DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3053

压力和浇注温度对挤压铸造镁合金组织与性能的影响

黄翠妮[1],廖志雄[2],肖嘉程[1],张伟恩[2],刘　英[3],肖志瑜[1]

(1. 华南理工大学 国家金属近净成形工程技术研究中心,广东 广州 510640; 2. 昶联金属材料应用制品(广州)有限公司,广东 南沙 511470; 3. 暨南大学 先进耐磨蚀及功能材料研究院,广东 广州 510640)

摘　要:采用挤压铸造成形工艺制备 AZ91D 镁合金,研究了不同压力(40、80、120 MPa)和浇注温度(650、690、730 和 770 ℃)对合金组织与性能的影响,优化出高性能挤压镁合金的工艺参数。结果表明,相同浇注温度下,随着挤压压力的增大,第二相体积分数呈现略微逐渐减少的趋势,在晶界上出现的共晶组织分布越来越不连续,α-Mg 相晶粒尺寸逐渐减小;相同挤压压力下,合金的晶粒尺寸随着浇注温度的升高逐渐长大。在 730 ℃浇注温度、80 MPa 挤压压力下获得的挤压铸件综合力学性能最好,其致密度达到最高,为 99.78%,较原材料提高 1.4%;抗拉强度由 121.2 MPa 提高到 219.5 MPa,提高了 81.1%;伸长率由 1.6%提高到 6.4%,提高了 300%。

关键词:挤压铸造;AZ91D;镁合金;组织;性能

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)08-0756-07

Effect of Pressure and Pouring Temperature on the Microstructure and Properties of Squeeze Casting Magnesium Alloy

HUANG Cuini[1], LIAO Zhixiong[2], XIAO Jiacheng[1], ZHANG Weien[2], LIU Ying[3], XIAO Zhiyu[1]

(1. National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Zoltrix Material (Guangzhou) Co., Ltd., Nansha 511470, China; 3. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of different pressures and pouring temperatures on the microstructure and properties of AZ91D magnesium alloy prepared by squeeze casting technology were studied, and better process parameters were explored to provide guidance for the production of high-quality magnesium alloy castings. The results show that at the same pouring temperature, with increasing extrusion pressure, the volume fraction of the second phase presents a slightly decreasing trend, the eutectic structure distribution on the grain boundary becomes increasingly discontinuous, and the α-Mg phase decreases gradually. At the same extrusion pressure, the grain size of the alloy gradually grows with increasing pouring temperature. The comprehensive mechanical properties of extrusion casting obtained at 730 ℃ pouring temperature and 80 MPa extrusion pressure are the best, with the density reaching the highest value of 99.78%, which is 1.4% higher than that of the raw materials. The tensile strength increases by 81.1% from 121.2 MPa to 219.5 MPa, and the elongation increased by 300% from 1.6% to 6.4%.

Key words: squeeze casting; AZ91D; magnesium alloy; microstructure; performance

镁合金具有低密度,高比强度、比刚度,良好的减震性、铸造性、切削加工性和可再生利用等优点,被广泛应用于汽车、航空航天、通信等领域[1-3]。在 AZ 系列中,AZ91D 合金因其良好的铸造性、延展性而成为使用最普遍的商用铸造镁合金之一,多用于摩托车、电脑配件、家用电器产品的壳体等方面[4-6]。

收稿日期:2023-03-12

基金项目:企事业单位委托技术开发与合作项目(x2jqD8213820);广东省自然科学基金(2022A1515240065);韶关市科技计划项目(220814186270984)

作者简介:黄翠妮,1996 年生,硕士生.研究方向为挤压铸造镁合金.Email: 394301803@qq.com

通讯作者:肖志瑜,1965 年生,博士,教授.研究方向为高性能金属材料制备及其成形新技术研究工作.Email: zhyxiao@scut.edu.cn

引用格式:黄翠妮,廖志雄,肖嘉程,等.压力和浇注温度对挤压铸造镁合金组织与性能的影响[J].铸造技术,2023,44(8): 756-762.
HUANG C N, LIAO Z X, XIAO J C, et al. Effect of pressure and pouring temperature on the microstructure and properties of squeeze casting magnesium alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(8): 756-762.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

迄今为止，普通压铸仍占据着镁合金结构件制造的主导地位，但镁合金压铸件通常存在组织疏松和气孔缺陷等[7-10]。对比常规铸造件，借鉴压力铸造和模锻工艺而发展起来的挤压铸造工艺由于充型压力直接施加在型腔内的金属液上，冷却速度快，可以制造出晶粒细小、组织均匀、致密度高、力学性能优良的铸件。对于同成分合金，挤压铸件的强度高于轧材，甚至达到锻件强度，同时伸长率优于压铸件[11-12]。

