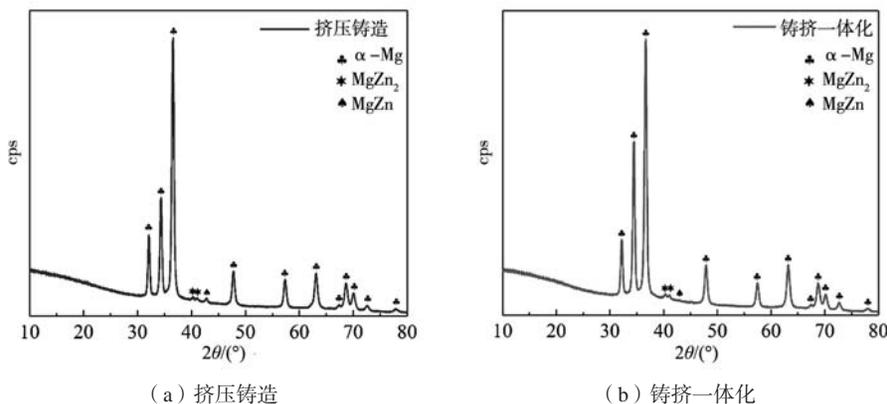


图2 ZK60合金的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of the ZK60 alloys

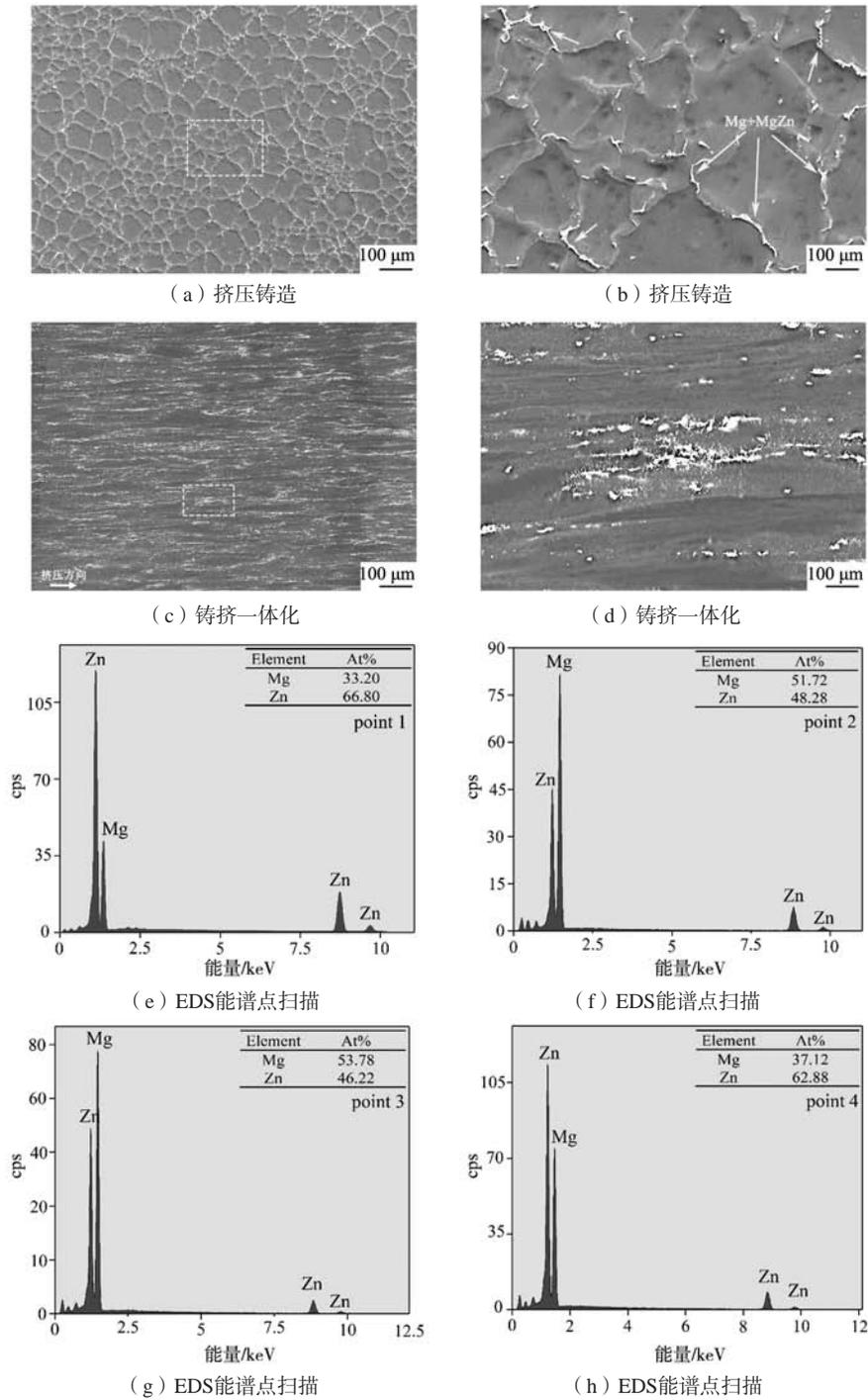


图3 ZK60合金的微观组织及EDS图谱

Fig. 3 Microstructures and EDS patterns of ZK60 alloys

挤一体化成形制备的ZK60合金的微观组织。图3 (a) - (b) 是挤压铸造ZK60合金的微观组织。可以看出, 挤压铸造ZK60合金的微观组织并不是很均匀, 主要由粗大的先结晶的晶粒和细小的二次结晶晶粒组成, 这种现象的产生主要是挤压铸造的高冷却速度所致^[14]。挤压铸造ZK60合金中的第二相主要沿晶界分布, 呈细小片状、破碎条块状和颗粒状。铸挤一体化后的ZK60

合金微观组织如图3 (c) - (d) 所示。可以看出, 第二相沿着挤压方向呈流线型分布。经过强烈的塑性变形后, 第二相被破碎, 变得细小且弥散分布。根据EDS能谱点扫描与XRD分析结果, 颗粒状的第二相主要是MgZn₂相, 破碎条块状的第二相是 α -Mg+MgZn共晶相, 如图3 (e) - (h) 所示。

图4为通过EBSD测得的挤压铸造和铸挤一体化

ZK60合金的反极图 (IPF图) 和晶粒尺寸分布图, 其中晶粒的不同颜色代表晶粒的不同取向。如图4 (a) - (b) 所示, 挤压铸造ZK60合金的晶粒尺寸较大, 晶粒尺寸分布范围在20~120 μm 之间, 其平均晶粒尺寸为51.75 μm 。对于铸挤一体化ZK60合金, 其微观组织具有明显的“双峰结构”特征, 即微观组织由粗大、拉长的未动态再结晶 (unDRX) 晶粒和细小的动态再结晶 (DRX) 晶粒组成。unDRX晶粒大部分呈蓝色, 其 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 晶向平行于挤压方向。细小的DRX晶粒分布

于大晶粒的边界处及其中间区域, 几乎全部为等轴晶粒。铸挤一体化ZK60合金的平均晶粒尺寸相对于挤压铸造合金大幅降低, 降低至1.81 μm , 这势必会使其力学性能大幅提升。图5为铸挤一体化ZK60合金的晶粒取向扩展图 (GOS)。GOS $\leq 1^\circ$ 的晶粒 (以GOS色标标记) 可以看作动态再DRX晶粒^[16], 而GOS $> 1^\circ$ 的晶粒这里归为其他类型的晶粒, 以带衬度 (Band Contrast) 色标标记, 由此统计, 铸挤一体化ZK60合金的动态再结晶分数为52.27%。