在挤压铸造工艺中，浇注温度、挤压压力、模具温度、挤压速度、保压时间等共同决定了铸件的性能，其中浇注温度和挤压压力是影响最主要的两个因素[13-16]。一定压力作用可消除铸件中的气孔、缩松和缩孔等缺陷，提高铸件的致密度、改善组织及提高材料性能。压力过小时铸件组织晶粒粗大，铸件表面与质量达不到技术要求；而压力过大时铸件的性能提高有限，同时容易损坏模具[17]。实验用AZ91D镁合金液相线温度为590 ℃左右，合适的浇注温度不仅使合金液内部的气体容易逸出，并且在施加压力后使合金液获得一定的过冷度，从而改变临界形核自由能和形核率，较优的浇注温度应比合金的熔点高100~150 ℃左右[18]。本文拟通过研究不同压力和浇注温度对AZ91D镁合金组织与性能的影响，优化工艺参数为生产优质的镁合金铸件提供指导。

1　实验材料与方法

本实验所用的原材料为压铸用的AZ91D镁合金铸锭，通过光谱分析仪测量其主要化学成分，如表1所示。所用的实验设备主要有100 kN四柱式液压机、SG2-7.5-12型坩埚电阻炉、混合保护气体装置、箱式电阻炉等。

表1 AZ91D镁合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the as-cast AZ91D magnesium alloy　　mass fraction/%

Element	Al	Zn	Si	Ni	Cu	Fe
Contents	9.470	0.690	0.130	0.002	0.001	0.001

合金熔炼前将镁合金锭表面打磨清洗后预热至200 ℃，然后放进涂有氧化锌的自制双层不锈钢坩埚，同时按照镁合金重量的2%~3%加入RJ-3溶剂，主要起覆盖和精炼作用。然后加热至650~770 ℃(实验设计温度)，待AZ91D镁合金完全熔化后，用打渣勺清除熔渣，再保温10 min即可进行浇注、挤压。整个熔炼过程中采用CO_2+Ar+SF6(体积比为24:75:1)混合气体进行保护。浇注挤压前，先用电热圈加热模具至150~180 ℃，模具温度采用表面测温仪测量，同时使用喷枪设备对模具型腔喷涂脱模剂，以便于铸件脱模。然后将合金熔体按照慢一快一慢的浇注速度浇入模具型腔，5 s内进行施压，保压20 s。待金属液在给定压力参数下凝固后，将铸锭取出并在空气中冷却。实验具体挤压工艺参数如表2所示。

表2 AZ91D镁合金挤压铸造工艺参数
Tab.2 Process parameters of squeeze casting of AZ91D magnesium alloy

挤压压力/MPa	挤压速度/(mm·s^{-1})	浇注温度/℃	模具温度/℃	加压时间/s	保压时间/s
40/80/120	15	650/690/730/770	150	5	20

显微观察试样及力学性能拉伸试样由线切割在铸锭表层10~15 mm处取得。采用型号为Leica DML 5000的光学显微镜(OM)和FEI NONA430热场发射扫描电子显微镜(SEM)观察组织形貌及拉伸断口，并使用配备的能谱分析仪对样品元素分布进行分析。采用型号为Xpert Powder的多位自动进样X射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)进行实体样品和粉末的物相分析，扫描速率12 (°)/min，扫描范围20°~90°。试样的致密度由阿基米德排水法测定出铸件的实际密度与理论密度的比值所获得。试样的第二相体积分数运用ImagePro软件对下铸态组织不同的5个位置上进行计算，结果取平均值。采用HBS-3000数显式布氏硬度计测量铸件的硬度，压头直径5 mm，载荷1 225 N，加载时间为30 s，每个试样表面均匀测试7个点，测量结果取去除最大最小值后的平均值。拉伸试样在铸锭上端表层10~15 mm处采用线切割取若干个片状拉伸样，并用砂纸将试样标距段表面打磨至表面光滑，使用配备有电子引伸计的SUNS UTM5105电子万能试验机进行室温拉伸试验，拉伸速率为0.3 mm/min，每组实验测试5个试样，测试结果取平均值。

2　实验结果及讨论

2.1　致密度

图1为不同压力下制备的挤压铸件的致密度，可见在相同浇注温度条件下，合金的致密度随着压力的增大逐渐增大。其中原材料的致密度为98.40%，各浇注温度下随挤压压力增加，挤压铸件致密度提高。统计40、80及120 MPa各挤压压力的挤压铸件平均致密度分别为99.39%、99.55%及99.57%。压力增大可提高合金的致密度增幅有限。这是因为在挤压铸造时，在压力作用下，合金熔体与型腔内壁的接触变得更加紧密，合金液受到压力的强制补缩作用，可以消除铸件中的气孔、缩松和缩孔等缺陷，从而提高铸件的致密度。浇注温度提高可改善合金液的流