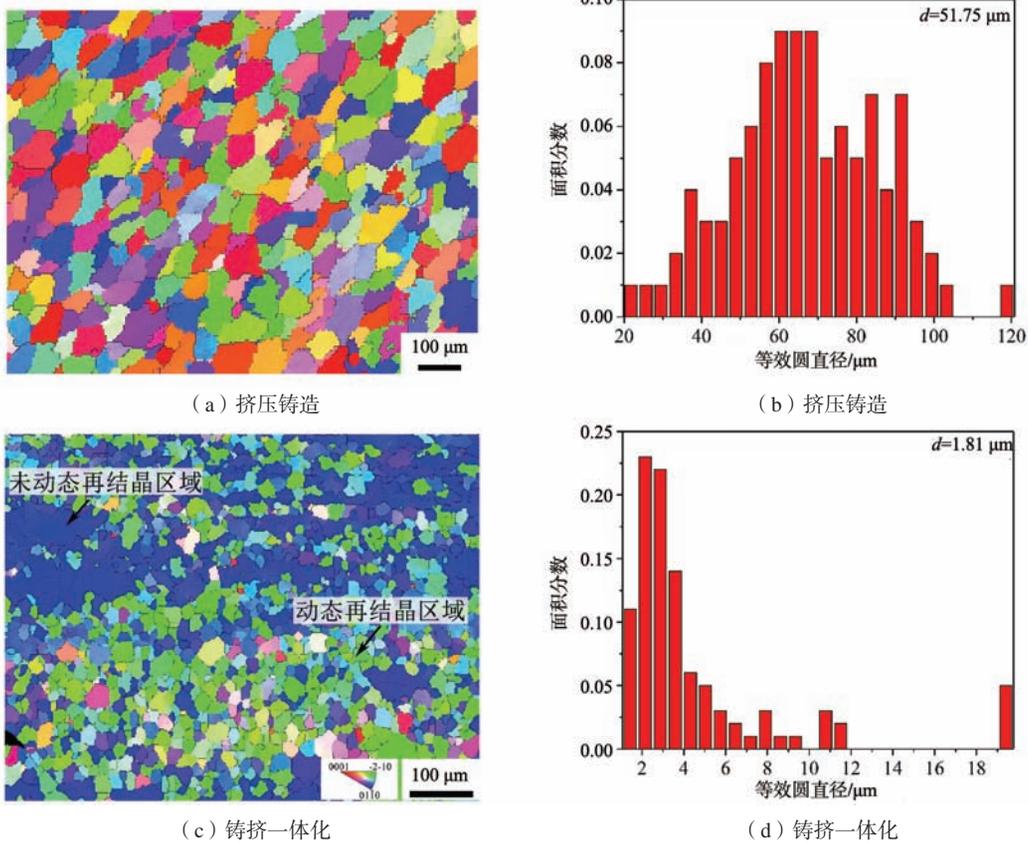


图4 ZK60合金的IPF图及晶粒尺寸分布图

Fig. 4 IPF diagrams and grain size distributions of ZK60 alloys

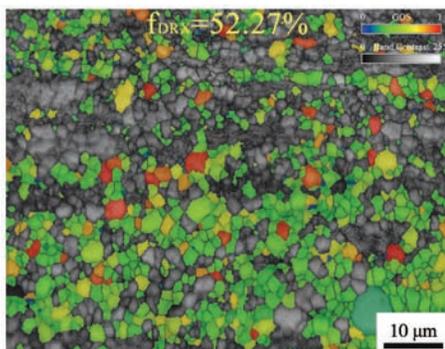


图5 铸挤一体化ZK60合金的晶粒取向扩展图

Fig. 5 Grain orientation distribution of continuous casting-extrusion ZK60 alloy

2.2 力学性能与断口形貌

图6为挤压铸造与铸挤一体化ZK60合金的拉伸工程应力-应变曲线和拉伸性能。挤压铸造ZK60合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为196 MPa、95 MPa和7.6%；铸挤一体化后, ZK60合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提高了78%、241%和144%, 达到了349 MPa、321 MPa和18.5%。表2为采用铸挤一体化工艺制备的ZK60合金与其它研究中采用传统热挤压工艺制备的ZK60合金的性能对比。可以发现, 采用铸挤一体化工艺所制备的ZK60合金的抗拉强度和屈服强度都明显高于其他研究的结果, 同时伸长率也较高, 但略低于peng等人的报道^[11]。值得注意的是, 本研究采用的

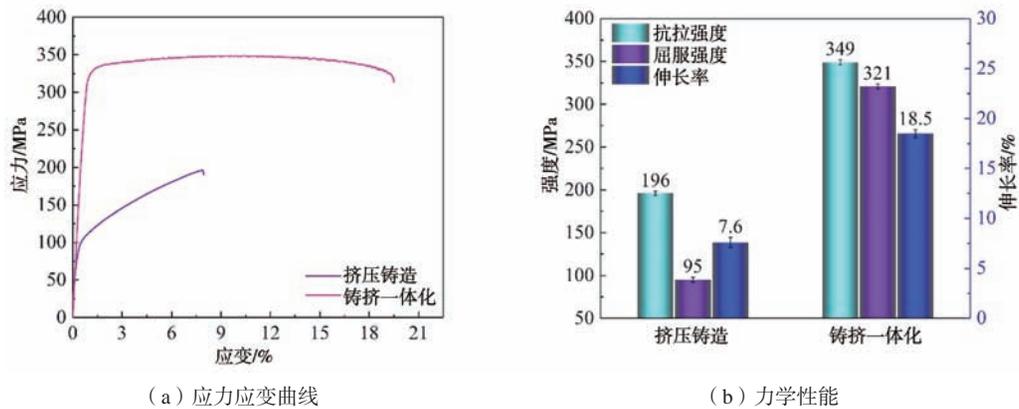


图6 ZK60合金的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of ZK60 alloys

表2 ZK60合金的性能对比
Tab. 2 Performance comparison of ZK60 alloys

方法	挤压比	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率/%	数据来源
铸挤一体化	9 : 1	349	321	18.5	本研究
热挤压	20 : 1	320.5	270.5	12	文献[10]
热挤压	25 : 1	304	190	22.1	文献[11]
热挤压	14 : 1	312	237	15.5	文献[12]
热挤压+T5	14 : 1	329	273	16.5	文献[12]
热挤压	11 : 1	334.9	246.6	12.7	文献[13]
热挤压+T5	11 : 1	322.2	271.1	14.1	文献[13]
热挤压+T4	11 : 1	328	221	15.1	文献[13]
热挤压+T6	11 : 1	319	254.7	17.2	文献[13]

挤压比为9 : 1, 且合金未进行热处理, 这说明采用铸挤一体化工艺所制备的ZK60合金综合性能高于先前报道的采用传统热挤压制备的ZK60合金, 而且无需热处理就能达到很高的强度和韧性。图7为挤压铸造与铸挤一体化ZK60合金的室温拉伸断口形貌图。挤压铸造ZK60合金的断口形貌由较多河流状解理台阶和较浅的韧窝

组成, 解理台阶的平均宽度约为52 μm 。铸挤一体化ZK60合金的断口形貌呈现典型的韧性断裂特征, 即断口形貌由大量深而大的韧窝组成, 韧窝的最大直径超过10 μm , 这与铸挤一体化ZK60合金的高韧性相吻合。

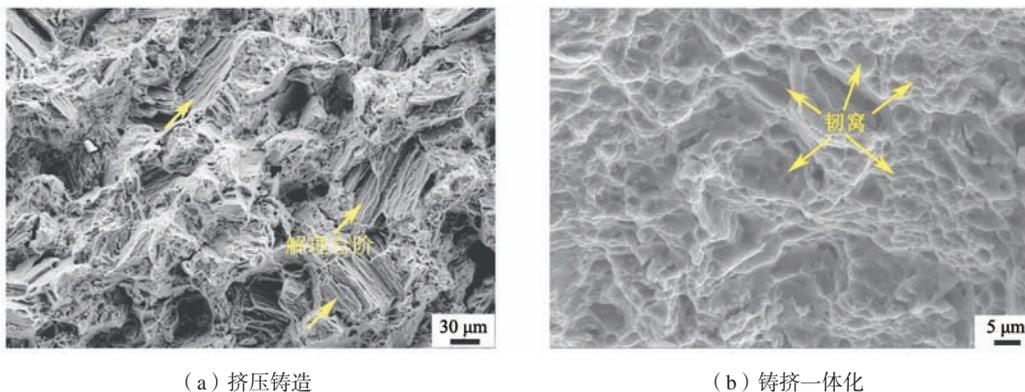


图7 ZK60合金的断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of ZK60 alloys

2.3 强化机理

铸挤一体化ZK60合金的平均晶粒尺寸为1.81 μm ，仅为挤压铸造合金平均晶粒尺寸的3.5%，晶粒细化程度显著。较小的晶粒尺寸可有效提高合金的屈服强度，晶粒尺寸对屈服强度的贡献可通过霍尔-佩奇公式进行估算^[15]：