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

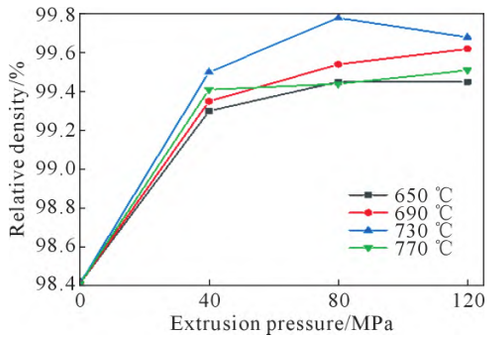

图 1 不同挤压压力下压铸件的致密度

Fig.1 Density of squeeze casting under different extrusion pressures

动性，但对致密度总体影响规律不明显。研究发现，在浇注温度为 730 ℃、挤压压力为 80 MPa 下获得最大致密度为 99.78%，较原材料提高 1.4%。

2.2 物相组成与显微组织

图 2 为浇注温度 730 ℃、不同挤压压力下获得的挤压铸态 AZ91D 镁合金的 X 射线衍射图谱，可见挤压铸造镁合金的相组成主要为 α-Mg 相和 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相。随着挤压压力的增大，α-Mg 相衍射峰强度明显呈现逐渐弱化的趋势，β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相衍射峰强度略微弱化。

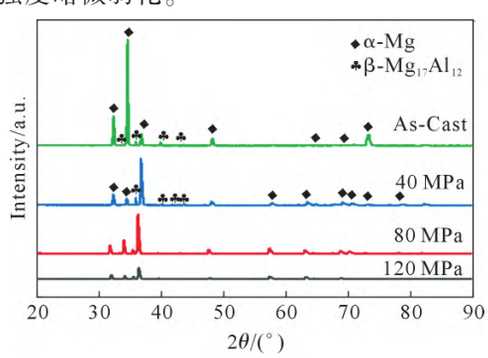

图 2 730 ℃浇注温度，不同挤压压力下 AZ91D 镁合金 XRD 图

Fig.2 XRD patterns of AZ91D alloys under different extrusion pressures at a pouring temperature of 730 ℃

挤压铸造实验中只改变了挤压压力和浇注温度 2 个工艺参数，并未添加其他金属元素，故组织成分不会改变。由于在 730 ℃浇注温度下，获取的挤压铸造 AZ91D 镁合金综合力学性能最好，故选取其在不同挤压压力下铸态的 AZ91D 镁合金进行显微组织分析。图 3 为 730 ℃浇注温度、80 MPa 挤压压力下铸态 AZ91D 镁合金的显微组织，灰色衬度是基体部分，呈微扁平晶胞状分布；白色衬度是第二相，呈不连续网状分布。

两种衬度区域 EDS 结果如表 3 所示，灰色衬度的基体相由 Mg 元素和少量 Al 元素组成，结合图 2 的 XRD 分析结果，可推断为 α-Mg。白色衬度的第二相除含有 Mg 元素以外，还富含 Al 和少量的 Zn 元素，其中 Al 元素质量分数占比 26.47%，Mg 元素质量分数占比 68.55%，结合 XRD 分析结果，可推断其为 β-$Mg_{17}Al_{12}$。少量的 Zn 元素的存在是由于在凝固过程中，Zn 原子会在富 Al 区聚集。白色第二相 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 周围存在深灰色的部分，为非平衡凝固条件下所获得的离异共晶体(α-Mg+β-$Mg_{17}Al_{12}$)，这是由于在挤压铸造过程中，熔体所在的模具型腔温度远低于液体温度，冷却速率较快导致的。

表3 图3中能谱分析

Tab.3 EDS analysis corresponding to Fig. 3

mass fraction/%

Point	Element Contents				
	Al	Zn	Mn	Si	Mg
A	2.92	-	-	-	97.08
B	26.47	4.95	-	0.38	68.20
C	22.85	2.73	0.78	0.35	73.29