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad (1)$$

式中： σ_0 、 k 和 d 分别为位错运动在滑移面上的摩擦应力、霍尔-佩奇系数^[15]和平均晶粒尺寸，分别为10 MPa、235 MPa· $\mu\text{m}^{1/2}$ 、1.81 μm 。因此，晶界强化对ZK60合金屈服强度提升的贡献为184.67 MPa。从图3可知，热挤压后，ZK60合金中的第二相呈流线型分布，且被破碎而变得更加细小弥散，因此，在ZK60合金承受应力时，这些微米级甚至亚微米级的第二相将阻碍位错运动，进而提高材料的屈服强度。第二相强化对ZK60合金屈服强度的贡献可由下式计算^[15]：

$$\sigma_p = 0.538 \frac{Gb f^{\frac{1}{2}}}{d_i} \ln \frac{d_i}{2b} \quad (2)$$

式中： G 和 b 分别为镁合金的剪切模量和柏氏矢量，这里分别取为 1.66×10^4 MPa和 3.2×10^{-10} m^[15]； f 为第二相的体积分数，通过IMAGE J软件计算得到其值为10.2%； d_i 为第二相的平均直径，为3.03 μm 。计算得出第二相对屈服强度的贡献约为25 MPa。从图4(c)可知，在挤压过程中，ZK60合金内部存在不均匀变形，为了协调合金塑性变形引起的不均匀变形产生了大量的缠结位错，即几何必需位错，几何必需位错是提高ZK60合金屈服强度的重要因素，位错强化可由公式

(3) 计算^[16]：

$$\sigma_p = M\alpha Gb \sqrt{\rho} \quad (3)$$

式中： M 是平均泰勒因子，约为2.5； α 为常数，为0.2^[16]； ρ 为几何必需位错密度，可以通过EBSD数据计算得到，这里的几何必需位错密度取值为 $5.26 \times 10^{14}/\text{m}^2$ 。由此可计算出几何必需位错密度对屈服强度的贡献为60.91 MPa。综合以上理论计算结果，合金的屈服强度为270.58 MPa，比实际测得的屈服强度低49.41 MPa，这可能是细晶区和粗晶区之间的变形不协调导致。此外，虽然各强化因素对屈服强度的贡献可进行定量计算，但实际屈服强度并非各因素的简单线性叠加。总而言之，对铸挤一体化ZK60合金屈服强度影响最大的是晶界强化。

3 结论

(1) 挤压铸造和铸挤一体化ZK60合金的相组成主要有 α -Mg基体、MgZn₂和MgZn，第二相主要沿晶界分布，热挤压后，第二相呈流线型分布且更加细小弥散。

(2) 挤压铸造ZK60合金的平均晶粒尺寸为51.75 μm ，铸挤一体化ZK60合金的平均晶粒尺寸为1.81 μm ，其微观组织具有明显的“双峰结构”特征。

(3) 归因于晶界强化、第二相强化及位错强化，铸挤一体化ZK60合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为349 MPa、321 MPa和18.5%，分别比挤压铸造ZK60合金提高了78%、241%和144%，其断口形貌呈现典型的韧性断裂特征。