对 730 ℃浇注温度、80 MPa 挤压压力下获得的铸态 AZ91D 镁合金试样采用 SEM-EDS 进行元素分布分析，结果如图 4 所示，其中 Mg 和 Si 元素较均匀地分布在基体中，Mn 元素部分与 Al 元素重合。有相关文献指出[19]，挤压铸造 AZ91D 镁合金组织除了存在 α-Mg 相和 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相外，还存在由 Al 和 Mn 形成的化合物 Al_6Mn 相，但在 SEM 和 XRD 中不容易观察到。Al 元素主要集中分布在网状部分，并且该部分与 Mg 元素暗区重合，其余少量分布在基体中，重合部分为 Mg、Al 形成的化合物 $Mg_{17}Al_{12}$。同时 Zn 元素虽然含量很少，但仔细观看发现其主要分布在富 Al 区，证实了在凝固过程中，Zn

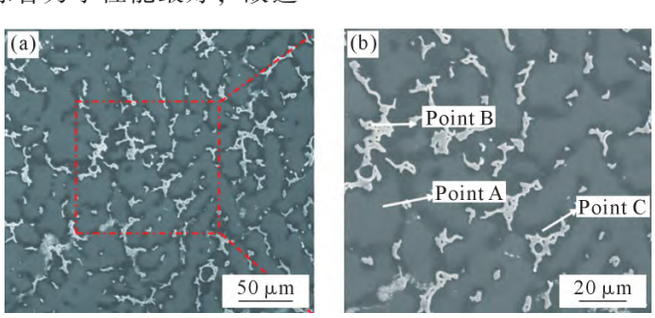

图 3 挤压态 AZ91D 镁合金的显微组织与能谱分析：(a) SEM 图，(b) EDS 能谱分析示意图

Fig.3 The microstructure and energy spectrum analysis of the as-cast AZ91D magnesium alloy: (a) SEM image, (b) EDS analysis

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

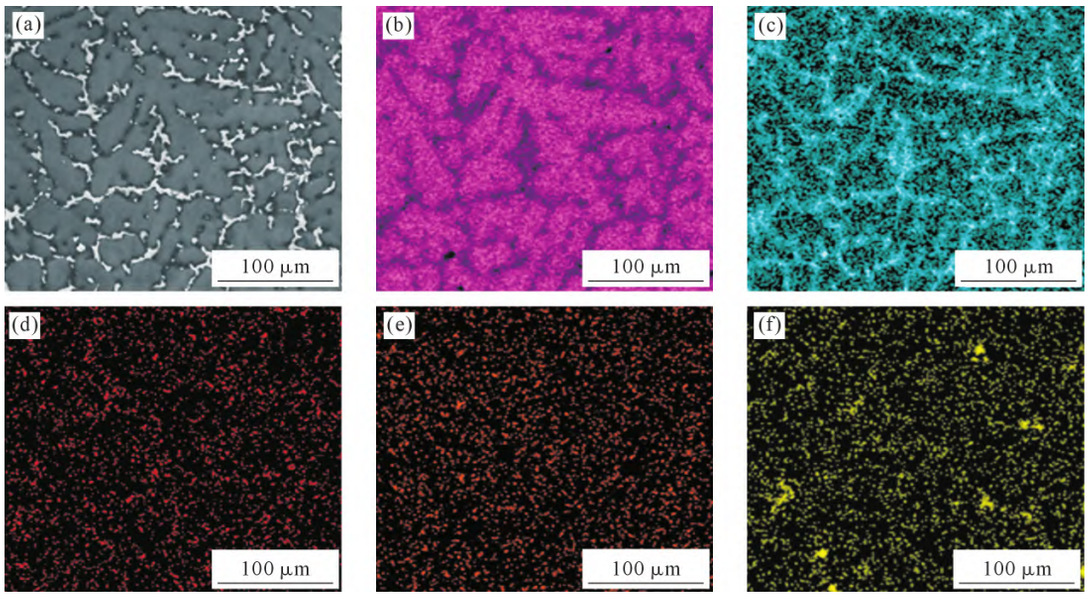

图 4 挤压态 AZ91D 镁合金的元素分布：(a) SEM 图，(b) Mg，(c) Al，(d) Si，(e) Zn，(f) Mn

Fig.4 Distribution of elements in the as-cast AZ91D magnesium alloy: (a) SEM image, (b) Mg, (c) Al, (d) Si, (e) Zn, (f) Mn

原子会在富 Al 区聚集。

图 5 为 730 ℃浇注温度，不同挤压压力下镁合金铸态光学金相和 SEM 组织。可见，原料合金组织晶粒粗大，合金具有明显的大量共晶组织、第二相分布不均匀和偏析现象。随着挤压压力的增加，在晶界上出现的网状离异共晶组织分布越来越不连续，并且 α-Mg 相晶粒尺寸呈现一定的减小趋势。挤压铸造压力 40 MPa 时，α-Mg 基体明显细化、第二相减少但分布不均匀，由于压力作用，部分晶界组织破碎，呈不规则颗粒状、短棒状。增大压力至 80 MPa 时，α-Mg 相晶粒尺寸进一步细化，分布在晶界上的层片状、不规则颗粒状、短棒状组织(第二相)尺寸变得更加细小且分布整体较为均匀。当压力增大到 120 MPa 时，层片状的组织虽然变得更加细小，但逐渐减少，同时更多的不均匀细小再生 β- $Mg_{17}Al_{12}$ 沿晶界析出。

图 6 为 80 MPa 挤压压力下，不同浇注温度 AZ91D 挤压铸件的光学金相组织。可以看出相同挤压压力下，合金的晶粒尺寸随着浇注温度的升高呈现逐渐长大的趋势。这是由于温度的升高使得晶界原子的移动、扩散能力不断增强，晶粒之间吞并速度加剧，从而使晶粒长大。

2.3 第二相体积分数

图 7 为不同浇注温度，挤压压力下镁合金铸态组织第二相体积分数图。可见在 40、80、120 MPa 压力下，浇注温度为 650 ℃时，镁合金组织中第二相体

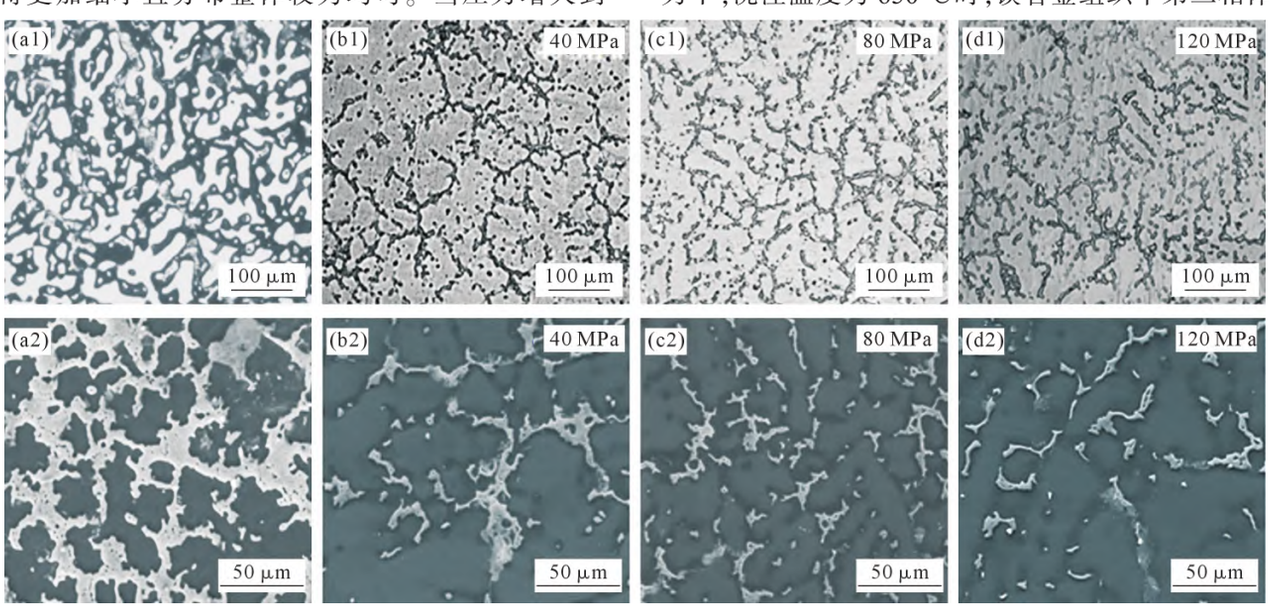

图 5 730 ℃浇注温度，不同挤压压力下镁合金铸态组织金相和 SEM 图：(a1～d1) 金相显微图，(a2～d2) SEM 图

Fig.5 Metallographic and SEM micrographs of the as-cast structure of magnesium alloy at 730 ℃ pouring temperature and different extrusion pressures: (a1～d1) metallographic micrograph, (a2～d2) SEM image