参考文献：

- [1] 徐晨, 巫瑞智, 于哲. Mn合金化对镁合金性能提升的研究进展 [J]. 铸造, 2025, 74 (4): 397-408.
- [2] 郝建强, 王碧心, 赵侃, 等. 长周期堆垛有序结构增强Mg-Zn-Y-(ZrB₂)合金组织和性能的研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (12): 1686-1693.
- [3] 孟帅举, 肖浩然, 刘浩, 等. Zr对铸态Mg-6Bi合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (8): 1096-1102.
- [4] 张保丰, 蔡海勇, 李庆奎. 利用海绵锆制备低成本ZK60A镁合金的研究 [J]. 铸造, 2013, 62 (1): 17-20.
- [5] 杨乐. 多向锻造对ZK60镁合金组织与性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 郝建强, 赵侃, 王碧心, 等. V对Mg-Zn-Y镁合金微观组织和热压缩行为的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (5): 633-639.
- [7] 王浩. 复合挤压ZK60镁合金组织、性能与织构研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [8] ZHAO D, SHULIN Lü, LI J, et al. A novel continuous squeeze casting-extrusion process for grain refinement and property improvement in AZ31 alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 808: 140942.
- [9] YU Z, XU C, MENG J, et al. Effects of pre-annealing on microstructure and mechanical properties of as-extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 729: 627-637.
- [10] ZHOU H T, ZHANG Z D, LIU C M, et al. Effect of Nd and Y on the microstructure and mechanical properties of ZK60 alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 445: 1-6.
- [11] PENG PENG, ZHANG KUNMIN, SHE JIA, et al. Role of second phases and grain boundaries on dynamic recrystallization behavior in

- ZK60 magnesium alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 861: 157958.
- [12] LIU W C, DONG J, ZHANG P, et al. High cycle fatigue behavior of as-extruded ZK60 magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44 (11) : 101007.
- [13] WANG Jingfeng , GAO Shan , PAN Fusheng, et al. Influence of heat treatment on mechanical and damping properties of as-extruded ZK60 magnesium alloy [J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2009, 38: 1029–1032.
- [14] HAO L, YANG X, Lü SHULIN, et al. Influence of squeeze casting pressure and heat treatment on microstructure and mechanical properties of $Mg_{94}Ni_2Y_4$ alloy with LPSO structure [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 707: 280–286.
- [15] LÜ shulin, LI S, QIN J, et al. Effects of extrusion temperature and extrusion ratio on the microstructure and properties of Mg-5Sn-1Ca alloy prepared by continuous squeeze casting-extrusion process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2024, 897: 101016.
- [16] FAN M, CUI Y, ZHANG Y, et al. Achieving high strength-ductility synergy in a $Mg_{97}Y_1Zn_1Ho_1$ alloy via a nano-spaced long-period stacking-ordered phase [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (4) : 1321–1331.

Microstructure and Mechanical Properties of High Strength-Toughness ZK60 Magnesium Alloy via Continuous Squeeze Casting-Extrusion Process

GUO Wen-bo, GUO Guang-hui, ZHAO Di-jia, YAN Zhao-xiang, LÜ Shu-lin, WU Shu-sen

(School of Materials Science and Engineering, State Key Lab of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

The microstructure and mechanical properties of ZK60 alloy prepared by the squeeze casting and the continuous squeeze casting-extrusion have been studied. The results show that both squeeze casting and continuous squeeze casting-extrusion ZK60 alloys are mainly composed of α -Mg, $MgZn_2$, and $MgZn$ phases. The secondary phases exhibit fine lamellar, fragmented blocky, and granular morphologies, distributing along grain boundaries. After extrusion, they show streamline distribution and become finer and more dispersed. The average grain size of squeeze casting ZK60 alloy is $51.75\ \mu\text{m}$, while that of continuous squeeze casting-extrusion ZK60 alloy is $1.81\ \mu\text{m}$, with a distinct "bimodal structure" in the microstructure and a recrystallization fraction of 52.27%. Owing to grain boundary strengthening, secondary phase strengthening, and dislocation hardening, the tensile strength, yield strength, and elongation of the continuous squeeze casting-extrusion ZK60 alloy reach 349 MPa, 321 MPa, and 18.5%, which were 78%, 241%, and 144% higher than those of the squeeze casting ZK60 alloy, respectively. The fracture morphology exhibits typical ductile fracture characteristics.

Key words:

ZK60 alloy; continuous squeeze casting-extrusion; microstructure; mechanical property; grain refinement