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

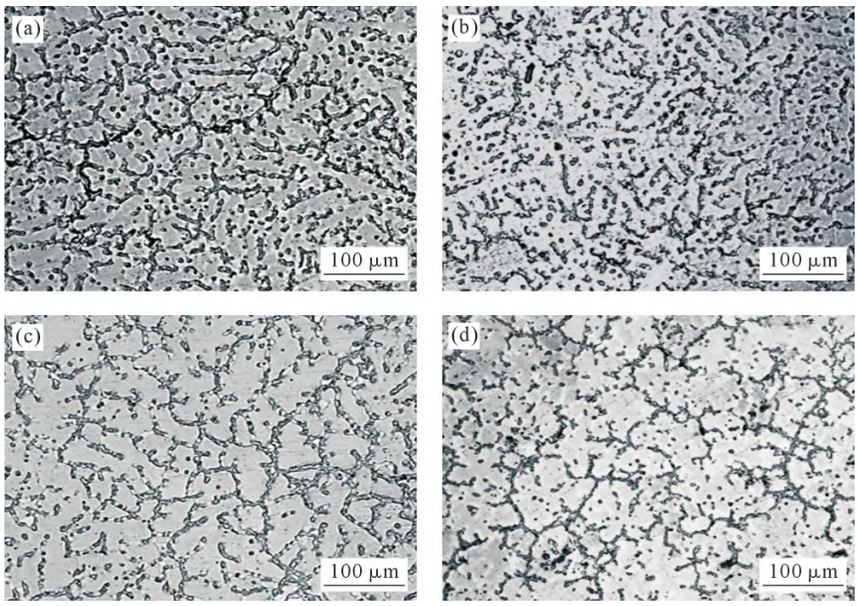

图 6 不同浇注温度 AZ91D 挤压铸件的光学金相组织:(a) 650 ℃, (b) 690 ℃, (c) 730 ℃, (d) 770 ℃

Fig.6 Metallographic structure of AZ91D extrusion castings with different pouring temperatures: (a) 650 ℃, (b) 690 ℃, (c) 730 ℃, (d) 770 ℃

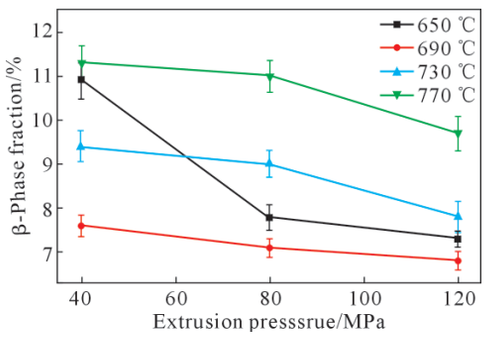

图 7 不同浇注温度、压力下镁合金铸态组织第二相体积分数

Fig.7 Volume fraction of the second phase in the as-cast structure of magnesium alloy at different pouring temperatures and pressures

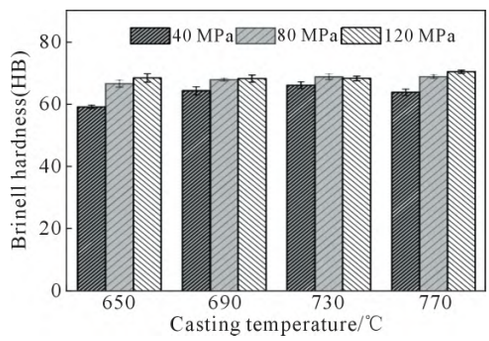

图 8 不同浇注温度、压力下 AZ91D 挤压铸件的硬度

Fig.8 Hardness of AZ91D extrusion casting under different pouring temperatures and pressures

积分数分别为 10.9%、7.8%、7.3%；浇注温度为 690 ℃时，分别为 7.6%、7.1.%、6.8%；浇注温度为 730 ℃时，分别为 9.4%、9.0%、7.8%；浇注温度为 770 ℃时,分别为 11.3%、11.0%、9.7%。在相同的浇注温度下,随着挤压压力的增大,第二相体积分数呈现略微逐渐减少的趋势。这是由于随着挤压压力的增大,原本分布在晶界上的大块层片状组织由于细化或者消失,不规则颗粒状、短棒状组织增多,故第二相 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 含量在一定程度有所减少。而在相同的挤压压力下,浇注温度由 690 ~770 ℃时,随着温度的升高,晶粒发生了长大,故第二相体积分数逐渐增大。其中在 650 ℃浇注温度第二相较多,原因可能由于该温度较低，金属液体的流动性较低,熔体的体积收缩较少,同时在浇注过程中,冷却速率较快,使得第二相体积分数较高。

2.4 布氏硬度

图 8 为不同浇注温度、不同压力下 AZ91D 挤压铸件的硬度。可见在相同浇注温度下,随着挤压压力的增大,合金的硬度逐渐增大。在 650 ℃浇注温度下,压力从 40 MPa 到 120 MPa,增幅最明显,硬度由 59.5 HB 增加到 66.7 HB,增长了 12.1%。压力作用有利于硬度提高的原因主要为细晶强化、固溶强化和致密度提高的影响,其促进了合金液强烈流动、使固液界面处部分晶体发生剥落和游离，增加了形核质点从而使晶粒细化;压力作用下凝固过程加快,合金中 Al 原子来不及发生偏析，促进了固溶强化;挤压压力作用下，减少了铸件中的疏松缩孔等缺陷数量,有利于提高致密度。

2.5 室温拉伸性能

图 9 为原料合金及不同浇注温度下、不同挤压压力下挤压铸造 AZ91D 镁合金的室温拉伸性能曲线图。可见,相较于普通铸件,挤压铸造后的镁合金性能明显提高。当浇注温度一定时,压力由 40 MPa 增大到 80 MPa，材料的抗拉强度和伸长率明显提高。当挤压压力从 80 MPa 升高到 120 MPa 时,材料

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的抗拉强度和伸长率呈现降低的趋势。

分析认为压力的适当增加，可增强晶粒细化程度从而加强细晶强化的效果，获得较好综合力学性能；另外合金组织中气孔、疏松等缺陷数量减少、致密度的提升，也有利于力学性能提高。而压力增加到 120 MPa 时，晶粒进一步细化不明显，力学性能提高有限[20]。同时当压力增大到 120 MPa 时，晶界附近分布着大量短棒状和球状 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相对晶界起一定的弱化作用，容易导致裂纹的产生而使铸件的抗拉强度和塑韧性下降。本实验在浇注温度 730 ℃、压力 80 MPa 下获得的挤压铸件综合力学性能最好，抗拉强度由 121.2 M 提高到 219.5 MPa，提高了 81.1%；伸长率由 1.6%提高到 6.4%，提高了 300%。

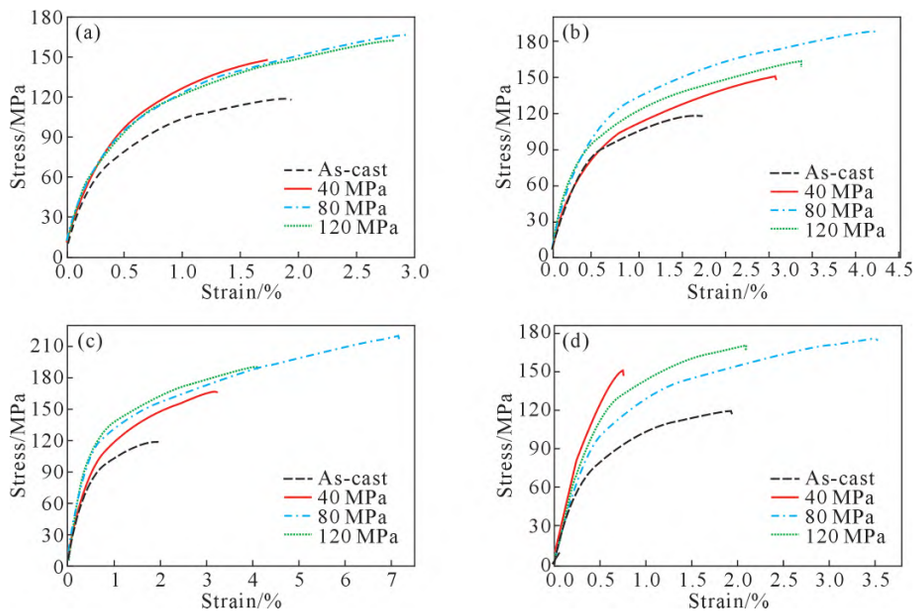

图 9 不同浇注温度、压力镁合金室温拉伸性能：(a) 650 ℃, (b) 690 ℃, (c) 730 ℃, (d) 770 ℃

Fig.9 Room temperature tensile properties of magnesium alloys at different pouring temperatures and pressures: (a) 650 ℃, (b) 690 ℃, (c) 730 ℃, (d) 770 ℃

3 结论

(1)挤压铸造 AZ91D 镁合金组织主要为α-Mg 和 β-$Mg_{17}Al_{12}$。浇注温度相同时随着挤压压力的增加，α-Mg 相晶粒明显细化；第二相 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 细化及晶界出现大量明显的微细共晶组织，体积分数略有减少，但第二相分布不均匀增加。

(2)在 730 ℃浇注温度、80 MPa 挤压压力下获得的挤压铸件综合力学性能最好。致密度达到 99.78%，较原材料提高 1.4%；抗拉强度由 121.2 MPa 提高到 219.5 MPa，提高了 81.1%；伸长率由 1.6%提高到 6.4%，提高了 300%。

参考文献：

[1] CAO H. Characteristics of cast magnesium alloys: Microstructures, defects and mechanical properties[D]. Sweden: Jönköping University, 2005.

[2] 陈力禾，申志勇. 镁合金压铸及其在汽车工业中的应用[J]. 铸造，1999, 48(10): 45-50.
CHEN L H, SHEN Z Y. Magnesium alloy die casting and its application in automobile industry[J]. Foundry, 1999, 48(10): 45-50.

[3] 传海军，黄晓锋，毛祖莉. 压铸技术在镁合金中的应用和发展[J]. 铸造技术，2007, 28(8): 1067-1070.
CHUAN H J, Huang X F, Mao Z L. Development and application of die-casting technology for magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2007, 28(8): 1067-1070.

[4] 刘洁. 镁及镁合金的应用及发展[J]. 有色金属与稀土应用，2013(3): 1-9.
LIU J. Application and development of magnesium and magnesium alloys[J]. Non-Ferrous Metals and Rare Earth, 2013(3): 1-9.

[5] 左铁镛. 中国镁及镁合金发展战略[J]. 科学中国人，2006(2): 28-29.
ZUO T Y. China's magnesium and magnesium alloy development strategy[J]. Scientific Chinese, 2006(2): 28-29.

[6] 陈先华. 镁及镁合金发展简史[J]. 大学科普，2018(1): 38-39.
CHEN X H. A brief history of magnesium and magnesium alloys [J]. Science Popularization in University, 2018(1): 38-39.

[7] 高顺，马晓录. 镁合金成形技术发展现状研究[J]. 河南科技，2015(5): 45-48.
GAO S, MA X L. Research on the development status of magnesium alloy forming technology[J]. Henan Science and Technology, 2015(5): 45-48.

[8] 张卫文，齐丕骧，朱德智，等.《铸造技术路线图》摘录挤压铸造[J]. 铸造设备与工艺，2019(6): 69-74.
ZHANG W W, QI P X, ZHU D Z, et al. Extract from "casting technology roadmap" squeeze casting[J]. Foundry Equipment & Technology, 2019(6): 69-74.

[9] GHOMASGCHI M R, VIKHROV A. Squeeze casting: An overview

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(1-3): 1-9.

[10] OPRIÈ C, CODREAN C, BUZDUGAN D, et al. Pressure die casting of Cu-Zr BMGs for non-implantable medical devices[J]. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, 2021, 37(3): 29359-29363.

[11] WANG L Y, SONG H Q, YE B, et al. Microstructure and mechanical properties of high performance die cast Al-8Ce-3Y aluminum alloy containing Al_4(Ce,Y) phase[J]. Materials Letters, 2021, 305: 130742.

[12] 陈云. 镁合金挤压铸造成形机理及实验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
CHEN Y. Study on the forming mechanism and experiment of magnesium alloy squeeze casting[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

[13] HAO J F, LUO H X, BIAN J C, et al. The effect of squeeze casting process on the microstructure, mechanical properties and wear properties of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16: 153-165.

[14] 徐慧,李天生,张洪. 挤压铸造 AZ91D 合金工艺参数的研究[J]. 热加工工艺,2009, 38(23): 66-68.
XU H, LI T S, ZHANG H. Research on process parameters of squeeze casting for AZ91D magnesium alloy[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(23): 66-68.

[15] GUO Z H, HOU H, ZHAO Y H, et al. Optimization of AZ80 magnesium alloy squeeze cast process parameters using morphological matrix[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 411-418.

[16] LII D F, HUANG J L, CHANG S T. The mechanical properties of AlN/Al composite fabricated by squeeze casting[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22(2): 253-261.

[17] 李鲁,吉泽升,姜博,等. 挤压铸造压力对 6061 铝合金铸件组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2019, 48(9): 38-41.
LI L, JI Z S, JIANG B, et al. Effect of squeeze casting pressure on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 38-41.

[18] WU W Y, WANG D H, DENG P R, et al. Microstructure and mechanical behavior of squeeze casting Mg-8Gd-2Y-0.4Zr alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2018, 33: 466-471.

[19] 陈云,熊新红,杜艳迎,等. 挤压铸造 AZ91D 镁合金的显微组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2015, 35(4): 380-383.
CHEN Y, XIONG X H, DU Y Y, et al. Microstructure and mechanical properties of squeeze casting AZ91D magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35 (4): 380-383.

[20] 吴金珂,王裕民,侯华,等. 挤压铸造 SiCp/AZ91D 镁基复合材料的试验研究[J]. 铸造,2014, 63(4): 336-340.
WU J K, WANG Y M, HOU H, et al. Study on technologies of squeeze casting of SiCp/AZ91D magnesium composites[J]. Foundry, 2014, 63(4): 336-340.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net